

TESIS DOCTORAL

AÑO 2022

**ANALISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE
PLANTAS DE GENERACIÓN ELECTRICA.**

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL ANALISIS DE
RIESGOS EN LOS SISTEMAS TEMPORALES DURANTE LA
FASE FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN Y EL COMISIONADO**

JOSÉ IGNACIO SÁNCHEZ COLMENAREJO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGIAS
INDUSTRIALES**

**DIRECTORA: Dra. Cristina González Gaya
CODIRECTOR: Dr. Felipe Morales Camprubi**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales



Tesis Doctoral

**ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS
DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL ANÁLISIS DE
RIESGOS EN LOS SISTEMAS TEMPORALES DURANTE LA FASE
DE CONSTRUCCIÓN Y COMISIONADO**

José Ignacio Sánchez Colmenarejo

MADRID, JULIO 2022

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS
DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO
EN LOS SISTEMAS TEMPORALES DURANTE LA FASE DE
CONSTRUCCIÓN Y COMISIONADO**

José Ignacio Sánchez Colmenarejo

Directora:

Cristina González Gaya

Codirector:

Felipe Morales Camprubi

CALIFICACIÓN:

Presidente

Vocal

Secretario

Fdo:

Fdo:

Fdo:

III

Agradecimientos

Al profesor y catedrático Dr. Juan Martín quien me animó y me presentó al Dr. Antonio Nevado el cual me orientó y aceptó la dirección de mi acceso al programa de doctorado, sin el cual todo el trabajo posterior no habría tenido lugar. Gracias a los dos por la oportunidad dada.

A mi directora de tesis Dra. Cristina González Gaya, que me ha guiado y dirigido en cada paso que he tenido que dar para completar el programa de doctorado. Sus consejos y sugerencias han sido imprescindibles para llegar aquí. A mi codirector Dr. Felipe Morales Camprubi por su compromiso y apoyo continuo en el camino del doctorado. Sus sugerencias y comentarios para completar los artículos para congresos y publicaciones han sido fundamentales para conseguirlo. Muchas gracias a los dos por vuestro apoyo y trabajo continuo.

A mi compañero y amigo Imanol Ruiz por sus revisiones y sugerencias en los casos de estudio presentados para la aplicación del método.

A mi esposa y compañera Ana, sin la cual esto habría sido imposible y a mis hijas Alicia y Laura por su tiempo y paciencia.

Resumen

El sector eléctrico se ha visto sometido en los últimos años a cambios y adaptaciones como no se había producido en décadas. La irrupción de nuevas tecnologías ha motivado que los agentes sociales pongan el foco y analicen con detalle todos aquellos aspectos relacionados con el medioambiente y la seguridad de las instalaciones, no solo en los que resultan por el efecto de las emisiones, sino también en todos aquellos aspectos relacionados con la seguridad industrial y su afección sobre la sociedad en su conjunto. El propio sector se autoexige en el cumplimiento normativo y, aunque con ciertas reticencias, incorpora las técnicas necesarias para proporcionar un nivel de seguridad adecuado en sus instalaciones. Sin embargo, siguen ocurriendo accidentes, algunos de ellos graves en las plantas de generación, por lo que estudiar con un sentido crítico los métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos realizados para elevar el nivel de seguridad de las centrales es un elemento motivador para el sector.

En este trabajo se realiza una investigación exhaustiva sobre los métodos y técnicas de identificación de peligros y análisis de riesgos que se llevan a cabo durante la construcción y puesta en marcha de las centrales de generación de fuentes no renovable o convencionales. Se proporciona una revisión detallada de la literatura que es agrupada y clasificada en bloques similares. Se utiliza una amplia base de datos de proyectos ejecutados por distintos tecnólogos y contratistas internacionales, de manera que se revisa en detalle los estudios realizados en cada fase en la que se divide el ciclo de vida del proyecto, desde las etapas de diseño previo de la planta, antes del inicio del diseño de detalle y la construcción, hasta las actividades relacionadas con las pruebas y puesta en marcha de la central. Los resultados obtenidos de ese análisis se comparan con los análisis de riesgos que se han venido realizando de manera sistemática en otros sectores industriales. Se proporcionan algunas conclusiones relevantes que pueden proporcionar vías de investigación para el futuro.

Se comprueba que los sistemas temporales que se utilizan durante las últimas etapas de la construcción, más habitualmente durante la etapa de comisionado de la planta, aplican exclusivamente técnicas de evaluación de riesgos que no consideran aspectos que pueden resultar determinantes para la prevención de accidentes. Los registros históricos demuestran que muchos accidentes se producen en esta etapa, por lo que profundizar en las medidas y técnicas de análisis aplicables a este tipo de sistemas puede proporcionar un alto rendimiento en términos de mitigación de situaciones potencialmente peligrosas.

En la segunda parte de la tesis se propone una metodología de trabajo que permite abordar las particularidades de la ejecución de los sistemas temporales de manera segura mediante la puesta en práctica de un método ágil y flexible que puede ser aplicado con sencillez a estos sistemas tan particulares, de modo que puedan ser reducidos los niveles de riesgo que habitualmente se alcanzan en estas configuraciones. La metodología es aplicada a tres ejemplos representativos obteniendo excelentes resultados, por lo que su aplicación futura es recomendada.

Palabras Clave— *Análisis de riesgos, Construcción y comisionado, Sistemas temporales, Análisis de peligros de proceso PHA, Plantas de generación eléctrica*

Abstract

Many changes and adaptations have been produced in recent years in the electricity sector that has been not happened in previous decades. Introduction of new technologies has resulted in social agents to focus and analyze in more detail some aspects related to the environment and safety of the facilities not considered previously, not only those related with environmental emissions, also all those aspects related to industrial safety and their effects on society. The sector self-regulation for standards compliance and, although with some delay, incorporates the necessary techniques to provide an proper level of safety in its facilities. However, accidents continue happens, some of them severe, so critically improving the methods of hazard identification and risk analysis carried out to raise safety in power plants should be enough element for sector motivation.

In this work, an exhaustive investigation is carried out on the methods and techniques of hazard identification and risk analysis that are performed during the construction of power plants that use non-renewable sources. A detailed review of the literature is provided, which is grouped and classified into similar blocks. An extensive database of conventional power plants construction projects is used. Projects have been developed by international contractors and original equipment manufacturers in the last decades. Studies carried out in each phase in which the project life cycle is divided are reviewed in detail, from the stages of preliminary design of the plant, before starting detailed design and construction, up to the activities related to the commissioning of the plant. The results obtained from this analysis are compared with the risk analysis that have been carried out systematically in other industrial sectors. Some relevant conclusions are provided that may provide alternative ways for future research.

It has been verified that the temporary systems that are employed during last stages of construction and commissioning, risk evaluation techniques used do not consider some aspects very important for the prevention of some kind accidents during these activities. Historical records show that many accidents happen at this stage, so deeping into the measures and analysis techniques applicable to this type of system can provide high performance in terms of mitigating potentially dangerous situations.

In the second part of the thesis, a novel work methodology is proposed that allows addressing the particularities of the execution of temporary systems in a safe way by putting into practice an agile, flexible and fast method that can be easily applied to these particular systems, so that the risk levels that are usually reached in these configurations can be reduced. Method is applied to three representative selected examples of this kind of systems with excellent results, so proposed methodology is highly recommended for application in the future.

Keywords— *Risk Analysis, Commissioning and Construction Temporary Systems, Process Hazard Analysis PHA, Power Plants*

Índice

Capítulo 1.	Introducción	1-1
1.1	Objetivos	1-3
1.2	Alcance y límites de la investigación.....	1-4
1.3	Estructura de la tesis	1-6
PARTE I.-ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS DE GENERACIÓN ELECTRICA		1-1
Capítulo 2.	Análisis de riesgos en instalaciones industriales	2-1
2.1	Introducción	2-2
2.1.1	Riesgo y Peligro. Definiciones	2-2
2.1.2	La seguridad industrial.....	2-5
2.1.3	Análisis de riesgos	2-8
2.2	Marco Normativo.....	2-13
2.2.1	Marco Legislativo en Europa.....	2-14
2.2.2	Marco Legislativo Internacional.....	2-18
2.3	Métodos de Identificación de peligros y Análisis de riesgos.....	2-20
2.3.1	Métodos de identificación de peligros	2-21
2.3.2	Métodos Cualitativos.....	2-23
2.3.3	Métodos Híbridos o Semicuantitativos.....	2-38
2.3.4	Métodos Cuantitativos	2-42
2.3.5	Otros Métodos de análisis.....	2-50
Capítulo 3.	La construcción de plantas de generación de energía.....	3-1
3.1	Plantas de generación de energía eléctrica.....	3-2
3.1.1	Descripción general de las plantas de generación de energía eléctrica. Tipologías 3-2	
3.1.2	Plantas de generación eléctrica a partir de vapor.....	3-6
3.1.3	Plantas de generación de Ciclo Combinado.....	3-13
3.1.4	Cogeneración y otras plantas de generación eléctrica	3-17
3.2	El ciclo de vida del proyecto.....	3-17
3.2.1	Fases del Proyecto.....	3-19
3.2.2	Actividades y Objetivos de las fases del proyecto.....	3-20

3.3	Los modelos de ejecución de proyectos en el sector eléctrico.....	3-23
Capítulo 4.	Análisis de riesgos en los proyectos de construcción de plantas de generación de energía	4-1
4.1	Revisión de la literatura	4-2
4.2	Análisis de riesgos y ciclo de vida del proyecto	4-9
4.3	Las etapas de diseño previo	4-12
4.3.1	Equipo de HSE para el proyecto	4-12
4.3.2	Estudios y análisis de riesgos en la fase de diseño previo	4-13
4.4	Análisis de riesgos en la fase de ingeniería.....	4-18
4.4.1	Etapa de Ingeniería Básica.....	4-18
4.4.2	Etapa de Ingeniería de Detalle	4-37
4.5	Análisis de riesgos en la fase de Construcción	4-74
4.5.1	Antes del inicio de los trabajos	4-77
4.5.2	Reuniones de Seguridad.....	4-79
4.5.3	Análisis de Seguridad del Trabajo (JSA) y Exposición de Métodos (Method Statement).....	4-80
4.5.4	Registros y procedimientos de seguridad para control del riesgo.....	4-82
4.6	Análisis de riesgos en la fase de Comisionado, Pruebas y puesta en servicio..	4-84
4.6.1	Procedimientos de prueba y puesta en marcha	4-93
4.6.2	Revisiones de seguridad previas al arranque (PSSR)	4-96
4.6.3	Evaluación de Riesgos de Última Hora (LMRA).....	4-99
4.7	Conclusión	4-102
PARTE II.-PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS EN LOS SISTEMAS TEMPORALES DE LA ETAPA FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN Y EN EL COMISIONADO.....		4-1
Capítulo 5.	Los sistemas temporales en la etapa de construcción y puesta en servicio de una planta de generación de energía.....	5-1
5.1	Sistemas temporales.....	5-2
5.1.1	Sistema de limpieza química.....	5-6
5.1.2	Sistema de limpieza de tuberías de vapor	5-10
5.1.3	Limpieza del sistema de aceite de lubricación de turbina.....	5-15
5.2	Factores Humanos.....	5-18

5.3	Técnicas de evaluación de riesgos para el comisionado	5-22
Capítulo 6.	Propuesta metodológica para el análisis de riesgos de los sistemas temporales durante la construcción y comisionado de una central eléctrica.....	6-1
6.1	Selección del método	6-3
6.2	Descripción de la metodología.....	6-9
6.3	Tipos de resultados y estimación de recursos	6-11
6.4	Procedimiento	6-15
6.4.1	Preparación de la revisión	6-15
6.4.2	Procedimiento de análisis. Reglas y palabras guía recomendadas.....	6-19
6.4.3	Documentación de los resultados.....	6-28
Capítulo 7.	Aplicación de la metodología. Casos de estudio.....	7-1
7.1	Caso 1.- Sistema de limpieza química	7-2
7.1.1	Descripción del caso y documentación base para el análisis.....	7-2
7.1.2	Aplicación del procedimiento.....	7-7
7.1.3	Resultados	7-11
7.2	Caso 2.- Sistema de soplado con vapor.....	7-14
7.2.1	Descripción del caso y documentación base para el análisis	7-14
7.2.2	Aplicación del procedimiento	7-20
7.2.3	Resultados	7-21
7.3	Caso 3.- Sistema de limpieza de aceite lubricación Turbina	7-27
7.3.1	Descripción del caso y documentación base para el análisis	7-27
7.3.2	Aplicación del procedimiento	7-30
7.3.3	Resultados	7-31
Capítulo 8.	Conclusiones	8-1
Capítulo 9.	Trabajos futuros	9-1
Referencias		1
Anexos		1

Índice de Figuras

Figura 2-1 tasas de letalidad para cadenas energéticas completas por áreas geográficas	2-6
Figura 2-2.- Número de accidentes totales por tipo de Industria desde 1979 hasta 2020	2-7
Figura 2-3.- Procedimiento para realizar una evaluación de riesgos de acuerdo con Seveso	2-9
Figura 2-4.- Ciclos típicos de gestión del riesgo	2-10
Figura 2-5.- Causa inicial y el evento de pérdida en el escenario de un incidente.....	2-24
Figura 2-6.- Formato típico de una hoja de trabajo de Análisis What-if.....	2-31
Figura 2-7 Diagrama de flujo de un análisis HAZOP	2-36
Figura 2-8 Grafico de Riesgo según DIN V 19250 y equivalencia con IEC 61511.....	2-40
Figura 2-9 Matriz de Riesgo para cálculo del índice SIL	2-40
Figura 2-10 Capas y metodología de LOPA	2-42
Figura 2-11.- Etapas y sistemas de análisis para la condición segura	2-43
Figura 2-12 Árbol de eventos genérico simplificado	2-44
Figura 2-13.- FTA genérico para un evento de pérdida o evento inicial.....	2-45
Figura 2-14.- Diagrama genérico de un análisis Bow-Tie.....	2-46
Figura 2-15.- Proceso general para la realización de un análisis Cuantitativo de Riesgos	2-47
Figura 2-16 Marco de HSE para la tolerabilidad del riesgo	2-49
Figura 3-1.- Evolución de la generación de electricidad desde los años 70 hasta la actualidad	3-2
Figura 3-2.- Perspectivas para el suministro mundial total de energía hasta el año 2040.....	3-2
Figura 3-3.- Generación de electricidad por tipo de combustible y tipo de planta hasta 2050 ..	3-3
Figura 3-4.- Diagrama simplificado del ciclo termodinámico de una central de vapor simple .	3-5
Figura 3-5.- Diagrama de flujo de una planta de combustión y sus operaciones asociadas.....	3-6
Figura 3-6.- Configuración planta de carbón convencional (a) Subcrítica (b) Supercrítica.....	3-9
Figura 3-7.- Caldera subcrítica Foster Wheeler (izq.) [111] y supercrítica Mitsubishi (dcha.) .	3-9
Figura 3-8.-Componentes de una caldera de lecho fluidizado circulante.....	3-10
Figura 3-9 Turbina de Vapor D-11 de GE y sección longitudinal	3-12
Figura 3-10.- Configuración monoje de un ciclo combinado con sus equipos principales	3-13
Figura 3-11.-Configuración 2x2x1 de GT GE.....	3-14
Figura 3-12.- Esquema principal de funcionamiento de una Turbina de Gas	3-14
Figura 3-13.- Turbina de Gas Industrial SGT-800 de Siemens.....	3-15

Figura 3-14.- Disposición general de una HRSG con sus elementos principales	3-16
Figura 3-15.- Estructura genérica del ciclo de vida de un proyecto	3-18
Figura 3-16.- Fases principales de la construcción de una planta de generación eléctrica.	3-19
Figura 4.1.- Resultados del estudio HAZID detallado caso 2	4-32
Figura 4.2.- Ejemplo hoja resultados HAZID detallado caso Estudio 2	4-33
Figura 4.3.- Ejemplo hoja de trabajo HAZID detallado Caso 3	4-36
Figura 4.4.- Ejecución del estudio HAZOP	4-44
Figura 4.5.- Asignación SIL requerido	4-49
Figura 4.6.- Esquema del proceso HAZOP/SIL	4-50
Figura 4.7.- Ejemplo nodo del sistema de condensado de HAZOP/SIL	4-51
Figura 4.8.- Árboles de eventos para fuga de líquido o gas (izq.) o para escenario mayor de fuego (dcha.)	4-61
Figura 4.10.- Estimación frecuencias y árboles eventos edificios y salas	4-64
Figura 4.12.- Evaluación de riesgo para el evento iniciador E01L6	4-66
Figura 4.13.- Matriz de Riesgos para un estudio EAC de un ciclo combinado.....	4-67
Figura 4.14.- Plano de clasificación de áreas peligrosas para la zona de botellas de H2 de la GT de un ciclo combinado	4-73
Figura 4.15.- Método simplificado para la evaluación de riesgos	4-76
Figura 4.16.- Ejemplo RAMS de trabajos en altura para una central térmica.....	4-82
Figura 4.17.- Cronograma de ejecución de un proyecto de ciclo combinado	4-85
Figura 4.19.- Lista de verificación para la energización de una cabina de baja tensión	4-95
Figura 4.20.- Ejemplo de lista de verificación para un PSSR complejo de tuberías y eléctrico.4-98	4-98
Figura 4.21.- Lista de Verificación para evaluación de riesgos de última hora, LMRA	4-101
Figura 5.1.-Instalación del sistema de limpieza química de caldera y sistemas asociados	5-9
Figura 5.3.- Circuitos soplado con vapor y soplado con aire comprimido.....	5-15
Figura 5.4 Configuración del sistema de aceite de lubricación de turbina.....	5-16
Figura 5.5.- Skid de aceite de lubricación, circuito de control y elevación.....	5-17
Figura 5.6.- Esquema de lavado del sistema de aceite de una turbina-generador típico	5-18
Figura 5.7.- El papel de HFE en el control de riesgos humanos	5-20
Figura 5.8.- Tabla para el análisis HAZOP multinivel.....	5-23
Figura 6.1.- Método de evaluación de riesgos para sistemas temporales.....	6-9

Figura 6.2.- Formato Lista de Verificación 6-22

Figura 6.4.- Hoja de revisión con ejemplos de niveles de riesgo identificados 6-25

Figura 6.5.- Formato de evaluación de riesgos de escenarios riesgo medio o alto..... 6-25

Figura 6.6.- Formato evaluación de riesgos sistemas temporales basados en procedimientos. 6-28

Índice de Tablas

Tabla 2-1.- Palabras Guía para el estudio HAZOP	2-34
Tabla 2-2.- Parámetros habituales de un estudio HAZOP.....	2-34
Tabla 2-3 Formato típico de una hoja de registro del estudio HAZOP	2-36
Tabla 2-4 Formato estándar de una hoja de registro de un FMEA.....	2-37
Tabla 4.1.- Relación entre las actividades del proyecto y los pilares básicos de RBPS.....	4-10
Tabla 4.2.- Ejemplo de Lista de sustancias peligrosas para Líquidos y gases	4-22
Tabla 4.3.- Ejemplo de Lista de sustancias peligrosas para sólidos	4-23
Tabla 4.4.- Ejemplo de Lista de Fuentes de Escape	4-24
Tabla 4.5.- Palabras Guía estudio HAZID conceptual	4-28
Tabla 4.6 Extracto análisis HAZID conceptual nodo 9.....	4-29
Tabla 4.7.- Recomendaciones HAZID conceptual nodos 6 a 10.....	4-30
Tabla 4.8.- Nodos estudio HAZID caso 2	4-31
Tabla 4.9.- Matriz de riesgos del proyecto	4-32
Tabla 4.10.- Acciones recomendadas generales y particulares Caso estudio 2.....	4-34
Tabla 4.11.- Lista de recomendaciones estudio HAZID caso 3	4-36
Tabla 4.12.- Matriz de jerarquización y clasificación del riesgo.....	4-42
Tabla 4.13.- Capas de Protección Independiente y Créditos de reducción riesgo.....	4-47
Tabla 4.14.- Probabilidad (Likelihood)	4-48
Tabla 4.15.-Categorización de las consecuencias.....	4-49
Tabla 4.16.-Funciones Instrumentadas de Seguridad y SIL asignado en el Caso de Estudio 2.4-51	
Tabla 4.17.- Ejemplo Hoja de Trabajo HAZOP Eléctrico. Fuente: Archivo.	4-53
Tabla 4.18.- Duración del escape a efectos de estimación de consecuencias. Fuente: Archivo.4-55	
Tabla 4.19.- Frecuencias de eventos iniciales, de eventos genéricos y de fuegos.....	4-62
Tabla 4.20.- Probabilidad de ignición usado en Árboles de Eventos	4-63
Tabla 4.21.- Ejemplo resultado frecuencias estimadas de eventos iniciales. Fuente: Archivo.4-64	
Tabla 4.22.- Frecuencias de sucesos básicos usados en árboles de fallos aplicados a centrales térmicas.....	4-65
Tabla 4.23.- Frecuencias de Fuego y Explosión para escenarios del ejemplo	4-66
Tabla 4.24.- Ejemplo resultados de la estimación de consecuencias de un ciclo combinado ..	4-67

Tabla 4.25.- Clasificación de áreas peligrosas	4-72
Tabla 4.26.- Clasificación de áreas peligrosas para la zona de botellas de H2 de una Turbina de gas para una central de ciclo combinado	4-72
Tabla 4.27.- Valoración del riesgo	4-77
Tabla 4.28 Peligros y controles de actividades en la fase de comisionado	4-90
Tabla 4.29.- Cumplimiento RBPS en los proyectos de construcción de centrales eléctricas. 4-102	
Tabla 4.30.- Comparativa Análisis de Riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto	4-103
Tabla 5.1.- Comparativa soplado continuo soplado discontinuo con vapor.....	5-14
Tabla 6.1 Recursos Método de análisis de riesgos Sistemas Temporales etapa comisionado .	6-15
Tabla 6.2.- Probabilidad propuesta para la evaluación del riesgo	6-24
Tabla 6.3.- Estimación de las consecuencias para la evaluación del riesgo	6-24
Tabla 7.1.- Condiciones de operación del Sistema de limpieza química.	7-3
Tabla 7.1.1.-Evaluación preliminar de riesgos en base a palabras guía.	7-8
Tabla 7.1.2.-Evaluación de riesgos para los escenarios de riesgo medio y alto,casos 1.1 y 1.2.7-10	
Tabla 7.1.3.- Resultado evaluación de riesgos sobrepresión por operación incorrecta bomba.7-11	
Tabla 7.1.4.-Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos limpieza química Fuel Oil.7-12	
Tabla 7.2.1.- Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos soplado con vapor.	7-23
Tabla 7.3.1.- Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos del lavado aceite de turbina.	7-33

Capítulo 1.

Introducción

La tecnología para la producción de electricidad se encuentra en permanente evolución. Dejando a un lado las convulsiones energéticas actuales, las cuales son producto de diversos factores y crisis acumuladas, es un hecho cierto que la demanda energética mundial necesita continuar utilizando la electricidad que se produce en las centrales eléctricas convencionales que utilizan fuentes no renovables, a pesar del fuerte incremento de las energías renovables que se ha producido en los últimos años y que por supuesto se seguirá produciendo en los siguientes.

La Agencia Internacional de la Energía en sus últimos informes estadísticos proporciona la evolución del consumo energético mundial en las últimas décadas destacando un crecimiento sostenido de la demanda de energía mundial incluso en los peores años de la última crisis financiera. Las proyecciones de generación de electricidad de la Unión Europea hasta el año 2050 muestran que las centrales convencionales seguirán formando parte del mix energético en valores elevados, en torno a un 25% para ese año, a pesar del reconocido y notable incremento de las energías renovables en este periodo.

Las licitaciones nacionales e internacionales continuarán, por tanto, reclamando la construcción de centrales de generación eléctrica que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, independientemente de que simultáneamente el mercado renovable continúe experimentando un notable incremento. Los contratistas internacionales continuarán construyendo centrales de generación aplicando las diversas tecnologías que conforman este tipo de instalaciones, utilizando distintos combustibles en función de las necesidades de potencia instalada y de capacidad de regulación de carga de la planta. La demanda de centrales de carbón disminuirá notablemente, pero no así, aquellas que utilizan combustibles como el gas natural o la biomasa, la cual se encuentra catalogada como renovable en la actualidad. La construcción de este tipo de plantas se rige en términos generales por los mismos principios y complejidad que rigen los grandes proyectos industriales donde se encuentran involucradas todas las especialidades y disciplinas técnicas, siendo necesario establecer para su operativa la implantación de las metodologías y principios de gestión adecuados. Los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica siguen las metodologías y estándares que rigen este tipo de proyectos, estructurándose en fases, de modo que cada fase del proyecto consta de un conjunto de actividades relacionadas de manera lógica, la cual culmina con la finalización de uno o más entregables. La estructuración en fases permite la división del proyecto en subconjuntos lógicos que facilitan su dirección, planificación y control de modo que podrían ser ejecutados separadamente. Así, lo habitual es distinguir entre las fases de diseño e ingeniería, aprovisionamientos, construcción, pruebas y puesta en servicio, operación y mantenimiento, como fases principales del proyecto.

Por otra parte, las plantas térmicas basan su principio de funcionamiento en la conversión de diversas fuentes de energía en energía eléctrica. Manejan presiones y temperaturas del agua y del

vapor muy elevadas y utilizan en el propio proceso de conversión de la energía térmica en energía eléctrica productos, que por su naturaleza y condiciones de operación son peligrosos y por tanto, necesitan de la adopción de medidas de seguridad que reduzcan el nivel de peligrosidad en sus instalaciones. Los niveles de seguridad exigibles a estas plantas son elevados y requieren de una evolución continua en todas sus fases. Deben seguir evolucionando para incorporar las nuevas técnicas y métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos, tal como ha venido incorporando en los últimos años de manera que los niveles de seguridad sigan siendo incrementados.

Estudiar los métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos que se aplican en cada una de las fases del ciclo de vida en que se divide el proyecto de construcción de estas instalaciones, se postula como una forma novedosa e integral para conocer aquellas actividades que requieren de medidas de mitigación de riesgos adicionales a los que se plantean actualmente de modo que permitan reducir el nivel de peligrosidad de sus instalaciones.

Proponer métodos de evaluación de riesgos alternativos e introducir vías adicionales para la identificación de peligros y análisis de riesgos forma parte de la evolución de cualquier sector industrial. Se acomodaría sus estándares y metodologías de trabajo a las nuevas técnicas implementadas, tal como ha venido ocurriendo en las últimas décadas con la adopción de estudios de riesgo de proceso, entre otros.

Incorporar nuevas medidas de seguridad en sus instalaciones debería ser una motivación para el sector eléctrico. La reducción de los niveles de riesgo para las personas, el medioambiente y las instalaciones es un objetivo permanente alentado desde las instituciones y equipos directivos de las compañías eléctricas. Incorporar nuevas medidas de reducción de riesgos forma parte del crecimiento, por lo que proceder con una revisión en términos de seguridad de los estándares aplicados y la manera en que se realiza debería ser una motivación para todos los interesados.

1.1 Objetivos

La presente tesis tiene dos objetivos principales.

En primer lugar se analiza, desde una perspectiva diferente, las técnicas de identificación de peligros y análisis de riesgos que el sector eléctrico incorpora en sus métodos de trabajo para llevar a cabo la construcción de sus instalaciones. En concreto, se centra en el análisis de las técnicas y estudios de análisis de riesgos que se llevan a cabo en las diferentes etapas que conforman el proyecto de construcción de las centrales. Existe poca literatura al respecto, además se introduce como novedad respecto a otros trabajos, el estudio de estos análisis teniendo en cuenta las diferentes etapas que conforman el ciclo de vida del proyecto, centrándolo en aquellas instalaciones que por su tecnología y fuentes de energía pueden ser consideradas convencionales o no renovables. Centrales que utilizan, en términos generales, combustibles fósiles como fuente de energía para su ciclo termodinámico.

El análisis se realiza tomando como referencia un número suficientemente representativo de centrales que se han diseñado y construido en los últimos años en diferentes licitaciones internacionales y nacionales por diferentes contratistas y tecnólogos. Se estudian las distintas alternativas y se analiza la de cada análisis de riesgo teniendo en cuenta la etapa del proyecto en que se realiza.

Los resultados obtenidos de ese análisis detallado se comparan con los análisis de riesgos que se han venido realizando de manera sistemática en otros sectores industriales, considerados de referencia en este tipo de análisis y estudios de riesgos. Se proporcionan algunas conclusiones relevantes que pueden proporcionar vías de investigación para su implementación futura.

Se ha comprobado la necesidad de profundizar y estudiar la aplicación de las técnicas de análisis al estudio detallado de los sistemas temporales que se utilizan durante las últimas etapas de la construcción y más habitualmente durante la etapa de comisionado de la planta. Los registros históricos demuestran que muchos accidentes se producen en esta etapa, por lo que profundizar en las medidas y técnicas de análisis aplicables en esta etapa puede proporcionar alto rendimiento en términos de mitigación de situaciones potencialmente peligrosas.

En la segunda parte de la tesis se responde a este segundo objetivo; Elaborar una metodología de trabajo que permita abordar las particularidades de la ejecución de los sistemas temporales de manera segura mediante la puesta en práctica de un método ágil y flexible que pueda ser aplicado a estos sistemas particulares, de modo que, puedan ser reducidos los niveles de riesgo que habitualmente se alcanzan en estas configuraciones.

Para cumplir con cada objetivo la tesis se ha estructurado en dos partes perfectamente diferenciadas entre sí y que por sí solas constituyen aportaciones novedosas al conocimiento.

1.2 Alcance y límites de la investigación

La investigación tiene un enfoque práctico de aplicación directa en la industria. Toma como referencia para el estudio dos fuentes principales de información. Por un lado, la información obtenida a partir de una rigurosa y exhaustiva investigación bibliográfica de los métodos y técnicas de análisis aplicables, así como de aquellos trabajos más significativos publicados en revistas de calidad reconocida. Por otro, se utiliza una amplia base de proyectos que se han realizado en los últimos años por diferentes contratistas internacionales. La investigación realizada permite asegurar que el estudio realizado es novedoso y con una visión diferencial respecto a los existentes ya que además de aportar la visión práctica y la aplicabilidad directa de la metodología propuesta realiza un análisis detallado de los métodos y técnicas de análisis comúnmente utilizadas por el sector eléctrico.

La investigación tiene unos límites claros. Por un lado, se centra en los proyectos de construcción de plantas de generación de energía eléctrica convencional que utilizan en general, fuentes de energía no renovable, aunque alguna de sus conclusiones y trabajos futuros pueden perfectamente ser de aplicación a algunas plantas de producción de electricidad que utilizan fuentes renovables, como puede ser la energía termosolar, plantas de biomasa o en plantas de generación con hidrógeno. La investigación claramente no aborda las plantas de energía fotovoltaica o energía eólica, las cuales se pueden considerar como principales tipos de plantas de energía renovable.

Aunque se consideran en algunos casos la aplicación de algunas técnicas de análisis de riesgos a los sistemas eléctricos, en términos generales están excluidos del alcance de esta investigación aquellos análisis de riesgos relacionados con los sistemas y equipos eléctricos de alta tensión y estudios de riesgos relacionados con el equipamiento eléctrico, como pueden ser estudios por arco eléctrico o similares.

Esta investigación no es aplicable a plantas que utilizan como combustible la energía nuclear. Los análisis probabilísticos de seguridad propios de estas instalaciones se encuentran excluidos del alcance.

Aunque en algunos estudios comparativos se tratan en ocasiones de manera algo lateral, no es objeto de este trabajo tratar en profundidad ni la seguridad laboral, ni la seguridad de los productos. Tampoco se discuten los enfoques relacionados con el riesgo industrial, como son los riesgos relacionados con la ejecución de los proyectos o como se lleva a cabo en las empresas los sistemas de gestión del riesgo en los proyectos. También se excluye, y por tanto limita la investigación, el riesgo de las empresas o el análisis de las normas que son aplicables en la gestión del riesgo. Dadas las características de este trabajo, es obligado listar y describir, al menos someramente aquella normativa de aplicación, la cual de algún modo limita en sí misma la propia investigación.

Como se verá en el desarrollo del estudio, no se han considerado las etapas relativas a las fase de operación, mantenimiento y desmantelamiento de la central. El estudio finaliza con las fases de pruebas, puesta en servicio y puesta en operación comercial de la central en su conexión a red. Se

mencionan las pruebas de prestaciones como parte de la etapa de comisionado, pero esta, se estudia de manera algo colateral, sin profundizar en ellas de una manera especial.

Aunque en la tesis no se ha dado preferencia a ningún método específico de ejecución de los proyectos o de las obras, la mayor parte de los proyectos que se han analizado, fueron ejecutados bajo la modalidad denominada EPC llave en mano, precio cerrado, la cual incluye como parte del contrato en el alcance del contratista principal todas las actividades relativas a la ingeniería, gestión de suministros y construcción como alcance cerrado. Lo anterior no es limitativo para la aplicación de todas las conclusiones y metodologías analizadas y propuestas, en cualquiera de las formas en las que se ejecute el proyecto.

1.3 Estructura de la tesis

La tesis se estructura en dos bloques diferenciados. En el primero se estudia la aplicación de las técnicas de análisis de riesgos en los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica y en la segunda parte, se estudian en detalle los sistemas temporales de la etapa de comisionado. En esta segunda parte también se propone un método de análisis de riesgos para estos sistemas. Los capítulos 2 a 4 forman parte del primer bloque y los capítulos 5 a 7 del segundo, aunque los capítulos 2 y 3 serían convenientes también en la segunda parte, si ambas fueran analizadas separadamente.

Parte 1

En el segundo capítulo se incluye una introducción al análisis de riesgo en las instalaciones industriales. Es la base para comprender y limitar el alcance de la investigación que se ha mencionado en el apartado anterior. Describir las distintas técnicas de análisis de riesgos y de identificación de peligros que se emplean en la industria, resulta fundamental para luego estudiar que métodos y técnicas se aplican en cada etapa del proyecto. En el capítulo, además de la introducción donde se establecen las definiciones y términos básicos, se incluyen las principales normas de aplicación.

En el tercer capítulo se proporciona la descripción, marco de análisis y tipología de las instalaciones objeto de la tesis. Se inicia con una descripción muy básica del equipamiento, tipos y tecnologías de las centrales de generación eléctrica. Esta parte se ha incluido para aquellos lectores que no estén familiarizados con este tipo de instalaciones, de tal manera que se pueda comprender mejor el alcance de las actividades que se analizan en el resto de la tesis. Se ha buscado un equilibrio entre la simplicidad de un campo bastante amplio y complejo, con proporcionar una visión suficiente para entender los capítulos posteriores, ya que de manera reiterada se recurre a las distintas tecnologías y tipologías de centrales sobre las que se aplican los distintos métodos de análisis. En este capítulo también se establecen las fases en las que se dividen los proyectos de construcción de estas instalaciones y cuáles son los modos de ejecución más habituales proporcionando el marco de análisis sobre el que se trabajará.

El capítulo cuarto incluye el estudio detallado de los análisis de riesgos que se realizan en la plantas de generación objeto de la tesis. Se proporciona inicialmente, una revisión detallada de la literatura que es agrupada y clasificada en bloques de trabajos similares. Se proporcionan ejemplos significativos para cada caso. Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y la base de datos consultada, se analizan detalladamente los estudios realizados en cada fase en la que se divide el ciclo de vida del proyecto, desde las etapas de diseño previo de la planta antes del inicio de la construcción hasta las actividades relacionadas con las pruebas y puesta en marcha de la central. En este capítulo se comparan los resultados obtenidos con la aplicación de las técnicas de análisis de riesgos que se aplican en el sector del refino, petroquímico y gas, proporcionando algunas claves y mejoras.

Parte 2

Se inicia con la descripción de los sistemas temporales objeto de la segunda parte de la tesis. Se describen aquellos sistemas que son comúnmente aceptados incluidos en este tipo de equipamiento no permanente. En el capítulo 5 también se proporcionan algunos métodos y técnicas de evaluación que se han propuesto por algunos autores y que no han tenido la acogida suficiente como para que sean incluidos en las metodologías de trabajo habituales por los interesados en estos proyectos. Se introduce también en este capítulo la ingeniería de factores humanos como contribución para la mejora de la seguridad de las instalaciones.

En la capítulo sexto se realiza quizás la principal aportación de la tesis. Se incluye con detalle la propuesta metodológica para el análisis de riesgos de los sistemas temporales. La propuesta es global, es decir, además de incluir el método propuesto para llevar a cabo la evaluación, incorpora desde listas de verificación específicas para cada fase, como composición de los equipos de pruebas y documentación necesaria para el análisis.

Para comprobar la viabilidad del método, se han elegido tres sistemas bastante representativos de aquellos que se emplean en la fase de comisionado y que esta aceptado que forman parte de la categorización de temporales. El alcance de los sistemas, en cuanto a equipamiento no permanente y estado de la planta en el que se llevan a cabo las actividades, se ha elegido intencionadamente diferente entre ellos para probar la robustez del método. Los resultados obtenidos se muestran de manera resumida en el capítulo 7.

Se han incluido adicionalmente 4 anexos que conforman el volumen 2 de la tesis. La tesis puede ser leída e interpretada perfectamente sin necesidad de atender lo incluido en los anexos, sin embargo, la consulta de dichos documentos la enriquecerán. Los resultados completos y las listas y formatos de verificación completos se han incluido en los anexos 2,3 y 4.

Finalmente, se han incorporado las referencias bibliográficas de los artículos académicos, trabajos de investigación y tesis doctorales principales, sobre los que se ha desarrollado la tesis, así como un apartado de conclusiones y trabajos y líneas de investigación futuras que podrían realizarse a partir de aquí.

**PARTE I.-ANÁLISIS DE RIESGOS EN
LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS
DE GENERACIÓN ELECTRICA**

Capítulo 2.

Análisis de riesgos en instalaciones industriales

2.1 Introducción

Las centrales de generación eléctrica manejan presiones y temperaturas del agua y del vapor muy elevadas y utilizan en el propio proceso de conversión de energía térmica en energía eléctrica productos, que por su naturaleza son peligrosos y por tanto necesitan de la adopción de medidas de seguridad que reduzcan el nivel de peligrosidad en sus instalaciones. Así como en la industria química en general, la cultura organizacional de las empresas ha ido incorporando a lo largo de los años el concepto de seguridad, no en todas las industrias ha ocurrido lo mismo, ni al mismo ritmo ya que su impacto social y ambiental tampoco lo ha requerido. Así, a lo largo del siglo XX y lo que va de XXI, las actividades relacionadas con la construcción y la explotación de las centrales térmicas pueden encontrarse enmarcadas en este tipo de industrias. Industrias que han ido adaptando la cultura organizacional en términos de seguridad al ritmo que ha ido requiriendo la propia sociedad en su conjunto. En los últimos años, las compañías eléctricas y los interesados en los proyectos de construcción de centrales han incrementado notablemente la aplicación de procesos de evaluación de peligros los cuales buscan la disminución del riesgo de estas instalaciones ya sea en la etapa de construcción como durante su operación comercial. Aunque su implementación está siendo algo más lenta de lo que ha sido en otros sectores industriales como el de refino o petroquímico se ha ido imponiendo su aplicación a lo largo de los últimos años de una manera cada vez más extensa y rigurosa.

La etapa de construcción puede considerarse constituida por diferentes subetapas, alguna de las cuales, en algunos casos, requieren el manejo de fluidos en condiciones de presión y temperatura que pueden producir en su manipulación un riesgo elevado que puede conducir a accidentes inesperados, en el peor de los casos con pérdida de vidas humanas.

El presente capítulo pretende crear un marco de análisis suficientemente elaborado en relación con el análisis de riesgos en las instalaciones industriales, de tal manera que sea factible desde una perspectiva general llevar a cabo un análisis detallado de cómo se viene realizando el análisis de riesgos en los proyectos de la construcción actuales de las plantas de generación eléctrica.

2.1.1 Riesgo y Peligro. Definiciones

Las palabras PELIGRO y RIESGO en su acepción más común, pueden ser consideradas como sinónimos y son términos que se encuentran en prácticamente todos los textos sobre la seguridad industrial. Es habitual su utilización indistinta por algunos autores, lo cual no es del todo correcto.

La RAE define Riesgo como:

contingencia o proximidad de un daño.

Por otra parte define Peligro como:

Riesgo o contingencia inminente de que ocurra algún mal,

lo cual obliga a una mayor profundización de los términos para adaptarlos a la industria, ya que también la mayor parte de las acepciones de la definición de riesgo tienen que ver con los riesgos atendiendo a los daños en las empresas o en los mercados. La acepción que define el riesgo

operativo, la cual establece *los riesgos que sufre una empresa derivados de la posibilidad de fallos en su propio funcionamiento*, puede acercarse algo más a la definición buscada. Sin embargo, en términos de riesgos relacionados con la gestión empresarial, es más prudente y riguroso referirse a la definición contenida en la norma UNE-ISO 31000 [1], la cual define el riesgo como:

Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos

La nota 3 a la entrada, establece:

con frecuencia el riesgo se expresa en términos de *fuentes de riesgo, eventos potenciales, sus consecuencias y sus probabilidades*.

Siguiendo con las definiciones de la norma UNE-ISO 31000, resulta de interés revisar los términos de la anotación 3 anterior:

- *Fuente de riesgo*: Elemento que por sí solo, o en combinación con otros, tiene el potencial de generar *riesgo*
- *Evento*: Ocurrencia o cambio de un conjunto particular de circunstancias
- *Consecuencia*: Resultado de un *evento* que afecta a los objetivos
- *Probabilidad*: Posibilidad de que algo suceda.

Son interesantes las anotaciones a la definición. En la nota 1 a la definición se discute la probabilidad en la terminología de gestión del riesgo como una probabilidad matemática o una frecuencia en un periodo de tiempo determinado, mientras que en la anotación 2 se discute la terminología concluyendo que en términos amplios la acepción de likelihood puede traducirse como probabilidad, a pesar de no disponer de una traducción estricta.

En el diccionario panhispánico del español jurídico se encuentra definido el concepto de riesgo de una manera que se acerca más al entorno industrial:

función de la probabilidad de un suceso y de la cuantía de un daño que puede provocar

Esta definición procede directamente de la que se utiliza por el Real Decreto 840/2015 [2].

En la Directiva 2012/18/UE conocida comúnmente como Seveso III [3] en el Artículo 2, se establecen los términos peligro y riesgo como se indica a continuación:

- Artículo 14) «peligro»: la capacidad intrínseca de una sustancia peligrosa o de una situación física de ocasionar daños a la salud humana o al medio ambiente;
- Artículo 15) «riesgo»: la probabilidad de que se produzca un efecto específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas;

La Directiva Seveso III será tratada como parte fundamental del marco normativo en el capítulo 2.2.1.

En el contexto del presente trabajo, además de las acepciones más generales anteriores, se utilizarán las notaciones y nomenclatura de riesgo y peligro que se proporcionan en [4] por el Grupo de Trabajo de Ingenieros químicos de EEUU (Engineering Practice Committee of the Institution of Chemical Engineers).

Se define Peligro como

Una situación física con potencial de lesiones humanas, daños a la propiedad, daños al medio ambiente o alguna combinación de estos.

Los peligros así definidos no solo incluyen la planta de proceso y los materiales asociados, sino también las estructuras principales, los equipos y los materiales. Atendiendo únicamente al proceso, los peligros pueden reducirse a:

Peligro químico

Un peligro que involucra productos químicos o procesos, que pueden dar cuenta de su potencial a través de agentes como fuego, explosión, efectos tóxicos o corrosivos.

Peligro mayor

Término impreciso para un peligro químico a gran escala, especialmente uno que puede darse a través de un evento agudo.

Una sustancia constituye un peligro en virtud de sus propiedades químicas intrínsecas o de su temperatura y presión, o alguna combinación de estas. Por ejemplo, el aire y el agua pueden representar un peligro si se comprimen y calientan, pero ninguno de los dos se clasificaría como “Sustancia peligrosa”, ya que sus propiedades químicas por sí solas no constituyen un peligro. El término sustancia peligrosa puede definirse generalmente como sigue:

Sustancia peligrosa

Sustancia que por sus propiedades químicas constituye un peligro.

Al evaluar la amenaza que representa un peligro, los factores principales son la probabilidad (*likelihood*) de que se produzca y la probabilidad (*likelihood*) y extensión de sus consecuencias, es decir, los daños a las personas, a la propiedad o al medio ambiente, en caso de que se produzca.

El término que expresa esta probabilidad en el contexto actual es el **riesgo**.

Riesgo

La probabilidad de que ocurra un evento no deseado específico dentro de un período específico o en circunstancias específicas. Puede ser una frecuencia (el número de eventos específicos que ocurren en una unidad de tiempo) o una probabilidad (la probabilidad de que un evento específico siga a un evento anterior), según las circunstancias.

Es común entre los profesionales de la seguridad industrial formular el riesgo como una función de la probabilidad de ocurrencia y de la magnitud de sus consecuencias. En otras ocasiones esta función se puede establecer como producto de ambas magnitudes, por lo que se encuentra la siguiente definición del riesgo [5]:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Magnitud de las consecuencias}$$

O esta otra

$$\text{Probabilidad} \times \text{Ocurrencia} = \text{Riesgo}$$

Que podría asociarse con la definición dada en la norma UNE-ISO 31000 anterior.

2.1.2 La seguridad industrial

En [6] se establecen tres vectores principales para el análisis de la seguridad industrial:

- La seguridad laboral
- La seguridad de los productos
- Los accidentes graves

Otros autores [7], incluyen en su planteamiento la gestión empresarial y los costes económicos y sociales como parte de la actividad industrial y su relación con la seguridad de cada uno de ellos vista desde una perspectiva más global, buscando la minimización de los costes sociales de modo que el riesgo sea aceptable, tanto para el medioambiente como para las personas. Este planteamiento acepta que el riesgo cero no existe y siempre hay que encontrar un equilibrio entre el riesgo con la inversión necesaria para minimizarlo a valores aceptables.

No es objeto de este trabajo tratar en profundidad ni la seguridad laboral, ni la seguridad de los productos, aunque en el capítulo siguiente se mencionará aquella normativa y regulación básica que puede ser considerada.

En relación con el tercer vector, el refuerzo de los marcos regulatorios y los avances en la seguridad de los procesos industriales se han venido produciendo históricamente como consecuencia de los grandes accidentes que se han producido a lo largo de los años. La regulación de la Unión Europea respecto a las sustancias peligrosas se inició como consecuencia del accidente de Seveso en Italia. También son públicos los resultados de las investigaciones del accidente de la fábrica de pesticidas en Bhopal en India, donde el escape de gas tóxico provocó la muerte de miles de personas. La investigación de los grandes accidentes, dada su repercusión social ha sido uno de los motores que han impulsado la mejora en la seguridad de las instalaciones industriales.

Atendiendo, específicamente, a la siniestralidad de las centrales de generación de energía eléctrica, cabe citar uno de los estudios más generales que cubre el periodo desde 1969 hasta 2000 de los accidentes más graves que se han producido en los canales de energía fósil en todo el mundo [8]. El estudio se realiza utilizando los datos de la base de datos ENSAD (ENergy related Severe Accidents Database), la cual puede ser considerada como el recurso más autorizado para el análisis comparativo de riesgos de accidentes en el sector energético. El desarrollo y mantenimiento de la base de datos de accidentes graves relacionados con la energía (ENSAD), es una de las actividades desarrolladas por el Instituto Paul Scherrer (PSI) de Suiza, el cual elabora informes que sirven de base para estos estudios [9]. Las evaluaciones se basan en la experiencia histórica de toda la cadena energética de los combustibles fósiles, así como de la energía hidroeléctrica. ENSAD proporciona una relación mundial integrada de accidentes relacionados con la energía. Por ejemplo, en la Figura 2-1, se muestra las tasas de letalidad agregadas para las cadenas energéticas completas en países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), los cuales incluyen los 25 de la Unión Europea, así como países no pertenecientes a la OCDE durante el período 1969-2000, excepto China 1994-99.

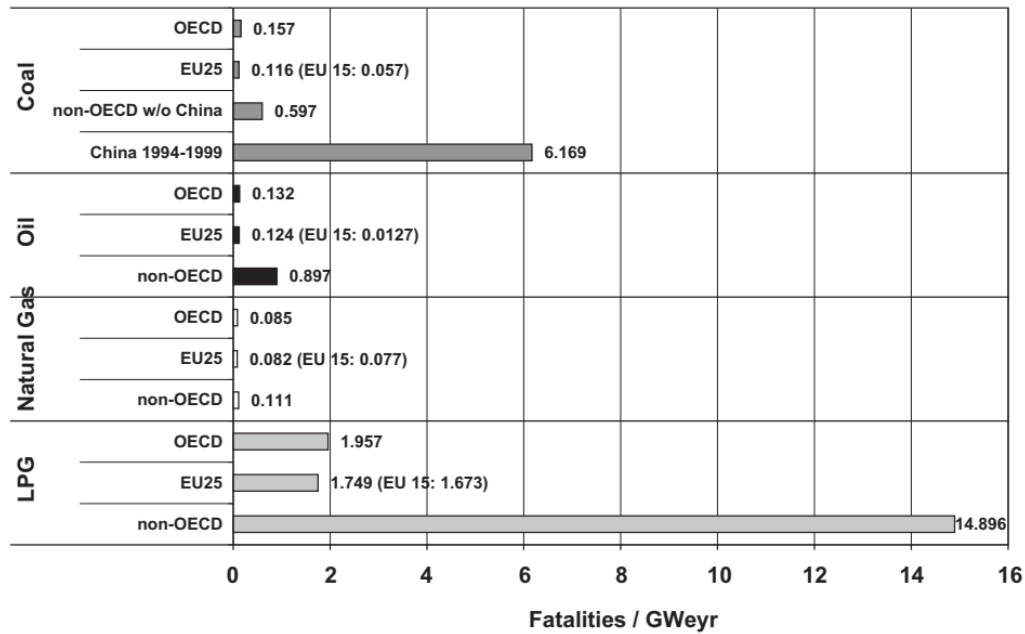


Figura 2-1 tasas de letalidad para cadenas energéticas completas por áreas geográficas [8].

Los análisis no se limitan solo a la propia planta de energía, sino que cubren la cadena completa de la energía. Se puede observar que, en general, las tasas de mortalidad son significativamente más bajas para los países de la OCDE y los 25 países de la Unión Europea (EU25) que para los países que no pertenecen a la OCDE.

Otra de las fuentes principales de accidentes graves es la que se refiere a MARS (Major Accident Reporting System) [10]. MARS, la cual se estableció por primera vez a raíz de la Directiva Seveso (82/501 / EEC de la UE) de 1982 y permanece vigente hasta hoy con la revisión posterior de dicha directiva. El propósito del eMARS (nombre actual como consecuencia de su aplicación online), es facilitar el intercambio de lecciones aprendidas de accidentes y cuasi accidentes relacionados con sustancias peligrosas para mejorar la prevención de accidentes químicos y la mitigación de sus posibles consecuencias. eMARS contiene informes de accidentes químicos y cuasi accidentes proporcionados a la Oficina de Riesgos de Accidentes Mayores (MAHB) del Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea de países de la UE y de la OCDE y aquellos con convenios. Informar de un evento a eMARS es obligatorio para todos los Estados miembros de la UE cuando se cumpla que está involucrado un establecimiento Seveso y que el evento cumple con los criterios de un accidente "grave" según lo definido en el Anexo VI de la Directiva Seveso III (2012/18 / UE)[3]. Para los países de la OCDE y aquellos que no pertenecen a la UE, la notificación de accidentes a la base de datos eMARS es voluntaria. La información del evento reportado es introducida en eMARS directamente por la autoridad de reporte oficial del país en el que ocurrió el evento.

De todos los accidentes que se disponen catalogados y bien documentados en el periodo 1979 a 2020, solo 27 de todos los accidentes registrados se produjeron en centros de suministro y distribución eléctrica y otros 14 en plantas de generación frente al gran número de accidentes registrado en plantas químicas o petroquímicas, las cuales son la principal fuente de riesgos

industriales (ver Figura 2-2). De todos modos, sumando los accidentes relacionados con los dos tipos de plantas de generación y distribución, estos representan una cantidad notable 41, lo que posicionaría a esta industria como una de las primeras en número de accidentes.

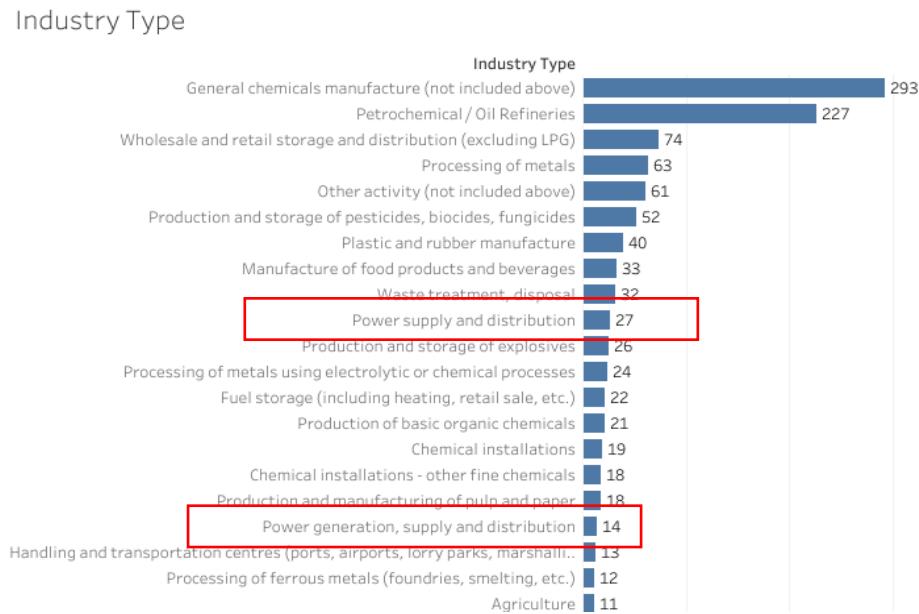


Figura 2-2.- Número de accidentes totales por tipo de Industria desde 1979 hasta 2020 [10]

Dada la orientación de esta tesis, conviene citar algunos trabajos recopilatorios de accidentes que tienen relación con actividades que se realizan durante la etapa de construcción de la planta, durante la fase de pruebas o después de llevar a cabo actividades de mantenimiento tras una parada programada.

En [11] se analiza como el alineamiento incorrecto de los equipos involucrados en el trasvase de fluidos, operación muy común en la industria, es la causa de muchos accidentes. En el estudio se analizan 372 eventos de la base de datos ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) de Francia, y se asegura que en el 92% de los accidentes encontrados, un error de alineación conduce a la pérdida de contención y la liberación de materiales peligrosos, ya sea de manera directa (una válvula abierta), o de manera indirecta (acumulación de presión y fugas).

El Ministerio de ecología y energía [12], también de Francia reporta que en el periodo comprendido entre 1972 y 2007, se informaron de 121 accidentes relacionados con salas de calderas y gas, 41 de los cuales estuvieron relacionados precisamente con dichas salas de calderas de gas y calderas (gas natural, gases de hornos de coque, GLP, etc.) y 80 de los accidentes se produjo con instalaciones donde el combustible, o bien no se conocía o bien no era gas. En el estudio, se incluyeron, además, 37 accidentes del mismo tipo pero que ocurrieron fuera del territorio francés, los cuales se consideraron dadas sus especiales características. Pues bien, el 31,5% de los accidentes (37) tuvieron lugar durante la puesta en servicio o en operaciones de pruebas, mantenimiento o reinicio después de una parada. Es sintomático que ocho de cada nueve accidentes con víctimas y 24 explosiones de equipos tuvo lugar en estas circunstancias.

El estudio concluye indicando la criticidad de estas operaciones y como deberían ser tratadas de manera especial y no como operaciones rutinarias con objeto de prestar la atención debida.

La industria de generación y distribución de energía eléctrica es una industria que globalmente, a lo largo de los años ha contribuido de manera notable al total de accidentes graves registrados por las más importantes bases de datos. También se puede asegurar que un número elevado de dichos accidentes se ha producido en operaciones no rutinarias o relacionadas con las etapas de puesta en servicio de la instalación o en su rearranque después de operaciones de mantenimiento.

La manera más eficaz de incrementar la seguridad en las instalaciones industriales se viene realizando de dos modos:

- Mediante el cumplimiento estricto de la normativa y la regulación en materia de seguridad
- Mediante la utilización y empleo sistemático durante la ejecución de los proyectos de técnicas de identificación de peligros y análisis de riesgos.

Los dos próximos capítulos tratarán de estos dos aspectos fundamentales, pero antes conviene proporcionar una visión actual del análisis de riesgos.

2.1.3 Análisis de riesgos

Del mismo modo que en el apartado 2.1.1 se ha distinguido entre los conceptos de peligro y de riesgo, procede diferenciar entre análisis de riesgos, evaluación de riesgos y gestión de riesgos. El “análisis de riesgos” se puede definir como aquella actividad que utiliza la información disponible en el momento del análisis para identificar los peligros de manera que se pueda establecer el nivel de riesgo existente, mientras que la “evaluación de riesgos” proporciona el grado de aceptabilidad del riesgo.

Para definir “la gestión de riesgos” procede recurrir a la definición dada por R.W Jonhson [13], donde se define el “Risk Management” como *“todas las cosas que deben hacerse tanto continua como económicamente para controlar el riesgo”*. Como los recursos siempre son limitados, debe establecerse una priorización de las tareas y actividades de modo que se pueda responder a las siguientes preguntas clave: *¿Qué puede salir mal?, ¿Cómo de malo podría ser? y, ¿Con qué frecuencia podría suceder?*. Según el nivel de comprensión de estas respuestas, una empresa puede decidir qué acciones, si las hay, son necesarias para eliminar, reducir o controlar el riesgo existente.

Entendiendo el riesgo entonces como una función de las consecuencias y las probabilidades de ocurrencia, que, como se ha visto, se obtiene por el producto de ambas magnitudes, se podrá establecer que un análisis de riesgos considerará la obtención de la medida del riesgo de modo que se pueda proceder con su evaluación, de tal manera que, si como resultado de dicha evaluación el riesgo es aceptable, la instalación industrial se considerará apta para su construcción y operación. En caso contrario, será preciso llevar a cabo las modificaciones necesarias para que el riesgo sea aceptable.

La Figura 2-3 proporciona una visión del proceso que se llevará a cabo para cubrir exclusivamente las etapas de análisis de riesgos y evaluación del riesgo.

Aunque el esquema que se ha presentado en la Figura 2-3 tiene, según los autores que se consulten, diferentes variantes, se ha preferido proporcionar el que se incluye en la Guía Técnica de la normativa de Protección Civil del Ministerio del Interior por ser un marco legal de referencia en España. Esta ampliamente aceptado que el proceso por el cual se realiza la evaluación de los riesgos de una instalación industrial se lleva a cabo a través de varias etapas, las cuales requieren responder a las preguntas básicas que pueden o no formularse exactamente en los términos que se han formulado antes, pero que consiste en un proceso de se basa en las 2 etapas básicas interrelacionadas entre sí (análisis y evaluación del riesgo), las cuales se pueden identificar en las 4 siguientes:

- Identificación
- Análisis
- Estimación
- Evaluación.

En primer lugar, se debe llevar a cabo una *identificación* de los peligros existentes, donde se identifiquen todas aquellas condiciones no seguras o fuentes potenciales que pueden producir un evento indeseado en la instalación que, a su vez provoque un daño, pérdida o perjuicio a las personas, a los materiales o al medioambiente. Las técnicas para realizar esta identificación son diversas y se encuentran descritas en el capítulo 2.3.

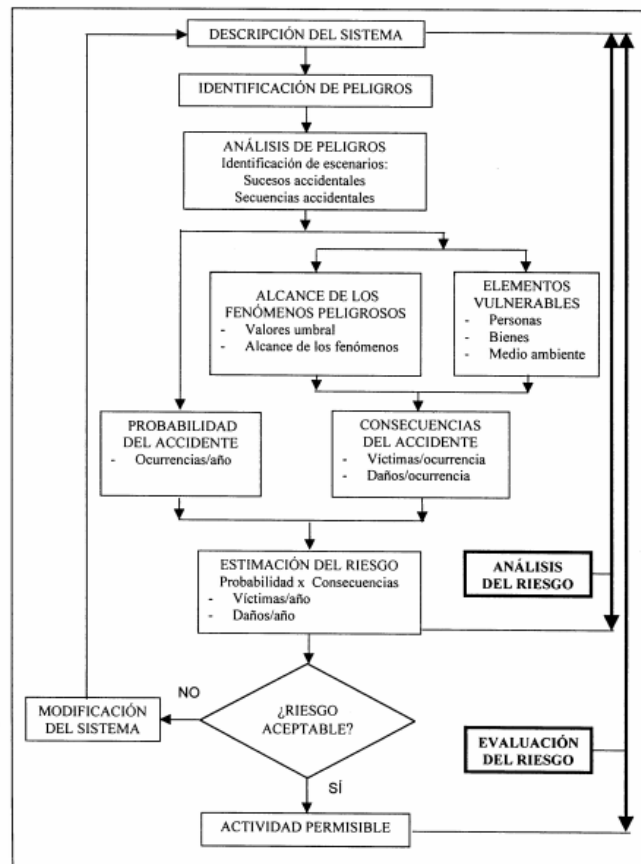


Figura 2-3.- Procedimiento para realizar una evaluación de riesgos de acuerdo con Seveso [14]

Una vez identificados los peligros se debe proceder con el *análisis* de los escenarios a los que darán lugar los peligros identificados en la etapa anterior. Este análisis consiste en establecer los escenarios de posibles accidentes que pueda producir cada uno de los riesgos. Para ello será necesario establecer los efectos posibles del accidente, determinar las zonas vulnerables y todas aquellas consideraciones que sean necesarias para poder delimitar y justificar el alcance, entendiendo por alcance las consecuencias del accidente, tanto sobre las personas como sobre los equipos y el medioambiente.

A continuación, se procederá con la estimación del riesgo de modo que en la última etapa se pueda proceder con la evaluación.

En la actualidad existen metodologías de gestión de riesgos que están proporcionando un marco global que en un ciclo circular de la gestión del riesgo reevalúan de manera continua los peligros y riesgos a los que se encuentra sometida la instalación [15]. La gestión de riesgos se entiende como una obligación empresarial y no como una buena práctica.

La Figura 2-4 muestra el esquema circular a dos niveles, corporativo y/o a nivel de negocio y de operación a nivel de planta.

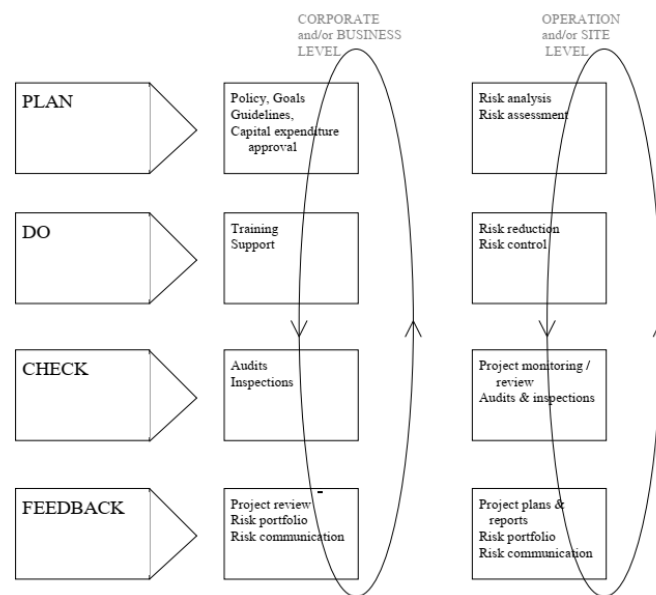


Figura 2-4.- Ciclos típicos de gestión del riesgo [15]

En este esquema, los pasos necesarios para llevar a cabo la gestión del riesgo se dividen en los siguientes:

Para análisis y evaluación de riesgos:

- 1. Identificar** los peligros y quien o que podría verse afectado
- 2. Comprender y evaluar** las posibles consecuencias del peligro, los posibles eventos peligrosos y su probabilidad, así como las posibles exposiciones a las consecuencias de esos eventos.
- 3. Evaluar** la importancia del riesgo que surge de la combinación de la probabilidad de eventos peligrosos y la exposición a sus consecuencias

Para la reducción y el control de riesgos:

4. Seleccionar las medidas adecuadas para controlar los riesgos a un nivel suficientemente bajo, incluida la eliminación del riesgo cuando sea económica y técnicamente viable.

5. Implementar las medidas de control para garantizar un funcionamiento seguro

6. Supervisar y revisar la implementación de las medidas de control de modo que se garantice su integridad y seguridad continua. En esta etapa también se precisa aprender de la experiencia e identificar y explorar oportunidades para mejorar la reducción de riesgos.

7. Comunicar a todos aquellos que tienen un papel que desempeñar en el proceso de gestión de riesgos para asegurarse de que saben lo que pueden y deben hacer. También se comunicará a aquellos a quienes los riesgos pueden ser motivo de preocupación y requieren garantías de que los riesgos se gestionan adecuadamente.

De acuerdo con esto, y siguiendo con lo reportado por Hawksley en [15], existen tradicionalmente 2 enfoques diferentes para llevar a cabo la gestión de riesgos:

- Enfoque basado en reglas
- Enfoque basado en riesgos

El enfoque de gestión de riesgos "basado en reglas" se aplica típicamente cuando los peligros son en su mayoría evidentes por sí mismos a partir de experiencias pasadas y las medidas para su control efectivo están bien definidas normalmente en la legislación nacional, en los códigos de buenas prácticas, así como en las normas de la industria o de la empresa, normalmente basadas en las lecciones aprendidas de la experiencia.

El enfoque alternativo y complementario es el enfoque "basado en el riesgo", en el que los peligros se identifican mediante una combinación de pensamiento creativo y un examen crítico estructurado y se someten a un análisis técnico para ayudar a decidir los medios más eficaces para controlar el riesgo.

Se podría decir que el enfoque "**basado en reglas**" es el más tradicional, pero no es estático. El enfoque "basado en el riesgo" es más moderno y analítico. Se utiliza cada vez más a medida que se desarrollan continuamente técnicas de análisis de peligros y riesgos. Estos desarrollos también permiten refinar las "reglas" de un enfoque "basado en reglas", por lo que los dos enfoques son complementarios y, en la práctica, a menudo hay una combinación de los dos.

El enfoque basado en reglas es más simple que el basado en riesgos. Para la realización de los diferentes etapas del análisis y evaluación de riesgos anteriores (Etapas 1 a 4) se requiere solo una identificación gruesa o amplia de una situación peligrosa para confirmar que es una para la cual se encuentra definido un conjunto de reglas. La identificación de los peligros específicos que pueden surgir en la situación y las consideraciones necesarias para las Etapas 2 y 3 deben haber sido desarrolladas previamente en las reglas predeterminadas. La etapa 4 solo requiere que se seleccionen las reglas apropiadas para asegurar la prevención de eventos peligrosos y la mitigación de las posibles consecuencias.

Resulta evidente que el enfoque "basado en reglas" es bueno siempre que las "reglas" cubran completamente las situaciones a las que se aplican.

El enfoque "**basado en el riesgo**" requiere de un análisis más detallado para las Etapas 1 a 4 necesitando una revisión caso a caso. El enfoque basado en riesgos es un enfoque más flexible y proporciona un método que permite hacer frente a prácticamente cualquier situación.

Para la identificación de peligros en la Etapa 1 es habitual, por ejemplo, el uso de la lista de verificación u otras técnicas que se describen con detalle en el capítulo 2. También es importante revisar los incidentes que han ocurrido en procesos similares, tanto dentro de la empresa como en otros lugares, para que se tomen en cuenta las lecciones que se pueden aprender de dichos incidentes.

La etapa 2 normalmente necesita el uso de técnicas analíticas para cuantificar, en la medida adecuada, las consecuencias de los eventos peligrosos y, también a veces, su probabilidad. Una herramienta muy útil es el "análisis del árbol de eventos", la cual también será tratada en el capítulo 2.

La mayoría de las consideraciones para evaluar la probabilidad de los eventos serán como consecuencia de lo que se viene en denominar el "juicio de los expertos". El uso de la herramienta del "análisis de árbol de fallas" puede resultar útil para comprender la combinación de eventos y condiciones que pueden conducir a un evento peligroso.

Todas estas técnicas de análisis se discuten en detalle en el capítulo 2.

La etapa 3 en la que se realiza la evaluación del riesgo, es realizada también con el juicio de los expertos. Para ello será necesario disponer de la documentación y criterios necesarios para que la evaluación se pueda llevar a cabo de manera satisfactoria.

La comprensión de los peligros y de los riesgos que se genera al trabajar en las Etapas 1 a 3 permite llevar a cabo también una priorización de los riesgos, explorar las posibilidades de eliminación de dichos riesgos así como determinar las medidas de control que se implementarán en la Etapa 4. En la práctica, la Etapa 4 a menudo se realizará en paralelo con las Etapas 1 a 3.

A menudo puede haber opciones alternativas de control de riesgos que deben evaluarse en términos de eficacia, costo, viabilidad, etc. Al seleccionar las medidas de control, un enfoque típico es trabajar con algunas consideraciones que también serán tratadas a lo largo de este trabajo, por ejemplo aumentar la seguridad inherente de la instalación, implementar medios físicos o administrativos de control del riesgo o requerir formación o procedimientos operativos como medios de control el riesgo.

Para la cuantificación y evaluación del riesgo es habitual el uso de matrices de riesgo, las cuales se presentarán y aplicarán a lo largo de este trabajo.

2.2 Marco Normativo

Las primeras regulaciones relacionadas con la seguridad de las instalaciones industriales se realizan desde hace más de 150 años. El desarrollo de nuevos procesos de producción y el incremento de la capacidad de producción de las instalaciones industriales, principalmente la industria química y petroquímica, ha provocado una mayor severidad de los accidentes, aunque su número haya disminuido en los últimos años.

En general la regulación y el marco normativo que regula la seguridad de las instalaciones ha tenido a lo largo del tiempo un carácter claramente reactivo, no habiendo sido capaz de anticipar los accidentes, respondiendo con el endurecimiento de la normativa en función de la severidad de los mismos. Aunque es cierto que en los últimos años se ha producido una notable mejoría que hace que se pueda considerar algo más anticipativa, la respuesta de los sistemas de regulación sigue siendo menos anticipativa de lo que sería deseable.

A continuación, se proporciona el marco legislativo que es de aplicación para la seguridad de las instalaciones industriales. En términos de legislación siempre será necesario atender las regulaciones de cada país, aunque muchas de ellas refieren en su articulado a técnicas de identificación comúnmente aceptadas que serán descritas en los siguientes capítulos y que no se encuentran, en algunos casos, específicamente incorporadas en las leyes que son de obligado cumplimiento.

En los apartados que siguen, se trata de proporcionar una visión general de la legislación más relevante que afecta a la prevención de accidentes graves, así como al análisis de riesgos en instalaciones industriales. Como es de suponer, intentar proporcionar el marco legislativo completo es muy complejo ya que la legislación habitualmente se nutre además de las disposiciones legales y normativa, de directivas adicionales, de múltiples guías y transposiciones que complican en algún caso su identificación. De todos modos, en el caso europeo y concretamente para la legislación española, se ha intentado cubrir toda la legislación que debe ser tenida en cuenta para que la construcción y operación de las instalaciones industriales y por tanto de las plantas de generación eléctrica.

Por eso, se ha decidido diferenciar el marco legislativo que ese encuentra en vigor en Europa del resto del mundo, haciendo especial hincapié en el marco legislativo internacional a la regulación de los EEUU, ya que este marco se utiliza como referencia en muchos otros países.

Como se verá más adelante, en el caso de España, el número de documentos a considerar es significativo y, en muchos casos, de obligado cumplimiento en la práctica. Adicionalmente, hay que considerar toda la reglamentación específica existente en las diferentes comunidades autónomas.

Se ha incluido también un apartado que se refiere como otra normativa, donde se han incluido las regulaciones y normas habituales que son necesarias para llevar a cabo un diseño efectivo de la instalación.

2.2.1 Marco Legislativo en Europa.

2.2.1.1 Disposiciones y Directivas europeas

La siguiente legislación debe ser considerada a la hora de proceder con la prevención de accidentes graves en las instalaciones industriales:

- Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012 [3] [Directiva Seveso III], relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, y por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE [Directiva Seveso II].
- Decisión de la Comisión de 2 de diciembre de 2008, por la que se establece, conforme a lo dispuesto en la Directiva 96/82/CE del Consejo relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, el formulario de declaración de accidente grave [16].

De las directivas anteriores tiene especial relevancia la que se conoce como Seveso III.

El objetivo de la Directiva es establecer normas para la prevención de accidentes graves en que intervengan sustancias peligrosas, así como limitar sus consecuencias en la salud humana y el medio ambiente.

La Directiva, conocida como Seveso-III derogó la Directiva Seveso-II (Directiva 96/82/CE), la cual se publicó a partir de los análisis de los accidentes como los de Bhopal, Toulouse o Enschede, lo que modificó y derogó la Directiva Seveso original (Directiva 82/501/CEE) que fue publicada después del catastrófico accidente en la ciudad italiana de Seveso en 1976.

Con la directiva Seveso III se regulan los siguientes aspectos fundamentales:

- Se establecen “establecimientos de límite superior” y establecimientos de límite inferior” en función de las cantidades en las que se encuentren presentes las sustancias peligrosas, las cuales se listan detalladamente en el Anexo 1 de la Directiva.
- Se establece la obligatoriedad del “industrial” (persona física o jurídica que explota o controla un establecimiento o instalación) de redactar un documento por escrito en el que se defina su política de prevención de accidentes graves y el aseguramiento de su correcta aplicación. La política de prevención de accidentes graves se aplicará mediante medios y estructuras adecuados y mediante un sistema de gestión de la seguridad.
- Los industriales de los establecimientos de nivel superior estén obligados a presentar un informe de seguridad que incorpore, entre otras medidas, las siguientes:
 - a) la política de prevención de accidentes graves y un sistema de gestión de la seguridad para su aplicación de conformidad con los elementos que figuran en el anexo III;
 - b) La identificación de los peligros de accidente grave y los posibles escenarios de accidente grave y que se han tomado las medidas necesarias para prevenirlos y limitar sus consecuencias para la salud humana y el medio ambiente
 - c) Se demostrará que el diseño, la construcción, la explotación y el mantenimiento de toda instalación, zona de almacenamiento, equipos e infraestructura ligados a su funcionamiento y que estén relacionados con el peligro de accidente grave en el establecimiento se han tenido en cuenta una seguridad y fiabilidad suficientes

- d) demostrar que se han elaborado planes de emergencia interiores y proporcionar información que permita elaborar el plan de emergencia exterior;
- Además, el industrial deberá elaborar un plan de emergencia interior respecto de las medidas que deben tomarse dentro del establecimiento y proporcionar datos a las autoridades para la elaboración de un plan de emergencia exterior.
- Se atiende a la planificación del suelo y se reforzaron los derechos del público en general, de tal manera que se facilita el acceso a la información sobre los riesgos que podrían producirse en las instalaciones industriales situadas en las inmediaciones y sobre cómo reaccionar en caso de accidente.

Conviene destacar lo indicado en el Anexo II de la Directiva 2012/18/UE relativo a los Datos e información mínima que debe tenerse en cuenta en el informe de seguridad mencionado en el artículo 10, ya que en el apartado 4 de dicho anexo, referido a la identificación y análisis de los riesgos de accidente y métodos de prevención no se indica de manera específica cuales métodos son de obligado cumplimiento o cuales serían recomendables. Es decir, la legislación europea no especifica los métodos de análisis y prevención que deben ser utilizados por el industrial en la elaboración del informe de seguridad.

En [17] se proporciona una comparativa muy detallada de la Directiva conocida como Seveso II y Seveso III. Esencialmente los requisitos fundamentales de Seveso II se mantienen, sobre todo en lo referente al Estudio de Seguridad que es requerido al industrial del establecimiento.

Aunque en la Directiva 2012/18/UE no se requiere ni se cita expresamente el análisis de riesgos según lo visto en el capítulo 2.1.3., en el articulado de la Directiva si se requiere en reiteradas ocasiones, por ejemplo “Apartado b) *Demostrar que se han identificado y evaluado los riesgos de accidentes graves...*”, lo que conduce si se pretende realizar una correcta identificación y evaluación de los riesgos a llevar a cabo un proceso similar al indicado en el mencionado capítulo 2.1.3. Las Guías Técnicas de Protección Civil de España relacionadas en el capítulo siguiente, establecen los requisitos para llevar a cabo dicho análisis de riesgos.

En el Grupo de Trabajo Técnico nº 4 que se desarrolló a partir de la Directiva Seveso II, también se establece la necesidad de llevar a cabo un proceso de identificación y evaluación de riesgos sin especificar como. Sin embargo la bibliografía que se referencia utiliza gran parte de las que se describen en detalle en el capítulo 2.3[18].

2.2.1.2 Disposiciones y Reales Decretos España

La normativa europea descrita antes conocida como Seveso III tiene su transposición nacional en el real decreto:

- Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. Legislación relacionada con riesgo químico y accidentes graves [2].
- Decisión de la Comisión de 2 de diciembre de 2008, por la que se establece, conforme a lo dispuesto en la Directiva 96/82/CE del Consejo relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, el formulario de declaración de accidente grave [16].

Otras disposiciones legales que pueden resultar de interés son las siguientes:

- Orden PRE/1206/2014, de 9 de julio, por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas[19] [fuelóleos].
- Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas [20].
- Real Decreto 1070/2012, de 13 de julio, por el que se aprueba el Plan estatal de protección civil ante el riesgo químico [21]. Reglamentos sobre etiquetado y registro de sustancias peligrosas (Necesarios para identificar los peligros asociados a las sustancias nominadas y asignar las categorías de sustancias peligrosas a las sustancias no nominadas).
- Normas UNE de la serie 192001, sobre Accidentes Graves UNE 192001:2011. Procedimientos de inspección en establecimientos afectados por la reglamentación de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas[22].
- Guías técnicas nacionales. Se incorporan únicamente las referencias de aquellas que resultan de interés para el objeto de este trabajo
 - Guía técnica Análisis del riesgo en los establecimientos afectados de nivel inferior [14]
 - Guía técnica Casos prácticos de Análisis del riesgo[23]
 - Guía Técnica metodologías para el análisis de riesgos: Visión general [24].
 - Guía Técnica metodologías para el análisis de riesgos: Métodos cualitativos[25]
 - Guía Técnica metodologías para el análisis de riesgos: Métodos cuantitativos[26]
 - Guía para la comunicación de riesgos industriales, químicos y planes de emergencia
 - Guía técnica Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico
 - Guías técnicas Comisión Europea [27]
 - Metodología para el Análisis de Riesgos Ambientales
 - Guía técnica Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico
 - Guía para la realización de inspecciones técnicas administrativas
 - Guía técnica Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico
 - Guía para la realización del análisis del riesgo medioambiental

Publicaciones del Joint Research Center (European Commission)[28]

De interés se pueden citar las siguientes:

- Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks [29]
- Risk Management Practice in the Process Industries del European Process Safety Centre [15]
- A guide to the equipment, methods and procedures for the prevention of risks... Part I [30]

Aplicación directa de la normativa Seveso III es la publicación en las páginas de las comunidades autónomas de España, Sirva como ejemplo la correspondiente al gobierno de Canarias donde se informa de los establecimientos localizados en Canarias y afectados por el Real Decreto 840/2015, entre las que se incluyen las centrales térmicas que actualmente se encuentran en operación en las islas[31].

Conviene destacar las Guías Técnicas de Protección Civil relativas a las metodologías para el análisis de riesgos, visión general, métodos cualitativos y la que se refiere a los métodos de análisis

cuantitativos ya que precisamente se editan para ayudar a los usuarios en el uso de las distintas metodologías reconocidas internacionalmente para la evaluación y análisis de peligros y riesgos.

Las guías se editaron a raíz de la publicación del Real Decreto 886/1988 de 15 de Julio donde se requiere la elaboración de un Estudio de Seguridad donde la Autoridad Competente puede requerir adicionalmente al estudio un Análisis de Seguridad Cuantitativo. Las Guías se editaron con carácter recomendatorio, no siendo de obligado cumplimiento y siguen estando vigentes dada la generalización en las metodologías propuestas.

Desde la aplicación de las primeras directivas 1254/1999 y sus modificaciones hasta Seveso III en todas se incluyen la referencia al establecimiento (ver ejemplo la de los cuadernos de protección civil editados en Cuadernos de Legislación de Protección Civil. Riesgos Químicos y Medioambientales). La identificación y evaluación de riesgos se considera en todas las etapas de funcionamiento del establecimiento, desde su proyecto hasta su retirada de servicio, incluyendo los peligros potenciales que se producen o identifican en aquéllas, las condiciones de operación de los procesos (operaciones rutinarias o no rutinarias, en especial las puestas en marcha, el mantenimiento y las paradas), incidentes y posibles emergencias, fallos del sistema de gestión de seguridad, riesgos.

2.2.1.3 Otra legislación España. Seguridad y Salud

Debe atenderse a la seguridad y salud laboral de los trabajadores en el ámbito de la seguridad industrial. A continuación, se relaciona la legislación básica y específica que debe ser considerada:

- Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre [2]
- Real Decreto 1196/2003 (Directriz Básica) [20]
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales [32]
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención [33]
- Orden TIN/2504/2010, de 20 de septiembre, por la que se desarrolla el Real Decreto 39/1997, de 17 de enero [34]
- Guía Técnica Señalización de Seguridad y Salud en el Trabajo [35]
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre por el que se aprueba el reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales [36]
- RD 393/2007 Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia [37]
- Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo [38]

Otra regulación específica debe ser considerada en función del proyecto que se esté considerando y de los procesos que se analicen. Por ejemplo, la regulación en términos de protección del medioambiente para la prevención de accidentes graves es muy relevante.

2.2.2 Marco Legislativo Internacional.

2.2.2.1 Regulación en EEUU. OSHA CFR 1910.119. El Análisis de peligros de procesos (PHA)

La ejecución de proyectos internacionales considera como bases de diseño determinadas regulaciones similares a la normativa europea Seveso discutida antes.

Normativa básica EEUU:

- OSHA 1910.119 -Process safety management of highly hazardous chemicals [39]
- OSHA 3132 Process Safety Management [40]
- OSHA 3133, Process Safety Management - Guidelines for Compliance [41]

OSHA 1910.119 claramente establece en el párrafo (e):

“1910.119(e)

Process hazard analysis.

1910.119(e)(1)

The employer shall perform an initial process hazard analysis (hazard evaluation) on processes covered by this standard. The process hazard analysis shall be appropriate to the complexity of the process and shall identify, evaluate, and control the hazards involved in the process.”

En OSHA 3132 se requiere específicamente:

“The employer must use one or more of the following methods, as appropriate, to determine and evaluate the hazards of the process being analyzed: • What-if, • Checklist, • What-if/checklist, • Hazard and operability study (HAZOP), • Failure mode and effects analysis (FMEA), • Fault tree analysis, or • An appropriate equivalent methodology”.

Se requiere claramente la realización de un análisis de riesgos que incluya la identificación de peligros utilizando alguna de las técnicas que se describen en el capítulo 2.3. y que se citan a continuación como estándares reconocidos internacionalmente. Es conocido como PHA Process Hazard Analysis. El PHA debe ser desarrollado por un equipo de especialistas expertos en ingeniería y en procesos así como personal que operará la planta, preferentemente. El PHA se describe y discute en detalle en el capítulo 2.3.

Centre for Chemical Process Safety CCPS:

Dispone de múltiples publicaciones relacionadas con la seguridad del proceso. Es un centro de referencia a nivel mundial para las metodologías de identificación y cuantificación de riesgos. En el capítulo 2.3 se discutirán en detalle las más relevantes que servirán para el desarrollo de la presente tesis. A continuación se citan algunas cuya relevancia es indiscutible en el mundo académico e industrial:

- Guidelines for Risk based process safety [42]
- Guidelines for Hazard Evaluation Procedures [43]
- Guidelines for integrating process safety into Engineering Projects [44]

- Layer of Protection Analysis SIMPLIFIED PROCESS RISK ASSESSMENT [45]
- checklist and examples of CCPS Engineering projects [46]
- Guidelines for Performing Effective Pre-Start up Safety Reviews [47]

API American Petroleum Institute

- API Recommended Practice 1173 Pipeline Safety Management System Requirements 2014 [48]
- API-RP-750-Management-of-Process-Hazards [49]

2.2.2.2 Otra normativa y estándares

A continuación se proporciona un listado de normas y estándares que son de obligada referencia, algunos de los cuales serán o ya han sido citados a lo largo de la presente tesis:

International Organization for Standardization ISO

- ISO 45001, ‘Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. ISO 45001:2018’, Secretaría Central del ISO en Ginebra, Suiza, 2018 [50]
- ISO 150008, UNE ISO 150008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental. España, 2008 [51]
- IEC/ISO 31000, UNE-ISO 31000 Gestión del riesgo. Directrices. España: AENOR, 2018 [1]

International Electrotechnical Commission IEC:

- IEC 61511 Safety Instrumented Systems for the Process Industry [52]
- IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/ programmable electronic safety-related systems [53]

Otras normas internacionales:

- AIChE: American Institute of Chemical Engineers.
- ASTM International: American Society for Testing and Materials.
- ASME: American Society of Mechanical Engineers.
- NFPA: National Fire Protection Association.
- US-EPA: Environmental Protection Agency

Otras referencias del CCPS que son de interés:

- Guidelines for initiating events and independent protection layers in Layer Protection Analysis [54]
- Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers [55]

2.3 Métodos de Identificación de peligros y Análisis de riesgos

En la introducción de este capítulo se mencionó que existen diferentes enfoques para la gestión del riesgo de las organizaciones. Se pueden referenciar los esquemas propuestos por OSHA [40], por CCPS [42], el propuesto en API 1173 [48], o el de American Chemistry Council (ACC) Responsible Care [56] el cual dispone de 18 elementos básicos para llevar a cabo la gestión completa.

Aquellas compañías cuya producción dependa en una u otra medida de los procesos fisicoquímicos en el que se basa su capacidad productiva, el aumento en la seguridad de los procesos produce una reducción directa de los accidentes graves. Sea cual sea el sistema de gestión del riesgo elegido por la organización, la seguridad de los procesos forma parte nuclear de la reducción del riesgo.

La seguridad de los procesos está íntimamente relacionada con los métodos de análisis de riesgos y de identificación de peligros. En términos generales, las técnicas de evaluación de peligros son incorporadas en las organizaciones como parte del programa de seguridad y pueden ser utilizadas no solo como herramienta para el análisis del diseño y operación de la instalación, sino además para las investigaciones de las causas de un incidente, como parte del programa de actualización de una planta o parte de ella y también como herramienta de identificación de peligros en operaciones de mantenimiento, pruebas o gestión de algún equipo crítico de la instalación.

Esta ampliamente aceptado que los estudios de identificación y evaluación de peligros deben formar parte del ciclo de vida de la planta, o si se quiere mejor, del ciclo de vida del proyecto. Así, es habitual que se realicen en los estudios previos de instalación, en las diferentes etapas de diseño y de ingeniería, durante la construcción y la puesta en servicio, así como en las etapas de operación y mantenimiento. También es habitual que se realicen en la fase de finalización del ciclo operativo de la planta, en lo que se ha venido en denominar etapa de desmantelamiento. En los últimos años esta etapa final está siendo objeto de numerosos estudios como consecuencia del desmantelamiento de instalaciones y plantas de generación eléctrica con tecnología nuclear, en [28] se pueden encontrar múltiples referencias sobre el tema.

Dada su relevancia durante más de cuatro décadas aportando conocimiento en la seguridad de los procesos químicos, en lo que sigue en este capítulo se tomará como referencia básica el enfoque dado por el Instituto Estadounidense de Ingenieros Químicos IChemE, a través del Centro para la Seguridad de Procesos Químicos (CCPS), establecido en 1985 y que cuenta con el apoyo de casi 100 empresas patrocinadoras de la industria química e industrias afines. CCPS ha procedido con la edición de las Directrices y guías para la evaluación de peligros de proceso en tres ocasiones, en 1985, 1992 y en 2007. Precisamente el enfoque del 2007 con la publicación de “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures” [43] es el que servirá de guía para el desarrollo del presente capítulo. Adicionalmente se tendrán en consideración los aportes de “A guide for Hazard identification Methods” de F. Crawley del año 2020 publicado por Elsevier [57], también del instituto IChemE. Existen algunas publicaciones que son consideradas de referencia en este campo que también han sido tenidas en cuenta, sobre todo en algunos capítulos muy específicos como el análisis por la técnica del HAZOP [58] (Kletz HAZOP y Hazan), o algunos trabajos de referencia

en el campo de la seguridad de los procesos como puede ser [59], trabajo enciclopédico que recoge en tres volúmenes múltiples aspectos de los que aquí se tratarán. Otras referencias generales que también se pueden incluir aquí son los trabajos de [5], [7] que ya han sido citados previamente o la muy citada obra de Crowl en la bibliografía [60].

Aunque en las principales referencias que tratan estos asuntos y serán tomadas como base [43] y [57] (ref. del CCPS) no establecen distinciones entre métodos cuantitativos, cualitativos o híbridos, se ha considerado más intuitivo seguir la clasificación que proporcionan algunos autores [61] y las Guías Técnicas de protección Civil de España [25], [26] o [23], que si atienden a esta clasificación.

Un estudio que incorpora múltiples referencias en el campo del análisis de riesgos es [62] donde también se utiliza una clasificación similar a la que aquí se usa y proporciona una recopilación exhaustiva de los principales trabajos que se han publicado en este campo hasta el año 2009, algunos de los cuales serán también referenciados aquí.

2.3.1 Métodos de identificación de peligros

No es posible controlar aquello que no se conoce o que no ha sido previamente identificado como peligro. Para poder abordar la identificación de los peligros de una instalación o de un proceso determinado, conviene que previamente se haya identificado aquellas sustancias y productos, sistemas y procesos de la planta que pueden provocarlos. Habitualmente los elementos que pueden producir consecuencias no deseadas se clasifican en aquellos que producen impactos en las personas, en los equipos o en el medioambiente. Atendiendo a esta clasificación general, luego se pasa a identificar y clasificar los peligros asociados con cada una.

Entre los métodos de identificación de peligros se encuentran:

- Análisis de las propiedades de los materiales y de las condiciones de proceso.
- Lecciones aprendidas y experiencias anteriores
- Uso de matrices de interacción.

Una vez que se ha llevado a cabo la identificación, el resultado de este proceso normalmente es una lista de materiales o condiciones que pueden resultar peligrosas. A partir de estas listas iniciales es desde donde se comienzan los análisis de peligros de acuerdo con alguna de las técnicas que se describirán en los capítulos que siguen.

Puede ocurrir que para realizar correctamente la identificación se necesite recurrir a alguna de las técnicas de análisis algunas de las cuales se basan en la técnica de lluvia de ideas (brainstorming) la cual es muy útil para la identificación de peligros combinada con otras como la técnica de la lista de comprobación.

También es muy habitual que en esta fase inicial de identificación de peligros, se incorpore una evaluación de consecuencias para el peor caso (*worst case*), de tal manera que desde esta fase se tengan en cuenta las consecuencias más significativas que se puedan producir si no se controla el peligro ya identificado. También es conveniente hacer esto para poder establecer el mejor método de análisis o como una ayuda al propio proceso de identificación. Por ejemplo, si se ha identificado

como peligro la fuga del contenido en un tanque de fuel-oíl que es usado como combustible de una caldera, cuál sería la consecuencia para el peor caso si esta fuga no se detecta y el tanque se vacía completamente. Probablemente en este caso, cuando se incorporen las salvaguardas del peligro, se considere una contención que sea capaz de contener el volumen completo del tanque.

Para evaluar las consecuencias del worst-case es muy probable que sea necesario recurrir al establecimiento de escenarios de trabajo y métodos de cálculo muy específicos con técnicas cuantitativas complejas, como puede ser el índice de fuego y explosiones de Dow para casos similares al mencionado en el ejemplo anterior.

Otro de los aspectos que están sufriendo una evolución significativa en los últimos años es el que se refiere a la *seguridad inherente* de los procesos. La seguridad inherente está relacionada con la filosofía de la “química verde”, que consiste en identificar los productos peligrosos desde la fase de diseño de los propios productos o reacciones, de tal modo que se reduzca o elimine el uso y generación de sustancias peligrosas. Referirse a la Nota Técnica de Prevención (NTP 1066) del INSS de España [63]. La Real Academia Española de la Lengua define inherente como aquello “que por su naturaleza está de tal manera unido a algo que no se puede separar de ello”. Un proceso químico es inherentemente más seguro si elimina o reduce riesgos y esta circunstancia es parte inseparable de la tecnología del proceso.

La seguridad inherente abarca los conceptos de reducir o eliminar los peligros en el procesamiento químico. Identificar y discutir oportunidades para hacer que una instalación sea inherentemente más segura se ha convertido en una parte integral de las evaluaciones de peligros. En [64] se proporciona una aproximación detallada.

La seguridad inherente es una de las estrategias que se pueden utilizar para reducir el riesgo de un incidente. En lugar de aplicar controles y salvaguardias, la seguridad inherente implica fundamentalmente la eliminación o reducción del peligro químico o físico que se encuentra subyacente. Los principios de seguridad inherentes también se pueden utilizar para hacer que las salvaguardas sean más robustas y confiables, aunque sin reducir o eliminar el peligro.

En [43] se incorporan algunos conceptos relativos a la seguridad inherente que conviene destacar. Los peligros de los procesos químicos provienen de dos fuentes:

- Peligros que son característicos del material y la química utilizados (por ejemplo, inflamabilidad, toxicidad, reactividad)
- Peligros que son característicos de las variables del proceso: la forma en que funciona la química en el proceso (por ejemplo, presión, temperatura, concentración).

Finalmente, se pueden establecer cuatro estrategias o enfoques diferentes para reducir el riesgo del proceso:

- Inherente: elimina el peligro mediante el uso de materiales y condiciones de proceso no peligrosos (por ejemplo, sustituyendo el agua por un líquido inflamable como disolvente).
- Pasivo: reduce el riesgo mediante la incorporación en el diseño de procesos y equipos que reducen la frecuencia o la gravedad sin necesidad de incorporar otro dispositivo adicional (por

ejemplo, uso de recipientes a presión; utilización de sistemas de drenaje y contención adecuados o incorporación de equipos a prueba de explosiones).

- Activo: Utilizar controles para responder a situaciones excepcionales, como pueden ser el uso de Sistemas Instrumentados de Seguridad, dispositivos de alivio como válvulas de seguridad, de exceso de flujo, etc.
- Procedimental: Mediante el uso de procedimientos operativos, controles administrativos, planes de respuesta de emergencia, etc., de modo que se prevengan y minimicen los efectos del incidente.

Las cuatro estrategias se utilizan para gestionar el riesgo de una instalación de proceso, pero la estrategia inherente se considera más fiable que los otros tres enfoques. No en todas las instalaciones es posible aplicarla ya que en algunas los procesos son muy conocidos y difíciles de mejorar.

2.3.2 Métodos Cualitativos.

Se entiende por métodos cualitativos de análisis de peligros, a las metodologías que basan sus análisis en valoraciones cualitativas, es decir que no establecen un valor numérico del fenómeno analizado. Existen algunos métodos o técnicas que pueden ser utilizadas como modo cualitativo o como metodologías híbridas o semicuantitativas al disponer de la capacidad de incorporar algunos índices o medidas relativas en su método.

Entre los métodos o técnicas de análisis cualitativas se encuentran las siguientes:

- Análisis histórico de accidentes.
- Auditorias de seguridad.
- Análisis preliminar de riesgos (Preliminary Hazard Analysis).
- Listas de Comprobación (Check List).
- Análisis que pasa si (What-if).
- Análisis que pasa si estructurado o SWIFT (Structured What If Technique).
- Análisis funcional de operatividad (HAZOP)
- Análisis del modo y efecto de los fallos (FMEA)
- Análisis del modo, efectos y criticidad de los fallos (FMEAC). Este método será tratado en métodos semicualitativos, pero se menciona aquí por poderse usar en ambos ámbitos.

Los métodos cualitativos se clasifican en función de las técnicas usadas en el análisis. Así, se distingue entre técnicas de análisis basadas en escenarios y técnicas de análisis no basadas en escenarios. La diferencia entre una u otra técnica reside en la metodología utilizada por cada una. Los métodos no basados en escenarios basan el análisis en enfoques generales que utilizan principalmente la experiencia para la evaluación de los peligros, mientras que los que se basan en escenarios utilizan métodos que tienen como denominador común el uso del *escenario del incidente*.

El concepto de escenario del incidente implica algunas consideraciones [43]:

- Se define *incidente* como un evento o suceso no planificado (o una secuencia de eventos), que tiene el potencial de provocar resultados no deseados o impactos adversos. Una secuencia de incidentes es una serie de eventos o sucesos que pueden convertir la amenaza de un peligro en una situación real.
- El primer suceso de una secuencia de incidentes se denomina *causa inicial*, también denominado evento inicial. Los tipos de eventos que pueden ser la causa inicial de una secuencia de incidente son generalmente fallos en los equipos, software mal configurado, errores humanos y sucesos externos.
- La causa inicial puede entenderse desde la perspectiva de la operación. Así, en condiciones normales de operación, los peligros están controlados (o confinados), y la instalación opera dentro de los límites establecidos y de acuerdo con los procedimientos de operación previstos.
- Para mantener la instalación dentro de las condiciones normales de operación, existen una serie de sistemas clave:
 - Hardware del proceso. Esto es el uso de tuberías y recipientes que contienen las sustancias peligrosas.
 - El sistema de control, el cual considera la instrumentación de proceso, los controladores electrónicos y los elementos finales de control, como son las válvulas y los actuadores.
 - El equipo mecánico, como son las bombas, los intercambiadores, etc.
 - Los procedimientos e instrucciones de operación.
- Una causa inicial provocará un cambio desde el modo de operación normal a un modo de operación *anormal*, tan pronto como la operación se aparta de sus procedimientos operativos establecidos o condiciones normales de operación. En el contexto de la evaluación de riesgos o peligros, este modo anormal se denomina *desviación*
- Si la desviación permanece fuera de control y no se toman las acciones correctoras, el modo de funcionamiento pasa de una situación anormal, que puede corregirse y volver a estar bajo control, a una situación de *emergencia*.
- En la morfología de un incidente, el comienzo de una situación de emergencia se denomina *evento o suceso de pérdida* (Figura 2-5), ya que es probable que se produzca una pérdida de una cierta magnitud una vez que ha ocurrido el evento de pérdida. El evento de pérdida es el momento en una secuencia de incidente cuando ocurre un evento físico irreversible que tiene el potencial de impactos de pérdida y daño.

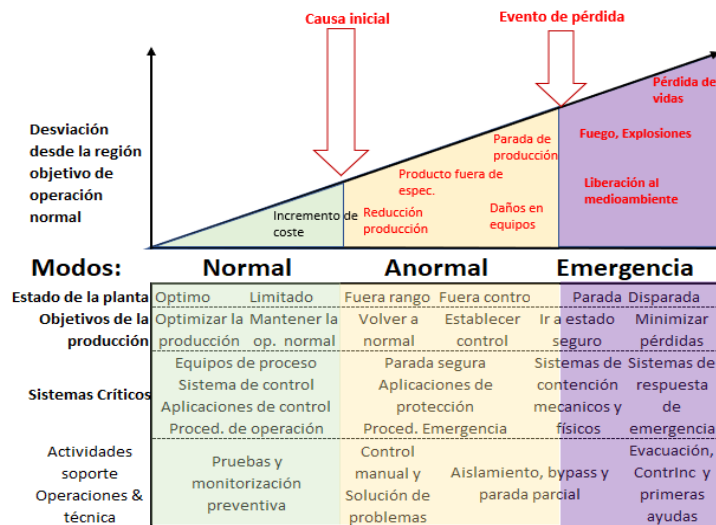


Figura 2-5.- Causa inicial y el evento de pérdida en el escenario de un incidente [65].

- La gravedad de las consecuencias del evento de pérdida se denomina *impacto*. El impacto es una medida de la pérdida y el daño finales de un evento de pérdida. Puede expresarse en términos de número de lesiones y / o muertes, alcance del daño ambiental, etc.
- La descripción completa de una posible secuencia de incidente es un *escenario*. Un escenario es un evento no planificado o una secuencia de incidentes que resulta en un evento de pérdida y sus impactos asociados, incluido el éxito o el fracaso de las salvaguardas involucradas en la secuencia del incidente.
- En el contexto de la identificación de peligros y evaluación de riesgos, cualquier dispositivo, sistema o acción que pueda interrumpir la cadena de eventos que siguen a una causa inicial se conoce como *salvaguardia*

En [66] se proporciona información complementaria a la que aquí se ha incluido para el escenario del incidente, causas y salvaguardias.

Por lo tanto, cada escenario comienza con una causa inicial y termina con uno o más resultados de incidentes. Los resultados pueden evaluarse utilizando metodologías de análisis de las consecuencias, para determinar los impactos del evento de pérdida.

A continuación se proporciona para cada metodología de análisis de peligros una pequeña descripción del método así como sus fortalezas y debilidades frente a otros. En algunos casos se proporciona una estimación de los recursos que se consideran necesarios para llevarlo a cabo, sobre todo cuando se requiera un equipo que lleve a cabo el análisis.

2.3.2.1 Métodos de Identificación y Análisis de Riesgos no basados en escenarios

Se consideran los siguientes:

- Análisis preliminar de peligros (Preliminary Hazard Analysis-PreHA-). No confundir con PHA
- Revisión de seguridad (Safety Review)
- Método de la clasificación relativa (Relative Ranking)
- Listas de Verificación (Check List)

2.3.2.1.1 Análisis Preliminar de Peligros (PreHA)

El PreHA se aplica generalmente durante el diseño conceptual de la planta y es muy útil para la toma de decisiones en relación con la implantación y la selección del sitio para su instalación. También se puede usar como una herramienta de revisión de diseño en la fase temprana de ingeniería para la definición de los sistemas y áreas de proceso que componen la instalación.

El PreHA se lleva a cabo a través de la formulación de una lista de peligros y situaciones peligrosas genéricas considerando determinadas características del proceso analizado. A medida que se identifica cada situación peligrosa, se enumeran las posibles causas, efectos y posibles medidas correctivas y / o preventivas para reducir cada uno de ellos. Es habitual asignar en el PreHA una clasificación de la criticidad de cada peligro que ha sido identificado de modo que se prioricen las recomendaciones de seguridad.

El producto del PreHA normalmente es una lista de los peligros que han sido identificados, las causas, los efectos identificados, así como una clasificación de la criticidad de cada uno incluyendo las acciones correctoras propuestas.

El PreHA se realiza habitualmente por uno o más especialistas que procederán con la evaluación utilizando la documentación básica del proyecto. Normalmente esta documentación incluye los criterios de diseño, las especificaciones de los equipos principales, especificaciones de materiales, así como otras fuentes de información disponible, que en la etapa inicial del proyecto suele ser escasa. Durante la revisión, los especialistas identifican aquellas fuentes, sustancias peligrosas que pueden dar lugar a un incidente o consecuencias no deseadas, proponiendo modificaciones al diseño que eliminen o reduzcan los peligros.

Los resultados de un PreHA se documentan en una tabla que en cada columna muestra: (1) los peligros identificados, (2) las causas, (3) las posibles consecuencias, (4) la categorización o clasificación del peligro y (5) las medidas correctivas o preventivas propuestas como solución.

2.3.2.1.2 Revisión de seguridad (Safety Review)

La revisión de seguridad SR se puede encontrar también denominada Revisión de diseño (Design Review) o como Revisión de la Prevención de Pérdidas (Loss Prevention Review) y se puede utilizar en cualquier etapa de la vida del proyecto.

Las Revisiones de Seguridad SR se suelen utilizar para verificar que la planta y los procedimientos de operación y mantenimiento cumplen con los criterios de diseño y los estándares de construcción. La experiencia del equipo que realiza la revisión de seguridad, equipo de revisión, es un factor muy importante para conseguir resultados adecuados. La revisión se suele realizar por un equipo de especialistas en seguridad de procesos mediante entrevistas y reuniones con los ingenieros y personal que participa en el proyecto. La cooperación de todas las partes es fundamental para el éxito de la revisión.

Para una revisión completa, el equipo de revisión debe disponer de los códigos y estándares aplicables, los estudios de seguridad previos, descripciones detalladas de la planta, P&ID y diagramas de flujo, así como los procedimientos de operación, procedimientos y protocolos de puesta en marcha, parada, operación normal, operación en mantenimiento así como en situaciones de emergencias y transitorios. También es conveniente disponer de los registros de pruebas de válvulas de alivio de presión e inspecciones de recipientes a presión. Los especialistas que conforman el equipo de revisión debe estar muy familiarizado con los estándares y procedimientos de seguridad, así como disponer de experiencia para evaluar tanto la instrumentación como los sistemas eléctricos y los sistemas y equipos mecánicos.

El resultado de la revisión de seguridad es un informe que contiene las acciones recomendadas. El informe normalmente contiene las hipótesis de trabajo y la justificación de las recomendaciones, incluyendo un resumen las impresiones del equipo de revisión sobre la instalación o el sistema analizado. Es habitual también, incluir una lista de acciones con asignación de responsabilidad de modo que se pueda llevar a cabo un seguimiento adecuado de las mismas.

2.3.2.1.3 Método de la clasificación relativa (*Relative Ranking*)

La clasificación relativa es un método de análisis que proporciona una clasificación numérica de los principales peligros asociados con cada sección de una planta o de un proceso. La clasificación obtenida puede utilizarse para identificar áreas de riesgo o para seleccionar determinadas áreas o secciones de la planta que requieren un análisis de riesgos adicional. Los peligros identificados con esta técnica normalmente incluyen incendios, explosiones, emisiones de sustancias tóxicas y, en algunos casos, emisiones de materiales peligrosos para el medio ambiente.

La filosofía que subyace detrás de los enfoques de clasificación relativa tiene relación con proporcionar una respuesta a las 3 preguntas básicas de todo análisis de riesgos para determinar una clasificación relativa de los procesos y de las actividades desde el punto de vista de la seguridad antes de realizar estudios de análisis de riesgos o evaluaciones de peligros más detallados que pueden ser más costosas o cuyos resultados proporcionan un marco más adecuado para realizar estos últimos acotando su alcance.

Los métodos de clasificación relativa se basan en la utilización de índices. Un índice es un valor numérico que mide una característica objeto de estudio y valoración. Normalmente el índice se establece en base a la estimación de unos parámetros determinados que pueden describir la instalación. Los parámetros pueden ser cualitativos, semicualitativos (obtenidos de una escala de valores predefinidos) o cuantitativos (obtenidos en base a propiedades fisicoquímicas de los materiales o productos).

La técnica de clasificación relativa o asignación de peligros en base a índices de riesgo es una técnica muy utilizada por su simplicidad y por su bajo coste. El método suele usarse por un equipo de uno o dos especialistas. Se recomienda que los resultados se revisen por un especialista independiente, con lo que el equipo sería reducido a no más de 3 personas. Además, para realizar la revisión no se requiere una gran cantidad de documentación, suele ser suficiente con disponer al menos de un plano de layout, con las disposiciones generales de los edificios y áreas de la planta, el diagrama de bloques los datos generales de diseño y operación y listas de materiales y fichas de datos de seguridad.

Los índices de riesgo utilizados para la clasificación relativa se establecen en función del método en el que se basan. Así, se distinguen:

- Índices basados en la definición matemática del riesgo. Aquí se incluyen los índices que se calculan a partir de la definición de riesgo dada en 2.1:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Magnitud}$$

Se pueden incluir aquí métodos como el método **FINE**, [67], el método **SEPTRI** [68] o el método **HRN** (Hazard Rating Number) publicado por SHP.

- Índices basados en la carga de fuego. Estos índices son generales. No se tiene en consideración la actividad de la instalación objeto de estudio, da igual que sean instalaciones industriales o edificaciones residenciales o comerciales. Aquí se encuentran incluidos los índices **MESERI** [69], método **Gretnener**, índice de Purt [70] o el cálculo de la carga de fuego ponderada. Se

han mencionado índices que se utiliza en España. En otros países existen legislaciones similares como NFPA [71] en USA, o los estándares BS en UK.

- Índices basados en las propiedades de las sustancias. Son los que se utilizan habitualmente en las instalaciones que de una u otra manera utilizan productos químicos en sus instalaciones. Así tenemos, los índices de incendios y explosiones de DoW [72], índice de Mond [73], índice SHI (Substance Hazard Index), Material Hazard Index (MHI) [74] o Chemical Exposure Index (CEI) [75].

El método de clasificación más utilizado para incendios y explosiones es el índice de incendios y explosiones de Dow (FEI), aumentado por el índice de exposición química también de la compañía Dow (CEI) para las emisiones de sustancias tóxicas en el aire.

El resultado del método de FEI es un índice en base al cual se obtiene una categorización de la peligrosidad y por tanto de la necesidad, o no, de llevar a cabo un estudio de análisis de peligros más o menos detallado. Por ejemplo, en la propia compañía DoW si el resultado del análisis PHA da un valor de para el índice de 128 o superior, esto significa que será necesario realizar un Análisis de Capa de Protección (LOPA). Si la planta se diseña con una tecnología nueva o que no se ha usado nunca, se requiere siempre la realización de un estudio HAZOP.

Todos los métodos de clasificación relativa dan como resultado una lista ordenada de acuerdo con el criterio de clasificación de los procesos, equipos, operaciones y/o actividades. La lista puede tener varias capas que representan distintos niveles de importancia. Según el método utilizado para la clasificación se pueden obtener otros resultados, como índices, puntuaciones, escalas de factores, gráficos, etc.,

Como principales ventajas de este método respecto de otras técnicas se puede destacar que es un método relativamente simple con necesidad de pocos recursos y necesidad de poca información para realizar el estudio. Además se puede aplicar en una etapa inicial del proyecto, proporciona una visión de las principales áreas con peligro potencial y es adaptable a las necesidades de cada compañía.

Como principales desventajas se puede decir que estos métodos se limitan a los peligros de incendio, explosión y exposición química, normalmente se necesita la asistencia de un experto, no profundiza en el diseño de la planta y tiene muy poco en cuenta el factor humano, por lo que suele ser necesario completarlos con otros estudios y análisis de riesgos.

2.3.2.1.4 Listas de Verificación (Check List)

Una lista de verificación es una lista, normalmente basada en las experiencias y proyectos anteriores, que se va recopilando por distintos especialistas de la compañía a lo largo del tiempo hasta que se encuentra lo suficientemente completa para su utilización en la identificación de peligros. Las listas de verificación incluyen desde medidas de protección o pasos de procedimiento hasta propiedades de los materiales y "buenas prácticas" para la aplicación objeto de análisis. Las listas de verificación se utilizan para verificar tanto el diseño como operaciones determinadas o estados del sistema. También se pueden usar para otros aspectos tales como la verificación del cumplimiento de códigos, estándares o de otros requisitos específicos del diseño. Las listas de

verificación pueden usarse solas o conjuntamente con otros métodos de análisis tales como el método Que pasa sí, tal como se verá más adelante.

Por otra parte, las listas de verificación pueden usarse a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto desde su aplicación para estudios de viabilidad hasta el comisionado y puesta en operación de la planta, incluso en la etapa de desmantelamiento de la instalación. También es muy habitual que otros métodos de análisis recurran en algún momento al uso de listas de verificación ya sea en su aplicación para la propia identificación de peligros o en la evaluación de riesgos.

Se pueden encontrar algunas listas de verificación en la bibliografía [43], [59].

Una lista de verificación normalmente se genera a partir de una lista de preguntas, comprobaciones o puntos específicos de una determinada materia que conviene considerar para su análisis. En la lista de verificación las preguntas y comprobaciones deben formularse de tal manera que las respuestas se resuelvan con “sí”, “no”, “no aplica” o “necesita más información”. Con estas sencillas respuestas debe ser suficiente para obtener resultados cualitativos que permitan a su vez decidir con un “sí” o “no” sobre el cumplimiento buscado.

Cuando se opta por el uso de la lista de verificación como técnica de análisis de peligros, la secuencia habitual es partir de otra existente en base a la cual se desarrolla la nueva incorporando las preguntas específicas o modificando adecuadamente las de la lista de la que se parte. Con la lista preparada se procede con la revisión para, a continuación, documentar los resultados. Si no se dispone de una lista de verificación existente que pueda ser usada como referencia, lo normal es generar una nueva lista basada en la experiencia, en el historial de la planta y en las referencias que puedan considerarse aplicables.

El resultado del análisis mediante el método de la lista de verificación suele ser un informe que incorpore las deficiencias encontradas junto con las propuestas de resolución o mejora. El informe incluirá la lista de verificación con las respuestas y las anotaciones que se consideren pertinentes.

La lista de verificación normalmente requiere el trabajo de un especialista durante un tiempo que no debería ser superior a un día para procesos pequeños y 3-4 para instalaciones grandes.

Entre las ventajas de la lista de verificación respecto de otros métodos de análisis cabe citar que se adaptan fácilmente a las aplicaciones y empresas de una manera muy simple, que su uso es sencillo, es un método bien estructurado y de fácil comprensión y coherencia. Además, son muy útiles para operaciones estándar o para operaciones repetitivas y para garantizar que no se pase por alto ningún problema básico. Si se utilizan en la fase inicial del proyecto, permiten identificar problemas que en una etapa posterior sería más difícil eliminar una vez que el diseño está más consolidado.

Por el contrario, se puede decir que las principales desventajas de este método de análisis residen en la dificultad de preparar una buena lista ya que se requieren buenos conocimientos y experiencia del proceso o del producto a evaluar. Los especialistas necesarios pueden proceder de campos técnicos diferentes, por lo que al final los recursos pueden resultar costosos. Además, si la lista de verificación es incompleta se puede tener una falsa sensación de seguridad que no detecte algún defecto, ya que esta técnica no profundiza en los peligros asociados con el proceso.

Aunque no resulte obvio, preparar una buena Lista de verificación en base a la cual llevar a cabo una identificación de peligros no es sencillo y requiere tiempo y experiencia.

2.3.2.2 Métodos de Identificación y Análisis de Riesgos basados en escenarios

Se pueden considerar, entre otros, los siguientes:

- Análisis What-if o ¿Qué pasa sí?
- Análisis Que pasa sí / Lista de verificación
- Estudios de riesgo y operabilidad (HAZOP)
- Análisis de efectos y modos de falla (FMEA)
- Análisis de árbol de fallas (FTA)
- Análisis del árbol de eventos (ETA)
- Análisis de causa-consecuencia (CCA) y análisis de pajarita

En este capítulo solo se considerarán los cuatro primeros con alguna de sus variantes, ya que el resto se pueden considerar como cuantitativos, aunque también pueden usarse como métodos estrictamente cualitativos.

2.3.2.2.1 Análisis ¿Qué pasa sí? O What-if

Es un método de análisis que se basa en la técnica de “lluvia de ideas” (brainstorming) donde un equipo de especialistas experimentados se plantean preguntas sobre el proceso y sobre escenarios de riesgo.

El método de análisis ¿Qué pasa sí? no esta tan estructurado como otros métodos basados en lluvias de ideas, como el HAZOP. No hay muchas publicaciones acerca del método, aunque la industria lo utiliza de manera reiterada en múltiples aplicaciones.

La técnica de análisis de este método se basa en estudio de una parte definida del proceso cuya documentación básica suele ser planos de layout, P&IDs y otros documentos relacionados con los materiales y el proceso que es de aplicación. El equipo lanzará una serie de preguntas, que pueden haber sido elaboradas previamente a la reunión en una lista la cual se puede completar durante la reunión con otras preguntas adicionales. El equipo debe trabajar de manera lógica y bien estructurada realizando el estudio a lo largo del proceso. Es muy recomendable seguir los diagramas de flujo del proceso analizado en su secuencia natural, lo que le proporcionará consistencia. La intención es desafiar las diferentes partes del diseño y probar que se han considerado todas las contingencias posibles. El cuestionamiento debe ser creativo con análisis de consecuencias, clasificación de criticidad y recomendaciones acordadas por los miembros del equipo. Si bien, a primera vista, "¿Qué pasa sí?" Puede parecer un proceso aleatorio, en realidad tiene gran parte de la técnica HAZOP incorporada en su esencia de trabajo. Por ejemplo, se preguntará típicamente

"¿Qué pasa si no hay flujo?"

que, aunque no es una palabra guía como en el estudio HAZOP, el análisis que surgirá como consecuencia de esta pregunta es muy similar.

Un estudio en una línea de transferencia podría considerar preguntas como:

¿Qué pasa si no hay flujo en esta línea? ¿Qué podría causarlo y cuál será el efecto?

¿Qué pasa si se necesita acceder para el mantenimiento? ¿Se puede acceder al equipo?

¿Qué pasa si hay un incendio? ¿Pueden acceder los servicios de emergencia? ¿Qué instalaciones locales están disponibles?

¿Qué pasa si un operador se lesiona? ¿Será posible el rescate?

¿Qué pasa si surge una condición anormal?

En cada caso, el equipo evaluará las consecuencias de manera que una vez se hayan considerado las posibles causas, asignará una calificación de criticidad al evento, por ejemplo, utilizando una matriz simple de frecuencia de las consecuencias. Cuando sea aplicable, el equipo también debe identificar las opciones disponibles o hacer recomendaciones de modificaciones al diseño. Para cada pregunta “Y si ...”, el análisis se registra en una tabla simple con columnas para la pregunta Y si ..., las Consecuencias, las Salvaguardas, la Criticidad y las Recomendaciones.

El resultado de este análisis es una lista de preguntas y respuestas sobre el proceso analizado. También puede resultar como una lista tabulada de situaciones peligrosas, normalmente sin clasificación o implicación cuantitativa de los escenarios de incidentes potenciales identificados, así como sus consecuencias, salvaguardas y posibles opciones para la reducción de riesgos. En la Figura 2-6 se muestra un formato típico para una hoja de resultados de un análisis What-if.

Area/Unidad:		Fecha:		
Plano Nº:		Equipo:		
Que pasa si	Peligro	Consecuencia	Salvaguardas	Recomendación

Figura 2-6.- Formato típico de una hoja de trabajo de Análisis What-if [43]

En cuanto a los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio, generalmente es suficiente con un equipo de cuatro especialistas de diferentes especialidades y un facilitador y un secretario del equipo. Obviamente dependiendo de la envergadura y complejidad del sistema el equipo lo compondrán especialistas de diferentes disciplinas o áreas de conocimiento, si bien es conveniente que siempre se encuentre incluido un especialista en HSE (Health, Safety and Environment-Seguridad, Salud y Medioambiente). Los especialistas deben tener una amplia experiencia para ser capaces de acometer todas las preguntas y someter al sistema a las exigencias máximas de seguridad relacionada con el diseño, los procesos y la operación y mantenimiento.

Como se ha indicado, al ser una técnica cualitativa, no se necesitan datos cuantitativos. Es imprescindible disponer de los P&ID's y diagramas de proceso PFD's de la planta, así como las descripciones funcionales y de control en un grado de avance suficiente para saber cuál es la respuesta a las demandas de una manera adecuada, pero en un estado lo suficientemente temprano como para que no suponga un trastorno para el proyecto la incorporación de las recomendaciones de seguridad. Todo esto es similar al estudio HAZOP que se verá luego.

Es una técnica muy flexible y se puede utilizar en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Además, es una técnica simple, rápida y que a diferencia del HAZOP puede orientarse a explorar riesgos menos orientados al proceso incorporando especialistas de otras disciplinas como puede ser construcción, comisionado, mantenimiento, etc., se puede realizar un estudio con relativa rapidez.

Como principal desventaja se podría destacar que es una técnica que depende mucho de las capacidades y habilidades del facilitador de modo que, si no se estructura muy bien, el equipo puede perder tiempo en eventos triviales o no analizar algún aspecto importante. Por otra parte, la calidad del estudio es difícil de evaluar.

2.3.2.2.2 Análisis Estructurado ¿Qué pasa si? SWIFT

Recientemente se ha desarrollado una variación del método What-if denominado SWIFT de sus siglas en inglés “Structured What-IF Technique” o técnica Estructurada What-if [76]. Esta técnica tiene algunas similitudes con What-if/Lista de verificación que se mencionará luego.

La técnica de análisis SWIFT utiliza la técnica What-if incorporando palabras guía/encabezados previamente desarrollados (por ejemplo, tiempo, cantidad...) de tal modo que los especialistas que conforman el equipo de la reunión lanzan preguntas o preocupaciones que, al igual que en la técnica que pasa sí, normalmente comienzan con las frases “¿qué pasaría si...?” o “¿Cómo podría...?” para examinar los riesgos y peligros del sistema analizado.

Es una técnica muy similar a la técnica que estructura y por tanto sigue siendo menos detallada que el HAZOP y por eso consume en general menos tiempo por lo que es más ágil que esta. En contraposición, igual que ocurre con What-If, se corre el riesgo de pasar por alto alguno de los peligros del sistema.

Aunque puede ser utilizado para la totalidad de la instalación, en ocasiones se puede realizar una análisis SWIFT y a continuación escoger determinados subsistemas o nodos sobre los que realizar un análisis HAZOP.

Aunque la técnica es cualitativa se puede identificar algún nodo sobre el que aplicar técnicas de análisis cuantitativos, de modo que se podría considerar también como una técnica híbrida de las descritas en el capítulo siguiente si se incorpora en el análisis índices para la evaluación.

2.3.2.2.3 Análisis ¿Qué pasa si? /Lista de verificación O What-if/Check List

Este método de análisis combina las fortalezas de los dos métodos reduciendo las desventajas de cada uno. Así, mediante las Listas de Verificación se pueden sistematizar los temas y puntos a revisar mediante el método ¿Que pasa sí...? que utiliza la lluvia de ideas. Utiliza las experiencias anteriores y las incorpora en el proceso de revisión. Así cuanto más experimentado es el equipo que realiza el análisis mejores resultados se obtendrán. Por otra parte, esta técnica está siendo muy usada en los últimos años porque es más ágil que otras, proporciona resultados potentes y puede ser usada en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

El análisis por el método de ¿Qué pasa si...? /Lista de verificación consta de los siguientes pasos:

1. Preparación para la revisión. El Facilitador del equipo de revisión convocará a los especialistas, determinará el alcance físico y analítico para el estudio propuesto y, si procede se procederá a la división en secciones, áreas o tareas para ordenar la revisión. Además, proporcionará una lista de verificación que se usará junto con el análisis What-If.
2. Desarrollo de una lista de preguntas y problemas ¿Y si ...?.
3. Usar una lista de verificación para cubrir cualquier deficiencia o punto no sometido a revisión.
4. Mediante la técnica de lluvia de ideas, evaluar cada una de las preguntas y problemas.
5. Documentar los resultados. Los resultados de un análisis Que pasa si / Lista de Verificación se documentan de la misma manera que los resultados de un análisis Que pasa si visto antes.

El facilitador y el secretario del equipo, durante la reunión proyectarán las preguntas, problemas, efectos, salvaguardas, elementos de acción, etc., y registrarán los resultados durante la reunión conjuntamente con el equipo de especialistas que lleva a cabo el análisis. A continuación, el facilitador una vez finalizadas las sesiones elaborará un informe donde se incluyan tanto los análisis realizados, como las lista de verificación usadas convenientemente cumplimentadas.

Una variación de este procedimiento es que el equipo invierta el orden de los pasos 2 y 3 o desarrolle preguntas Y si ... simultáneamente a medida que avanzan a través de una descripción detallada de la Lista de Verificación

Esta metodología de análisis también puede proporcionar los datos necesarios a la metodología LOPA, tal como ocurre con otros métodos como el HAZOP. En este caso la estructuración de los resultados deberá ser algo más estricta.

2.3.2.2.4 Análisis HAZOP ((HAZard and OPerability Study),

En castellano AFO Análisis Funcional de Operatividad [77]. Ampliamente desarrollado por las organizaciones desde la primera metodología propuesta en 1971 por ICI, consultar [78] o [79] para tener una visión general del volumen de bibliografía y alcance de este estudio. Es el método más usado actualmente por la industria. Para completar la metodología consultar también [80]. Es una técnica de análisis que se basa en la consideración de que los riesgos, los accidentes, así como los problemas de operabilidad, se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación.

Un estudio HAZOP es un análisis estructurado de un sistema, proceso u operación, realizado por un equipo multidisciplinar. El equipo procede con una revisión paso a paso del diseño lo suficientemente consolidado y lo divide en partes, las cuales podrían ser analizables perfectamente separadas del resto. Cada parte en que se divide el sistema o proceso en estudio se denomina Nodo. En el análisis de cada Nodo, se utiliza un conjunto de “palabras guía” predefinidas, las cuales combinadas con los parámetros de operación y diseño del sistema, permiten identificar las desviaciones del proceso que pueden constituir un peligro para las personas o la instalación. Cuando se encuentra un peligro potencial o un problema de operatividad, el equipo usa su experiencia para decidir si se requieren cambios al diseño. El resultado del análisis es un informe escrito con unos formatos preestablecidos que incorpora los escenarios, las desviaciones,

consecuencias y propuestas de cambio para incrementar el nivel de seguridad o si se quiere disminuir el nivel de riesgo asociado con el peligro identificado y evaluado.

El análisis HAZOP es adecuado tanto para las fases de ingeniería, como en la etapa de operación. En teoría el estudio requiere que el diseño se encuentre finalizado, sin embargo, es habitual realizar estudios diferentes según avanza el diseño en etapas diferentes. Es importante que el estudio HAZOP no se vea condicionado por la planificación del proyecto y se realice el estudio cuando las recomendaciones del estudio puedan ser implementadas, de lo contrario se encontrarán muchas dificultades para su implementación.

La metodología HAZOP utiliza también la técnica de la tormenta de ideas, de manera que el facilitador o líder del estudio va guiando al equipo a través del diseño de la planta utilizando las palabras guía aplicándolas a los nodos, de manera que combinadas con los parámetros de proceso permiten identificar las desviaciones de la operación de la planta. Por ejemplo, la palabra guía "No" combinada con el parámetro de proceso "Flujo" da como resultado la desviación "Sin flujo". En la Tabla 2-1 se proporcionan las palabras guía y en la Tabla 2-2 los principales parámetros a analizar en un estudio HAZOP.

Guideword	Meaning
No (not, none)	None of the design intent is achieved
More (more of, higher)	Quantitative increase in a parameter
Less (less of, lower)	Quantitative decrease in a parameter
As well as (more than)	An additional activity occurs
Part of	Only some of the design intention is achieved
Reverse	Logical opposite of the design intention occurs
Other than (other)	Complete substitution. Another activity takes place
Other useful guidewords include	
Where else	Applicable for flows, transfers, sources and destinations
Before/after	The step (or some part of it) is effected out of sequence
Early/late	The timing is different from the intention
Faster/slower	The step is done/not done with the right timing

Tabla 2-1.- Palabras Guía para el estudio HAZOP [57]

Flow	Pressure	Temperature	Mixing	Stirring
Transfer	Level	Viscosity	Reaction	Composition
Addition	Separation	Time	Phase	Speed
Particle size	Measure	Control	pH	Sequence
Communication	Start/stop	Operate	Maintain	Services

Tabla 2-2.- Parámetros habituales de un estudio HAZOP [57]

Se ha mantenido la designación original en inglés ya que es habitual la aplicación de los términos tal como concebidos originalmente.

Para realizar adecuadamente un estudio HAZOP es importante establecer con claridad el alcance del estudio, de los límites físicos de la planta así como los modos de operación que deben ser considerados. Estos pueden incluir el arranque y la parada, así como condiciones anormales o transitorios de operación. El equipo que realizará el estudio es otro factor determinante para el éxito de la aplicación de la metodología HAZOP. Lo habitual es que el equipo se constituya desde 4 personas en un estudio con pocos nodos hasta 6 a 10 miembros para una planta completa. Más

de 10 personas no es habitual, ya que un número tan grande significa que las reuniones son más costosas, más ineficientes y difíciles de controlar. al poderse producir discusiones paralelas. Es habitual que el estudio HAZOP sea subcontratado a una tercera parte para que el enfoque sea más objetivo y así disponer del facilitador y secretario con un perfil más experimentado que puedan aportar un enfoque mucho más profesional. Los otros miembros del equipo deben elegirse combinando el conocimiento del proceso que se está estudiando con la experiencia en el proceso a analizar. Se suelen seleccionar especialistas del equipo de ingeniería que ha desarrollado la ingeniería o el diseño básico, personal de operación y mantenimiento, así como especialistas de instrumentación y control y especialistas del equipo de seguridad. Es habitual incorporar también de manera puntual a otros que puedan aportar conocimiento en un proceso o nodo determinado, por ejemplo, químicos, especialistas de materiales, etc. Todos los participantes deben conocer y tener experiencia en la realización de estudios HAZOP o haber recibido la formación adecuada.

Además de lo anterior la documentación debe estar lista para su estudio por parte del equipo. El diseño debe estar en un estado lo suficientemente avanzado para que se pueda visualizar la planta en su conjunto y conocer cómo será operada.

Como se ha indicado, los sistemas y procesos de la planta en estudio se dividen en secciones o nodos. Al inicio de las sesiones del estudio HAZOP se debe proporcionar una descripción general de todo el proyecto para asegurar que los miembros del equipo dispongan de una visión común. Luego se analizan las secciones o nodos una a una, comenzando con una descripción detallada del equipo y la operación a partir de la cual se puede comenzar la búsqueda de desviaciones. Se elegirán las palabras guía combinadas con un parámetro del sistema para obtener una desviación. Si la combinación es físicamente significativa, se le pide al equipo que sugiera las causas. Cuando se encuentra una posible causa, se deben evaluar las consecuencias, utilizando el conocimiento y la experiencia de los miembros del equipo. A menos que sea muy improbable que ocurra la causa o que las consecuencias sean triviales, el equipo procede a considerar las salvaguardas existentes para esta causa y decide si son adecuadas. Se registra la secuencia prevista y se genera una acción si las salvaguardas se consideran insuficientes o si algún aspecto no puede describirse con certeza. Se llevará a cabo una asignación de responsables para la resolución de las acciones identificadas de modo que se pueda evaluar su cumplimiento en una etapa posterior, normalmente por el equipo de gestión del proyecto.

El proceso continúa hasta que se hayan considerado todas las causas de todas las desviaciones (todas las combinaciones de palabras guía y parámetros de la matriz antes preparada). Luego, el equipo puede pasar a estudiar la siguiente etapa del proceso. La Figura 2-7 muestra el esquema de trabajo habitual que se basa en la palabra guía.

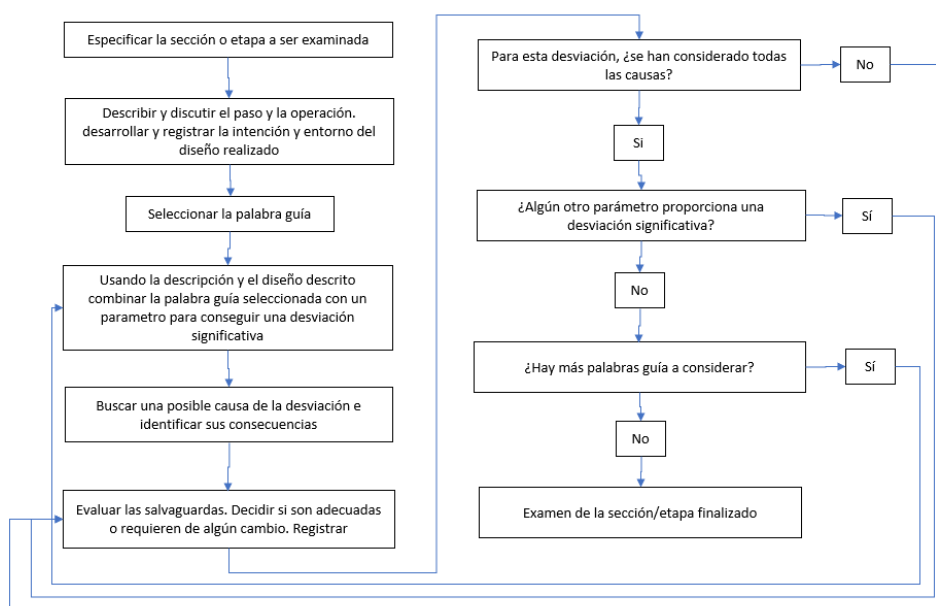


Figura 2-7 Diagrama de flujo de un análisis HAZOP [57]

Hay que resaltar que a diferencia de las palabras guía, no se puede proporcionar una lista de parámetros estandarizada, ya que deben ser seleccionados por el equipo para la aplicación concreta que se esté revisando. Además, la responsabilidad principal de sugerir parámetros y desviaciones, de identificar posibles causas, de analizar consecuencias y salvaguardas y de tomar decisiones recae en los miembros del equipo que lleva a cabo el análisis.

En la Tabla 2-3 se incluye un formato típico para realizar el análisis y proporcionar los resultados.

Plano N°:		Fecha de la reunión:			
Rev:		Equipo HAZOP:			
Item	Desviación	Causas	Consecuencia	Salvaguardas	Acciones
Nodo estudiado, sección de proceso o descripción del paso de operación. Definición del diseño					
1.1					
1.2					
...					

Tabla 2-3 Formato típico de una hoja de registro del estudio HAZOP [43]

Existen algunas variantes del estudio HAZOP. Una de ellas consiste en identificar las desviaciones de una manera diferente. Cuando el equipo que realiza el HAZOP no es muy experimentado cabe la posibilidad de preparar una lista de palabras guía que cubran todos los modos de operación posible de modo que se asegure que no hay ninguno sin evaluar. Esto ha supuesto dos enfoques diferentes de llevar a cabo el análisis, el *enfoque basado en librerías* y el *basado en el conocimiento*. El primero utiliza librerías estándar para la elaboración de los escenarios completos, mientras que el basado en conocimiento utiliza listas de verificación de experiencias previas o análisis anteriores. Otras variantes documentan de manera diferente los resultados del estudio, por ejemplo agrupando los resultados causa a causa, desviación a desviación o mediante tablas de excepciones. También es habitual incorporar en el estudio HAZOP el estudio de

seguridad inherente del proceso como parte integral del mismo. En [81] se puede encontrar una revisión de la bibliografía hasta el año 2009.

2.3.2.2.5 Análisis Modal de Fallos y Efectos (Failure Modes and Effects Analysis FMEA)

El Análisis Modal de Fallos y Efectos FMEA, considera los modos de fallo individuales de un elemento de la planta o de varios elementos que conforman un sistema de la misma. Se selecciona un elemento de la planta, normalmente un equipo como bombas o válvulas, de modo que se pueda identificar los modos en los que dicho equipo puede fallar evaluando a continuación cuales son los efectos de ese fallo en el sistema o en el funcionamiento de la planta. Este análisis proporciona recomendaciones para aumentar la fiabilidad del equipo, mejorando así la seguridad del proceso. El análisis requiere tiempo, ya que se lleva a cabo de una manera muy precisa y sistemática y suele ser realizado por un equipo pequeño conformado por un líder y un par de especialistas (mecánico-proceso e instrumentación y control son perfiles habituales), muy experimentados con los elementos a revisar. A veces el análisis lo realiza un especialista único muy experimentado. El tiempo empleado es muy variable en función del número de equipos a revisar y puede llevar desde unos días hasta semanas en su evaluación. Para cada modo de fallo las consecuencias deben evaluar la validez de las respuestas existentes a ese fallo. El método está muy bien estructurado y se pueden encontrar múltiples referencias en la bibliografía [82], [83] o en [84] donde se puede encontrar una revisión bibliográfica extensa de este método de análisis.

Para llevar a cabo un análisis FMEA se necesita disponer de un grado de detalle en la documentación del proceso o de la planta similar al utilizado para el análisis HAZOP, o si se quiere algo mayor ya que se precisará además disponer de la documentación detallada de los equipos, así como los sistemas de protección, de manera que pueda establecerse los efectos de los fallos completamente.

Para cada elemento, el equipo debe considerar su función e identificar todos los posibles modos de fallo. Luego, se considerarán las consecuencias, tanto para el elemento en sí como para el sistema en su conjunto. Un formato típico sería el siguiente (Tabla 2-4)

Fecha:			Pag. de			
Planta:			Referencia:			
Sistema:			Analistas:			
Item	Identificación	Descripción	Modo de fallo	Efectos	Salvaguardas	Acciones
1.1						
1.2						
...						

Tabla 2-4 Formato estándar de una hoja de registro de un FMEA [57]

En la Tabla 2-4 por identificación se entiende una descripción del componente incluyendo su función. Para el Modo de fallo se pueden distinguir diferentes categorías: a prueba de fallos, peligro de fallo, falla degradada y falla neutral. Otras categorías pueden ser: fallas en el arranque, fallas durante la operación, fallas en la parada u otras. El efecto del fallo debe considerarse no solo en el propio elemento sino en otros componentes, así como los efectos en el sistema.

2.3.3 Métodos Híbridos o Semicuantitativos.

2.3.3.1 Métodos basados en índices (DoW, MOND, etc.)

En la descripción elemental del método de la clasificación relativa se han proporcionado referencias bibliográficas para consultar los detalles de cada método de análisis.

2.3.3.2 Análisis Modal de Fallos, Efectos y su Criticidad (Failure Modes, Effects and Critically Analysis FMEAC).

Cuando al FMEA se incorpora la gravedad de las consecuencias de los fallos el análisis se denomina Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad FMEAC de sus siglas en inglés. Se puede considerar un método híbrido o semicuantitativo, ya que incorpora un análisis cualitativo a través de la metodología FMEA y establece una criticidad aportando índices similares a los usados en el método FINE. Es habitual utilizar la expresión de evaluación de riesgos ya mencionada en el capítulo 2.1.1 incorporando de manera general el factor de Detectabilidad. Así, el riesgo puede medirse como:

$$\text{Riesgo} = \text{Detectabilidad} \times \text{Gravedad} \times \text{Frecuencia}$$

Siendo

Detectabilidad: Si durante la operación de la planta o equipo de proceso se produce un fallo, se trata de averiguar como de probable es que no sea detectado y pueda pasar a una etapa posterior sin detectarse amplificando potencialmente las consecuencias del fallo.

Frecuencia Mide la repetitividad potencial u ocurrencia de un determinado fallo, es lo que en términos de fiabilidad o de prevención se denomina la probabilidad de aparición del fallo.

Gravedad o categorización del peligro Mide el daño normalmente esperado que provoca el fallo en cuestión. También cabe considerar el daño máximo esperado, el cual iría asociado también a su probabilidad de generación.

Las escalas de estos índices varían, pero no suelen incorporar más allá de un establecimiento entre 1 a 5 posibles clasificaciones tanto de la detectabilidad, como de la frecuencia y gravedad. También conviene indicar que no en todos los estudios FMEAC se incorpora la detectabilidad.

2.3.3.3 Estudios SIL/LOPA

2.3.3.3.1 Nivel de Integridad de Seguridad (Safety Integrity Level-SIL)

La determinación del Nivel de Integridad de Seguridad, SIL de sus siglas en inglés, es un requisito de las normas IEC 61508 [53] y IEC 61511 [52]. La norma IEC 61508 es una norma general que cubre la seguridad funcional de los equipos eléctricos (E), electrónicos (E) y electrónicos programables (PE). Cuando uno o más de los sistemas relacionados con la seguridad incorpora dispositivos mecánicos, eléctricos, electrónicos o electrónicos programables, tales como válvulas solenoides, relés, o autómatas programables PLC's (Programmable Logic Controllers), o sistemas electrónicos con microprocesadores es de aplicación la norma. La seguridad funcional se refiere

a la parte de la seguridad de un sistema de manera que sus componentes o subsistemas eléctricos, electrónicos, programables y sistemas de control/mando respondan adecuadamente ante cualquier fallo externo (peligros): errores humanos, hardware o software, así como a cambios en su entorno normal de funcionamiento. La norma trata los riesgos creados al fallar los sistemas relacionados con la seguridad cuyo funcionamiento depende de dichos equipos E/E/PE y lo hace desde dos puntos de vista: desde el ciclo de vida de la seguridad funcional estableciendo para ello un plan de seguridad y desde los niveles de integridad de seguridad (SIL) que son niveles de orden de magnitud de reducción de riesgos. En la norma se definen cuatro niveles de reducción de riesgo, numerados de 1 a 4, siendo SIL-1 el que tiene el nivel de riesgos de reducción más bajo y SIL-4 el más alto. A partir de IEC 61508 se han desarrollado normas especificadas de seguridad para las diferentes industrias, tales como automoción (ISO 26262), nuclear (IEC 61513) maquinaria (IEC 62061) o la ya mencionada IEC 61511 de aplicación para las industrias de proceso. Otras normas como ANSI/ISA 84 [85] proporcionan un marco similar al de IEC y evolucionan de manera conjunta en este tema. Algunas definiciones ayudan a aclarar algunos conceptos que serán usados a lo largo de este trabajo.

Según IEC 61511 una Función Instrumentada de Seguridad (Safety Instrumented Function **SIF**) es “función de seguridad con un nivel de integridad de seguridad especificado que es necesario para lograr la seguridad funcional. Una función instrumentada de seguridad puede ser una función de protección instrumentada de seguridad o una función de control instrumentada de seguridad”.

Según ISA 84.00 un Sistema Instrumentado de Seguridad (Safety Instrumented System **SIS**) es un sistema instrumentado utilizado para implementar una o más funciones instrumentadas de seguridad. Un SIS se compone de cualquier combinación de sensor (s), solucionador (es) lógico (s) y elemento (s) final (s).

Continuando con las definiciones de ISA una función de seguridad es “aquella a ser implementada por un SIS, sistema relacionado con la seguridad de tecnología o instalaciones de reducción de riesgos externos, que está destinado a lograr o mantener un estado seguro para el proceso, con respecto a un evento peligroso específico”. Esta definición se desvía de la dada en IEC 61508-4 al reflejar terminología propia del sector de procesos.

Cuando una acción humana es parte de un SIS, la disponibilidad y confiabilidad de la acción del operador debe especificarse en el SRS e incluirse en los cálculos de desempeño para el SIS.

Por otra parte, la Norma IEC 61511 también requiere que el usuario cree una Especificación de Requisitos de Seguridad (Safety Requirements Specification-**SRS**) para un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) que incorpore todos los análisis realizados durante las revisiones de Evaluación de peligros tales como HAZOP PHA, u otros. El SRS se divide en dos tipos: un SRS conceptual inicial, a menudo denominado SRS de seguridad de procesos; un SRS de diseño detallado que contiene toda la información detallada del diseño.

Como parte de las etapas a cubrir en un SIS a lo largo de su ciclo de vida, se encuentra el cálculo del índice SIL. Para el cálculo del índice SIL en las normas IEC 61511 y ANSI/ISA 84.00 citadas anteriormente se definen las siguientes metodologías:

- Métodos cualitativos, mediante el uso de Gráficos de Riesgo. En la Figura 2-8 se proporciona el gráfico de riesgo de la norma IEC 61511 parte 3.

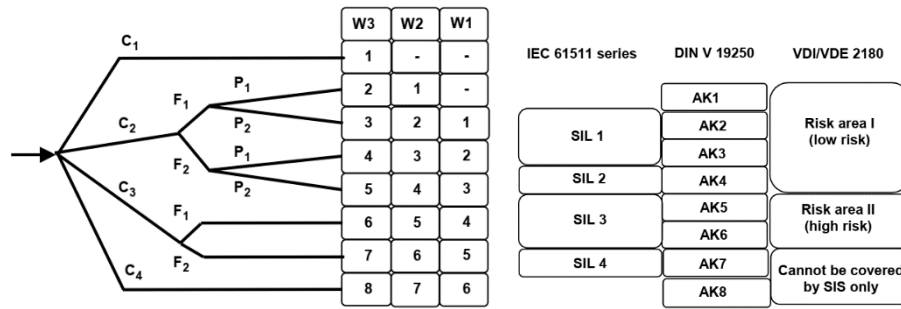


Figura 2-8 Grafico de Riesgo según DIN V 19250 y equivalencia con IEC 61511 [86]

En la Figura se expresa el Índice SIL de acuerdo con la normativa alemana que lo clasifica desde AK1 hasta AK8, así como las equivalencias entre las normas.

El índice SIL se obtiene a partir de dicho gráfico valorando cualitativamente cada uno de los cuatro parámetros: C Consecuencias (de 1 a 4), F Frecuencia (1 poca y 2 alta), P posibilidad de evitar el suceso (1 posible en determinadas circunstancias o 2 casi imposible) y probabilidad de ocurrencia del evento (W1 poco probable, W2 probable y W3 muy probable).

- Métodos semicualitativos. Emplean índices del potencial de riesgo estimados a partir de estadísticas. Se utilizan dos metodologías diferentes: Gráfico de Riesgo Calibrado y Matrices de Riesgo.

En el primer caso, se usan los gráficos de riesgo pero se asignan valores a los cuatro parámetros usados antes C, F, P y W.

En el segundo caso se trata de obtener el índice SIL a partir del uso de una Matriz de Riesgo valorando la probabilidad de ocurrencia de un accidente y la severidad de sus consecuencias ambas de manera semicualitativa. En la Figura 2-9 se proporciona la Matriz de riesgo de la norma IEC 61511.

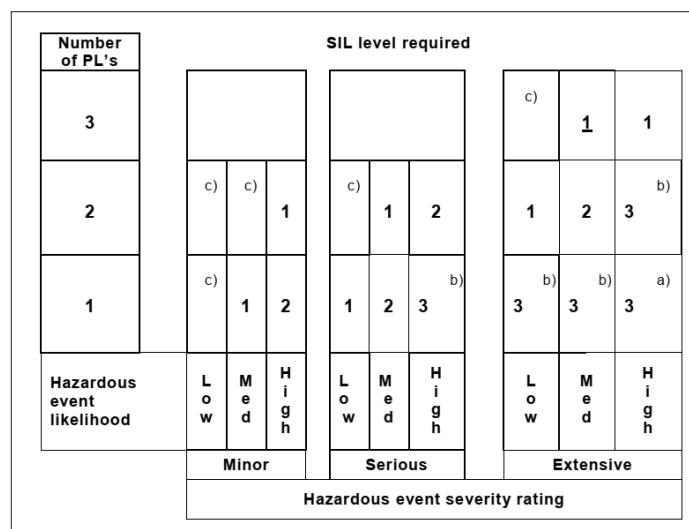


Figura 2-9 Matriz de Riesgo para cálculo del índice SIL [86]

Como se puede observar es una matriz tridimensional donde se entra con el número de capas de protección y la severidad de las consecuencias y probabilidad de ocurrencia y se obtiene un índice SIL para cada caso. Se puede observar que con esta metodología no se podrían definir niveles SIL 4.

- Métodos semicuantitativos o cuantitativos. Entre ellos se encuentra el Análisis de la Capa de Protección que se revisa con algún detalle a continuación.

2.3.3.3.2 Análisis de la Capa de Protección (Layer Of Protection Analysis-LOPA)

En términos generales el análisis de la capa de protección (LOPA) es un procedimiento que examina las salvaguardas en una planta de proceso para ver si la protección proporcionada es adecuada para cada peligro identificado. A continuación se considerará lo indicado en las referencias [87] del CCPS y las ya mencionadas [57],[43], aunque se pueden encontrar algunas referencias adicionales relevantes sobre este asunto en [88],[89] u [90].

El análisis LOPA muestra si se requieren controles o sistemas adicionales comparando el riesgo (con y sin dichos elementos adicionales), con un conjunto de criterios de riesgo predeterminados. Analiza los sistemas de protección independientes en una planta y examina sus acciones cuando se produce un evento no deseado para determinar su idoneidad. Por lo general, las capas de protección, destinadas a proporcionar una defensa en contra del evento, son:

- Integridad mecánica. Parte del diseño e ingeniería de procesos de la planta.
- El sistema de control de planta así como los procedimientos operativos.
- Alarmas críticas e intervención manual. Esta capa puede estar relacionada con el punto anterior y puede incluir capas de protección independientes (Independent Protection Layers IPL) incluidas en el sistema de control, por lo que se debe tener cuidado sobre la independencia de esta capa.
- SIS automático o Sistema de Parada de Emergencia (Emergency Shutdown System ESD) automatizado. En este caso conviene verificar aunque se encuentre aquí incluidas algunas acciones que se pueden también considerar en la capa anterior.

Las siguientes capas adicionales normalmente actúan para reducir la escala del evento, no tanto el riesgo:

- Protección física como válvulas de alivio.
- Soporte y servicios de emergencia en el sitio.

La Figura 2-10 muestra la vista en "cebolla" de las capas de LOPA y un esquema básico de la metodología en forma de árbol de eventos.

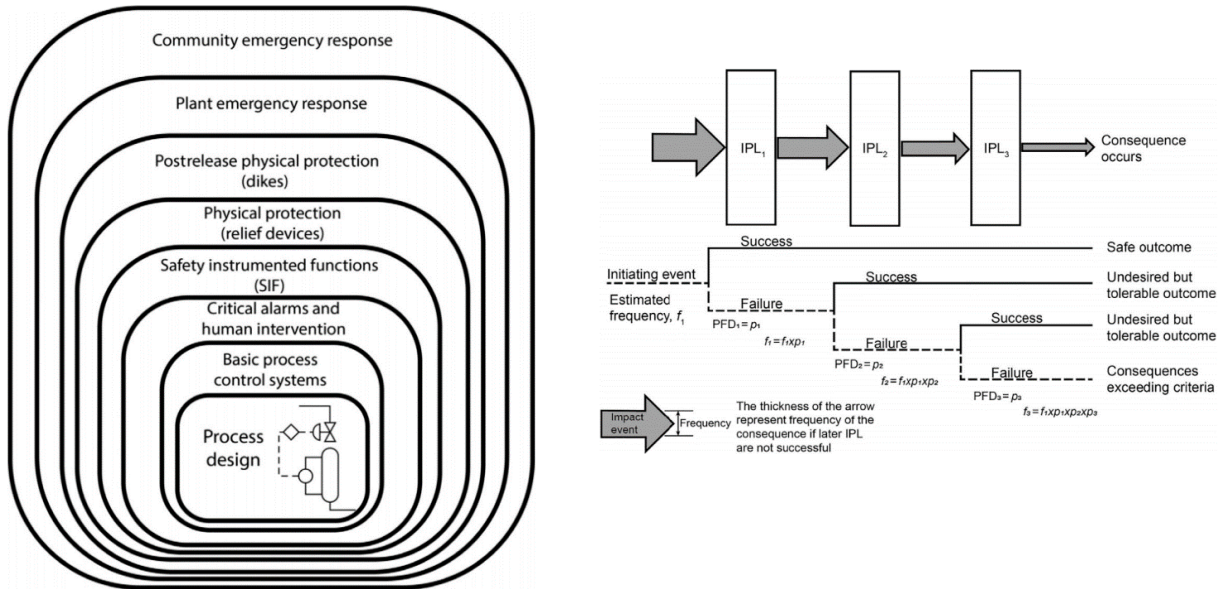


Figura 2-10 Capas y metodología de LOPA [57]

Se puede observar que en el método se considera que un incidente se produce de manera escalonada, de manera que cada capa actúa cuando la anterior no ha podido detener el suceso. Por eso las capas de protección deben ser realmente independientes entre sí de manera que no interactúen entre ellas. Una de las características más difíciles de LOPA es la evaluación de la presencia humana y las acciones en el escenario.

El punto de partida en un estudio LOPA es la identificación de peligros y escenarios peligrosos, considerando las consecuencias y desviaciones que resultarían de un fallo en el caso en el que no actúen los medios de mitigación o salvaguardas previstas. Hay que examinar cada uno por separado. En primer lugar se debe identificar la gravedad de las consecuencias y a continuación, se debe asignar la "frecuencia objetivo" para estas consecuencias, utilizando las directrices de la empresa o las aceptadas por las autoridades, el cliente final u otros organismos. Las causas, consecuencias y frecuencias deben ser anotadas y analizadas en profundidad. Normalmente están tasadas por fabricantes, bases de datos o experiencias anteriores.

En la siguiente etapa, las capas de LOPA se evalúan una por una para ver si existe una protección aplicable. Para cada capa de protección independiente IPL se evalúa en términos de ordenes de magnitud la frecuencia final que se obtendrá para cada una. La frecuencia final será la suma de todas lo que será evaluado en comparación con los valores de referencia de modo que se verifique el cumplimiento con los criterios de tolerancia del riesgo considerado.

Normalmente el equipo que realiza el LOPA es muy similar al que ha realizado la identificación de peligros, por lo que es habitual que se combinen ambos realizando un estudio completo junto con los análisis HAZOP; What-if u otros.

2.3.4 Métodos Cuantitativos

Para el análisis cuantitativo de peligros, la definición de las interfases y el alcance es extremadamente importante. Mientras que una definición válida para el análisis cualitativo es [91]

"El análisis de riesgo cualitativo evalúa la prioridad de los riesgos identificados utilizando su probabilidad de que ocurran, el impacto correspondiente [...] así como otros factores como el marco de tiempo y la tolerancia al riesgo [...]". Por el contrario, el Análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantitative Risk Analysis QRA) puede definirse como "el enfoque formal y sistemático para identificar eventos potencialmente peligrosos, estimar la probabilidad y consecuencias de esos eventos y expresar los resultados como riesgo a las personas, el medio ambiente o la empresa". Así el análisis cuantitativo es un paso más allá del análisis cualitativo y se utiliza cuando se desea una mayor precisión y/o cuando el análisis cualitativo de peligros no es del todo adecuado. El objetivo básico de QRA es lograr la máxima seguridad mediante la eliminación o mitigación de peligros o accidentes con la ayuda de controles preventivos y correctivos. Se calcula de manera lo más exacta posible la probabilidad de ocurrencia de accidentes y esta probabilidad se expresa utilizando un número, tasa o índice.

En la Figura 2-11, la cual se ha elaborado teniendo en cuenta las pautas de [57] de CCPS se muestra la secuencia de los distintos sistemas de análisis y las distintas etapas hasta llegar a un sistema de seguridad

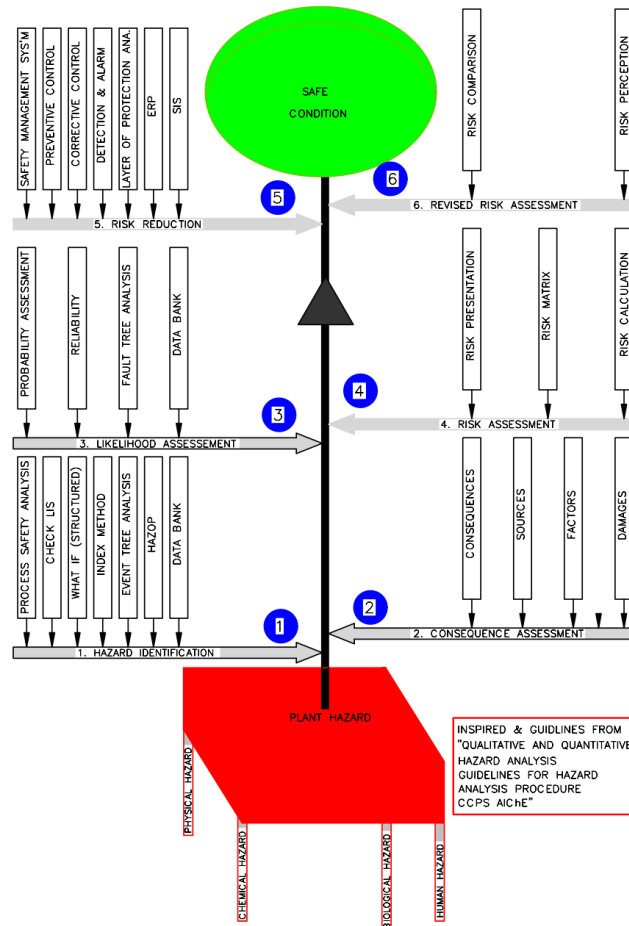


Figura 2-11.- Etapas y sistemas de análisis para la condición segura [91]

A continuación solo se va a proporcionar una visión muy general de estos métodos ya que son extensos en los conceptos y metodologías de uso. En cada caso, tal como se ha venido haciendo a lo largo del capítulo se referirán citas donde ampliar la información de cada uno. Uno de los

principales trabajos de referencia, tal como viene ocurriendo hasta ahora para España son las Guías Técnicas [23], [24] y [26] y las NTPs del INSS [77], mientras que para una visión general que es ampliamente reconocida se pueden encontrar en [92], [57],[43] [59] o los muy citados en España [7] y [5]. Finalmente una visión de la historia de QRA se puede encontrar en [93] y una visión general en [94].

2.3.4.1 Análisis del Árbol de Sucesos (Event Tree Analysis -ETA)

Algunas referencias adicionales a las mencionadas antes, se pueden encontrar en [95], [96] o [97].

Un árbol de eventos es una representación gráfica de los posibles resultados de un incidente que es consecuencia de un determinado evento inicial. El análisis considera las respuestas de los operadores y de los sistemas de seguridad a dicho evento iniciador. Puede usarse cualitativamente para determinar un rango de resultados y cuantitativamente para determinar sus probabilidades o frecuencias.

El análisis del árbol de eventos (ETA) comienza con un evento iniciador, como puede ser un error. A continuación se consideran los resultados de dicho evento que pueden ser desde las funciones de seguridad integradas en el sistema, condiciones externas que afectan el resultado, hasta diferentes respuestas del operador. Cada una de ellas o se expresa como una o dos alternativas que se pueden representar como: sí / éxito (A), no / fracaso (A). El árbol de eventos se construye, trabajando de izquierda a derecha, comenzando con el evento de inicio y luego ramificándose a medida que se considera cada factor por turno. La figura 2-12 muestra un árbol de eventos en el que los resultados están influenciados por tres factores, A, B y C. El factor B solo influye en el resultado si A ha ocurrido, mientras que C no afecta el resultado si tanto A como B ocurren. Las probabilidades se pueden asignar en cada rama; deben sumar 1 en todos los casos. Las probabilidades de los distintos resultados se pueden calcular mediante una simple multiplicación. Estas probabilidades se pueden convertir a frecuencias siempre que se conozca la frecuencia del evento iniciador.

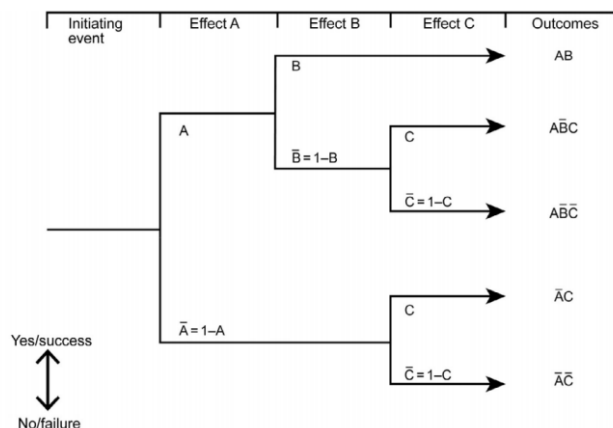


Figura 2-12 Árbol de eventos genérico simplificado [57]

El análisis del árbol de eventos habitualmente se realiza conjuntamente con el análisis del árbol de fallas FTA donde se puede haber estimado la frecuencia del evento iniciador.

El uso principal de los árboles de eventos no es para identificar peligros sino para analizar el posible historial de un evento que muestra todas las posibles circunstancias de evolución y su mitigación. Ofrece una descripción breve y sencilla de todos los posibles resultados y proporciona los medios para estimar su frecuencia / probabilidad. Es más simple de usar que los árboles de fallas y se adapta mejor a la evaluación de eventos más grandes que pequeños.

2.3.4.2 Análisis del Árbol de Fallos (Fault Tree Analysis -FTA)

El Análisis mediante el Árbol de Fallos (FTA) es una técnica encaminada al análisis de eventos principales o específicos que provocan fallo en el sistema y tiene como objetivo determinar todas las formas en las que se puede producir. El árbol de fallos muestra gráficamente las diversas combinaciones de fallas del equipo y errores humanos que pueden conducir al evento o causa principal de fallo. Se puede utilizar para identificar las causas fundamentales de un peligro y, con datos adecuados, también se puede utilizar para evaluar la probabilidad / frecuencia del evento principal.

El análisis del árbol de fallas es un método deductivo basado en el Algebra de Boole que se utiliza selectivamente en la identificación de peligros. Puede ser muy útil para identificar las causas fundamentales de un peligro importante que ya ha sido identificado y que solo ocurriría en condiciones bastante complejas. Tradicionalmente, el árbol de fallas se construye verticalmente con el resultado final en la parte superior "el evento superior". El árbol de fallos proporciona una estructura visible de estas condiciones y, mediante la cuantificación utilizando frecuencias y probabilidades, se puede obtener una frecuencia estimada para el evento superior. El árbol se puede construir de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba, aunque lo habitual es "de arriba hacia abajo". En un árbol de fallas completo, el evento superior está vinculado a los eventos iniciadores a través de una serie de niveles intermedios donde las condiciones necesarias para la propagación hacia el evento superior se combinan en puertas Y (AND) u O (OR) del algebra de Boole. En un árbol grande, habrá muchos niveles, que aumentan en complejidad y detalle a medida que el análisis se aleja del evento superior.

En la Figura 2-13 se incluye la estructura genérica de un FTA

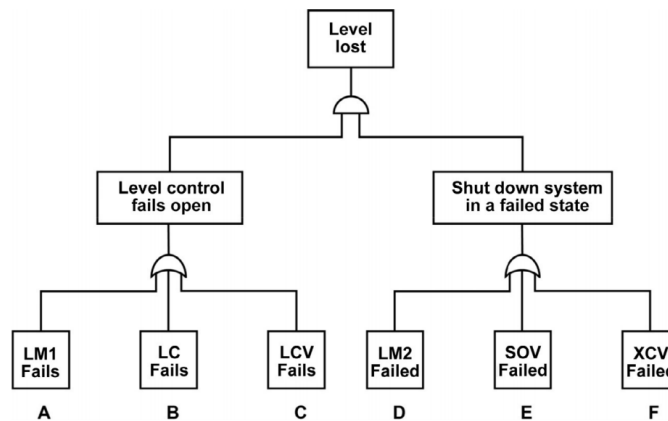


Figura 2-13.- FTA genérico para un evento de pérdida o evento inicial [57]

En este árbol, el evento superior se coloca en el nivel 0. En el nivel 1, cualquiera de las dos causas (puerta OR) conduce al evento, mientras que para que se produzca una de ellas deben ocurrir sus tres causas simultáneamente (puerta AND).

2.3.4.3 Análisis de Causa-Consecuencia y Análisis de pajarita (Bow-Tie)

Se puede completar esta breve introducción con [88], [98] o [99].

Un análisis de causa-consecuencia (CCA de sus siglas en inglés), es una combinación de las técnicas de análisis de árbol de fallas y análisis de árbol de eventos de las secciones anteriores. Como sugiere el nombre, el propósito del análisis de causa-consecuencia es identificar las causas y consecuencias básicas de los incidentes. El análisis de causa-consecuencia (CCA) combina las características de razonamiento inductivo del análisis de árbol de eventos ETA con las características de razonamiento deductivo del análisis de árbol de fallas FTA. Una de las principales fortalezas de un análisis de causa-consecuencia es su uso como herramienta de comunicación. El diagrama de causa-consecuencia muestra las relaciones entre los resultados del incidente (consecuencias) y sus causas básicas. Esta técnica se usa habitualmente cuando la lógica de falla de los incidentes analizados es simple, ya que la forma gráfica, que combina árboles de fallas y árboles de eventos en el mismo diagrama, puede llegar a ser bastante explícita.

Una variación menos formal del análisis de causa-consecuencia es la técnica "**Bow-Tie**" o Análisis de Pajarita. Combina de manera similar las dos metodologías anteriores FTA y ETA, y utiliza el formato de una técnica de investigación de incidentes y análisis de causa raíz. conocido como Causal Factor Charting [100].

La Figura 2-14 muestra el diagrama genérico de una Análisis Bow-Tie.

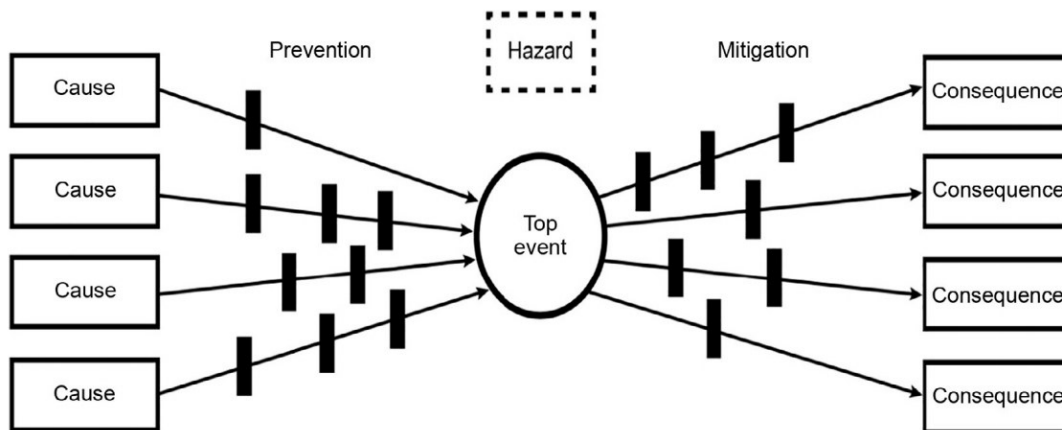


Figura 2-14.- Diagrama genérico de un análisis Bow-Tie [57]

La representación del análisis se asemeja a una pajarita, como se ve en la figura. El lado izquierdo de la pajarita es un árbol de fallas girado 90 grados, mientras que el lado derecho es un árbol de eventos en su representación habitual. Es fundamental que el riesgo más grave se identifique como el evento principal y que se incluyan todas las posibles consecuencias. Cada camino que conduce a una consecuencia muestra las barreras de mitigación que podrían, en este caso, reducir los efectos. La intención fundamental de esta forma de representación como pajarita es proporcionar

una imagen fácilmente comprensible de la gama completa de causas y las barreras en sus caminos que conducen al evento principal. Cuando se desarrolla en las fases iniciales el formato proporciona una visión general frente a los análisis de los árboles de fallas y eventos, que incluyen valores para las frecuencias y probabilidades de fallo asignados a cada elemento.

2.3.4.4 Análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantitative Risk Analysis-QRA)

Tal como se indica en [92] en el análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantitative Risk Analysis QRA), se busca proporcionar a los organismos reguladores o a la administración una herramienta que proporcione la evaluación general del riesgo de la planta. QRA proporciona un método cuantitativo de evaluación del riesgo y proporciona la identificación de áreas para una reducción efectiva del mismo. La Figura 2-15 proporciona el proceso general del QRA.

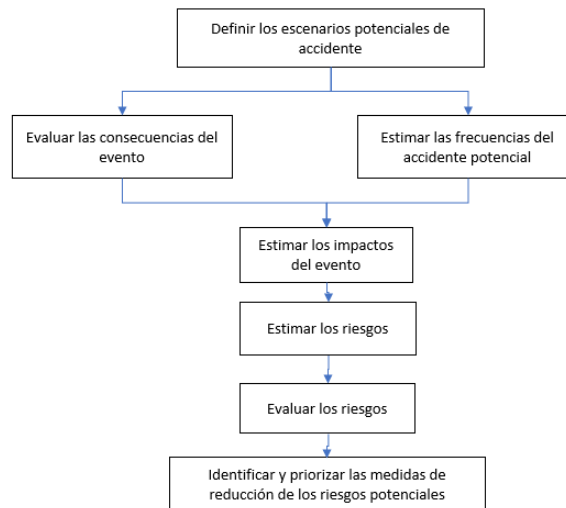


Figura 2-15.- Proceso general para la realización de un análisis Cuantitativo de Riesgos [92]

Lo primero será modelar las consecuencias del suceso considerado. Habitualmente en la industria, los eventos más significativos tienen que ver con la liberación de sustancias al medioambiente, la pérdida de contención incendios, errores de operación, etc. Hay que definir el escenario del accidente para posteriormente modelar la descarga de los materiales del proceso al medioambiente o al emplazamiento. En ocasiones se requiere preparar el modelo de dispersión de las fuentes de escape, las emisiones tóxicas, las cantidades y concentraciones de dichas emisiones, etc. En [101] se puede encontrar metodologías para el modelado de las consecuencias.

En el capítulo anterior se han proporcionado algunos métodos para la estimación de las frecuencias de los sucesos considerados, así se han enunciado los métodos de análisis LOPA, FTA y ETA. En general, los pasos para evaluar las frecuencias de los sucesos, al menos, incluyen los siguientes:

1. Realizar un estudio cualitativo para la identificación de los eventos iniciadores y los escenarios de estudio. Esto es habitual hacerlo mediante técnicas de análisis como el HAZOP, What-If u otras.

2. Para los escenarios de interés, se realiza normalmente un árbol de eventos donde se van incorporando de manera sistemática las causas que los pueden producir
3. A continuación se evalúan las frecuencias mediante el uso de técnicas como el FTA para cada suceso identificado previamente.
4. Para cada escenario se evalúan las frecuencias considerando todos los sucesos anteriores

Para la estimación de los impactos del suceso, términos ya mencionados antes como “el peor escenario” (*worst case scenario*) o el “peor escenario creíble” (*worst credible case scenario*) se suelen considerar en las evaluaciones de riesgos. Cada escenario tiene una frecuencia y una consecuencia (y, por lo tanto, un riesgo) asociadas a él, y la importancia de ese escenario no se puede determinar hasta que el riesgo se haya cuantificado (o al menos estimado). La mayoría de los escenarios de incidentes de altas consecuencias ocurren con una frecuencia relativamente baja. Los ejemplos de eventos que normalmente se clasifican como "peores escenarios creíbles" incluyen roturas totales de líneas de líquido o de recipientes a presión. Independientemente de que estos escenarios de incidentes sean o no los peores desde el punto de vista de las consecuencias, su importancia atendiendo al riesgo no estaría clara a menos que se evalúe un espectro completo de escenarios de incidentes típicos; es decir, incluidos los eventos de consecuencias más moderadas que son las más probables. Por ejemplo, una ruptura de tubería de tamaño mediano que resulta en una explosión de nube de vapor puede tener una consecuencia menor en comparación con la ruptura de un recipiente a presión, pero se puede determinar que el riesgo es mayor una vez que se cuantifican todos los escenarios. Por esta razón, lo más recomendable es que se proceda con la evaluación de una gama representativa de escenarios. Los escenarios no se excluyen basándose en una decisión a priori de "*eso es muy poco probable...*".

El modelado de consecuencias y frecuencias son temas complejos y en evolución y, a menudo, pueden existir opiniones divergentes, incluso entre los expertos, por eso es muy importante que las compañías y las organizaciones establezcan criterios claros y bien definidos con respecto a los supuestos y técnicas aplicables, de modo que, los estudios QRA sean coherentes aunque los expertos cambien. También es habitual que los propios organismos reguladores establezcan determinados aspectos que deben ser siempre considerados de manera estándar con el objeto de que los estudios consideren siempre los escenarios más probables de una manera homogénea.

Es determinante conocer el fin del QRA, es decir para que se usarán sus resultados. Esta asumido que el resultado de un QRA se podrá usar para identificar los principales contribuyentes al riesgo, para comparar alternativas en la gestión de dicho riesgo, para definir niveles de aprobación en función de los niveles de riesgo, para tomar decisiones respecto de ir o no ir ("*go-no go*"), o respecto de la tolerabilidad del riesgo o, finalmente, para conseguir el cumplimiento normativo de la instalación. Respecto de la toma de decisiones para ir-no ir, conviene introducir el concepto de ALARP o “Tan bajo como razonablemente práctico”.

Definición del Principio ALARP As Low As Reasonably Practicable” Tan Bajo como sea razonablemente práctico.

La Figura 2-16 ilustra el modelo de Tolerabilidad de Riesgo (TOR) que es aplicable tanto al riesgo individual como social. [102] que ya está ampliamente adoptado.

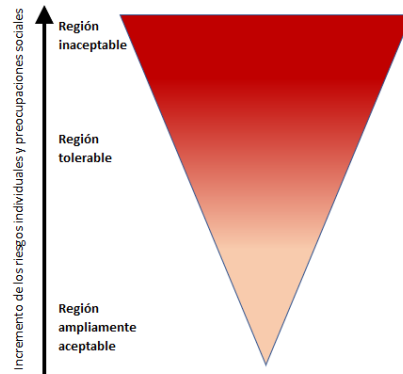


Figura 2-16 Marco de HSE para la tolerabilidad del riesgo [102]

El modelo implica un esquema con tres niveles de acción a medida que se incrementa el nivel de riesgo, tanto individual como social.

- Un nivel superior que representa una región de **riesgo inaceptable**, donde se requiere una mayor mitigación del riesgo. Por encima de este umbral las actividades no pueden ser realizadas si dicho nivel no puede reducirse.
- Un nivel inferior que representa una región de **riesgo ampliamente aceptable** donde el riesgo es tan bajo que no es necesario considerar una mayor reducción del riesgo.
- Entre los dos extremos anteriores se encuentra una región en la que se considera que el **riesgo es tolerable**, pero donde se deben considerar medidas prudentes de reducción del riesgo para su implementación.

Este modelo sugiere la creación de dos criterios de riesgo: un criterio de riesgo superior que define el riesgo máximo tolerable y un criterio de riesgo más bajo que define el riesgo ampliamente aceptable. Muchas empresas y autoridades reguladoras han basado sus criterios de riesgo en este modelo. Otras organizaciones utilizan un modelo de criterio de riesgo de dos regiones modificado que no contiene el criterio de riesgo más bajo y ampliamente aceptable. Este modelo modificado distingue entre riesgos que son *inaceptables* y riesgos que requieren una *reducción adicional y prudente*. El modelo de 2 regiones implica un enfoque de mejora continua bajo el cual la empresa debe permanecer alerta a nuevas oportunidades para reducir el riesgo, sin importar cuán bajo sea el riesgo actualmente.

La clave para la implementación de cualquiera de estos modelos es la cuestión de lo que constituye un *esfuerzo prudente*. El Reino Unido ha abordado esta necesidad con el concepto de reducir el riesgo tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP). Se ha encontrado la siguiente definición para ALARP:

Tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP):

“Concepto que hace que los esfuerzos para reducir el riesgo continúen hasta que el sacrificio incremental (en términos de tiempo, esfuerzo, costo u otro gasto de recursos) sea enormemente desproporcionado con respecto al valor de la reducción del riesgo incremental. Logrado”.

Para detalles respecto del marco TOR consultar [102] y para ver ejemplos de cálculo del riesgo para instalaciones para España consultar [26] y en términos generales consultar [92] y el volumen 1 de [59].

2.3.5 Otros Métodos de análisis

Se pueden citar algunas técnicas adicionales a las descritas en los capítulos anteriores. Algunas se encuentran catalogadas como técnicas de análisis que se basan en escenarios, como es el caso de Risk Analysis Screening Tool (RAST) [103], que se ha venido desarrollando de manera conjunta entre el Centro para la Seguridad de Procesos Químicos (CCPS) de la IChemE americana y el Centro europeo de seguridad de procesos (EPSC) con la contribución especial de la compañía The Dow Chemical Company. Otras técnicas se tratan como técnicas especiales aunque ciertamente disponen de un desarrollo muy similar al del resto de las técnicas tratadas en los capítulos precedentes.

RAST es una colección de herramientas de detección de análisis de riesgos y seguridad de procesos para ayudar a los equipos de evaluación cuando realizan estudios de identificación de peligros y análisis de riesgos (Hazard Identification and Risk Analysis HIRA) al proporcionar coherencia entre los equipos de análisis y, al mismo tiempo, reforzar el protocolo y los criterios de la empresa. Utiliza métodos simplificados y, a menudo, empíricos para cuantificar peligros, consecuencias y riesgos. RAST permite a los usuarios introducir los productos químicos, los datos de reactividad, el tipo de equipo, las condiciones de operación (por ejemplo, presiones, temperaturas) y el diseño de las instalaciones. Luego, RAST usa estas entradas para proporcionar una lista inicial de escenarios de riesgo basada en su base de datos interna. A continuación el equipo encargado del análisis determinará los escenarios finales que serán analizados.

El Manual del usuario de RAST [104] proporciona los detalles necesarios para realizar la evaluación.

Entre las técnicas que se vienen considerando como extensiones de las ya vistas o técnicas de análisis especiales cabe citar las siguientes:

- Evaluación de peligros de operaciones basadas en procedimientos.
- Evaluación de peligros de procesos controlados por sistemas programables.
- Evaluación de peligros de la reactividad química.
- Combinaciones de herramientas, entre las que se pueden citar What-If/LOPA y HAZOP/LOPA, técnica esta última muy usada.
- Análisis de factores humanos y confiabilidad.

Consultar [43] para profundizar en cada una de ellas. Es destacable la evaluación de peligros en operaciones basadas en procedimientos ya que será un elemento básico que se estudiará en detalle en el capítulo 6 para la propuesta metodológica que se encuentra en este trabajo.

Capítulo 3.

La construcción de plantas de generación de energía

3.1 Plantas de generación de energía eléctrica.

3.1.1 Descripción general de las plantas de generación de energía eléctrica.

Tipologías

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) en su último informe estadístico del año 2020 [105] incluye la evolución desde los años 70 hasta la actualidad del consumo energético por fuentes de energía que se incluye en la Figura 3-1.

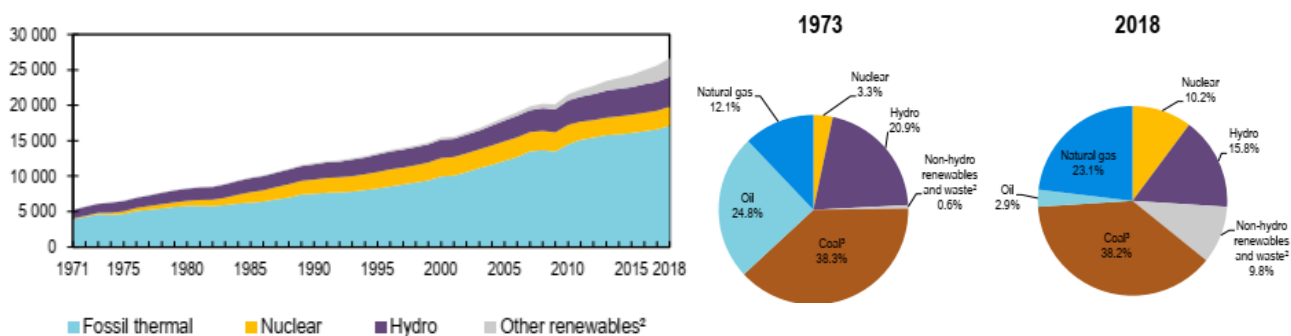


Figura 3-1.- Evolución de la generación de electricidad desde los años 70 hasta la actualidad [105]

Se ha observado un crecimiento creciente de la demanda de energía mundial incluso en los peores años de la última crisis financiera mundial. Por otra parte, la expectativa para los próximos años es la que se muestra en la Figura 3-2.

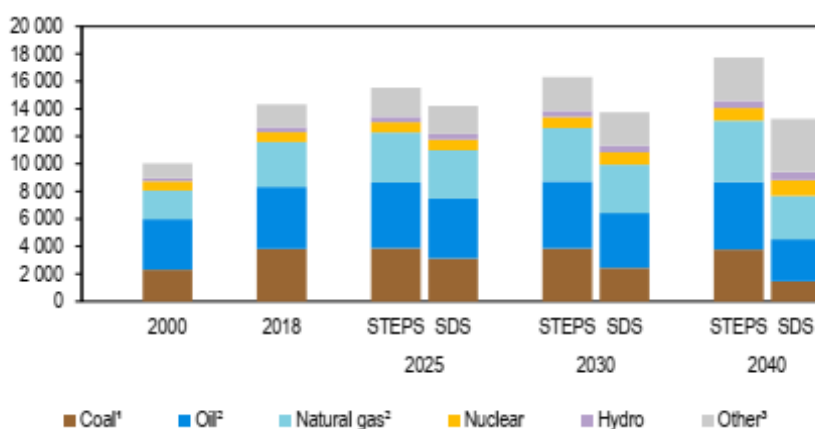


Figura 3-2.- Perspectivas para el suministro mundial total de energía hasta el año 2040 [105]

La grafica incluye el indicador STEPS (STatEd Políticas Scenarío), el cual incorpora las políticas energéticas existentes considerando las intenciones políticas declaradas hasta ahora y el SDS (Sustainable Development Scenario), que considera el escenario 4 de desarrollo sostenible acordado internacionalmente sobre el cambio climático. En ambos escenarios se puede observar cómo existe un incremento notable de las energías renovables en el mundo y una disminución clara del uso de fuentes fósiles. A pesar de esto, las centrales de generación de energía eléctrica que usan fuentes de energía convencional derivadas de combustibles fósiles o que usan el gas natural como fuente de energía primaria tienen todavía un amplio recorrido en el suministro energético mundial a pesar del notable incremento de las energías renovables. La Figura 3-3 muestra la proyección de generación de electricidad hasta el año 2050. Si bien las fuentes de

energía renovable proporcionan el 19% de la generación total en 2020, el 25% en 2030 y 36% en 2050, las centrales de generación de energía eléctrica que usan fuentes fósiles como combustible seguirán siendo necesarias en ese plazo, proporcionando en 2050 una expectativa de producción del 26% contribuyendo además a la estabilidad de la red eléctrica de los países dada su disponibilidad frente a las renovables. Evidentemente, los escenarios que se presentan aquí no consideran todavía el impacto de la última crisis debida a la guerra de Ucrania ni a las consecuencias de la pandemia del COVID-19. Tampoco tienen en cuenta los últimos acontecimientos derivados de ella, tanto en las cadenas de suministros globales, ni en la crisis energética actual.

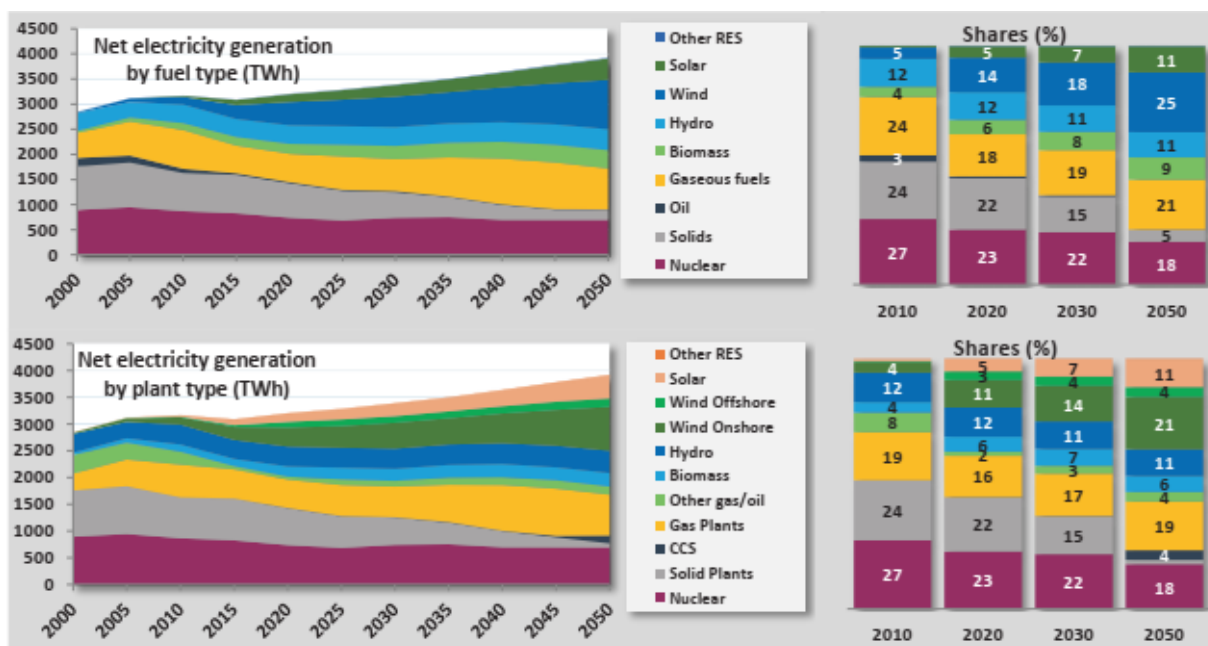


Figura 3-3.- Generación de electricidad por tipo de combustible y tipo de planta hasta 2050 [106]

Recientemente se ha abierto un amplio debate relacionado con la taxonomía verde europea que ordena y clasifica las tecnologías de generación eléctrica para determinar su huella ambiental. Entre los combustibles mencionados en el debate se encuentra el gas natural, el cual está siendo considerado como energía verde o de emisiones inferiores a las tecnologías que utilizan combustibles como el carbón o los derivados del petróleo.

De cualquier modo y como conclusión más general, el sector energético mundial seguirá necesitando de las plantas de generación de energía eléctrica que utilizan fuentes convencionales en los próximos años.

Las plantas de generación de energía eléctrica basan su principio de funcionamiento en la conversión de diversas fuentes de energía en energía eléctrica. Entre las fuentes de energía que actualmente se utilizan para la generación de electricidad se pueden establecer los dos tipos ya apuntados, aquellas que utilizan fuentes de energía renovable y aquellas que utilizan fuentes de origen no renovable.

Entre las fuentes de energía renovable se pueden mencionar aquellas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica utilizando una fuente primaria renovable natural. Así si la fuente

primaria es el agua, se tienen las centrales hidroeléctricas que utilizan como principio de funcionamiento la diferencia de energía potencial de un volumen de agua de un embalse, para mover una turbina hidráulica que se encuentra acoplada a un generador eléctrico. Otra fuente renovable es el viento, donde las centrales o parques eólicos recuperan la energía cinética del viento con una turbina acoplada también a un generador eléctrico. Las centrales solares utilizan la energía solar como fuente primaria. Existen diferentes tipologías de centrales solares, aquellas que utilizan el efecto fotoeléctrico para generar electricidad, conocidas como centrales fotovoltaicas y otras que utilizan la radiación solar como fuente de energía mecánica. Estas últimas transforman la radiación solar en energía calorífica siendo capaces de elevar la temperatura de un fluido caloportador para generar vapor el cual moverá una turbina de vapor conectada a un generador eléctrico. Su funcionamiento es similar al de las centrales convencionales que no usan energía renovable en el circuito secundario o ciclo agua vapor. También se pueden citar otras centrales de generación eléctrica que usan fuentes renovables que actualmente están en desarrollo permanente como pueden ser las centrales de biomasa, las mareomotrices o aquellas que usan hidrogeno como fuente de energía principal.

Las centrales de generación de energía eléctrica que no utilizan fuentes renovables como energía primaria necesitan como fuente de energía primaria un combustible, el cual puede tener un origen fósil, como es el caso del carbón, gas natural o combustibles procedentes del petróleo ya sean ligeros o pesados. El combustible también puede ser de origen nuclear, de origen químico o de origen orgánico como son las plantas de tratamiento de residuos que utilizan la basura como combustible.

En las plantas de generación de energía eléctrica que no usan fuentes renovables es necesario llevar a cabo tres transformaciones de la energía:

Energía química → Energía térmica → Energía mecánica → Energía eléctrica

La energía química del combustible se transforma en energía térmica mediante el uso de un fluido, normalmente agua (aunque en las últimas tecnologías de centrales se están utilizando gases), el cual incrementa su contenido energético de acuerdo con las leyes de la termodinámica. Así según el ciclo termodinámico que se utilice en el diseño de la planta establecerá las diferentes tipologías de las mismas [107]:

- Plantas de motores. Aquellas que usan como principio de funcionamiento el ciclo termodinámico Otto o Diesel.
- Turbinas de Gas, utilizan el ciclo de Brayton como principio de funcionamiento
- Turbinas de vapor o ciclo de vapor, utilizan el ciclo de Rankine como principio de funcionamiento básico
- Centrales de Ciclo combinado, aquellas que utilizan dos ciclos termodinámicos combinando el ciclo de Brayton al utilizar una o varias Turbinas de Gas con el ciclo de Rankine al recuperar los gases de la combustión para cerrar un ciclo de Rankine agua-vapor que alimentará una Turbina de vapor.

En una planta de energía de vapor simple, a medida que circula el fluido, pasa a través de una serie continua de estados mecánicos y termodinámicos cíclicos. El agua entra a un generador de vapor a una cierta presión y temperatura y se convierte en vapor, el vapor de alta presión luego entra a una turbina de vapor y se expande a baja presión mientras pasa a través de la turbina, el vapor de baja presión al salir de la turbina se condensa en un condensador, y el agua condensada se recicla de nuevo a la caldera a la presión y temperatura originales. La Figura 3-4 muestra el diagrama simplificado del proceso.

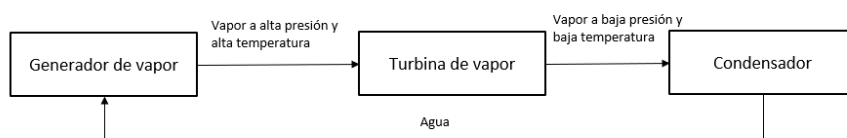


Figura 3-4.- Diagrama simplificado del ciclo termodinámico de una central de vapor simple [107]

No es objeto de este trabajo profundizar en las tecnologías y principios termodinámicos en los que basan su funcionamiento las centrales de generación. Se trata de proporcionar una visión general que permita conocer los procesos, tecnologías y equipos principales que componen las centrales con objeto de entender la complejidad de su construcción, operación y mantenimiento de modo que los riesgos y peligros derivados del proceso y de las actividades de construcción puedan ser identificados y convenientemente evaluados. Existe en la bibliografía multitud de referencias y tratados que pueden ser de utilidad para completar la visión que aquí se dará de las tecnologías. En cada caso se remitirá a la fuente que permite ampliar el detalle que se requiera, pero de modo general se puede consultar [108], [109] o [110].

Aquí solo se considerará la construcción de grandes plantas de generación eléctrica ya que por su complejidad multidisciplinar son objeto de interés. Entre ellas cabe citar las plantas que usan combustibles fósiles como el carbón, el gas natural, ya sea en configuración de ciclo agua vapor, como de ciclo combinado. No son objeto de interés aquí ni las centrales nucleares como resulta obvio, ni las que utilizan fuentes de energía renovable, excepto las centrales termosolares en las que mucho de lo que aquí se trate, en términos generales podrá ser de aplicación.

La Figura 3-5 proporciona una visión general de un diagrama de flujo de una instalación térmica.

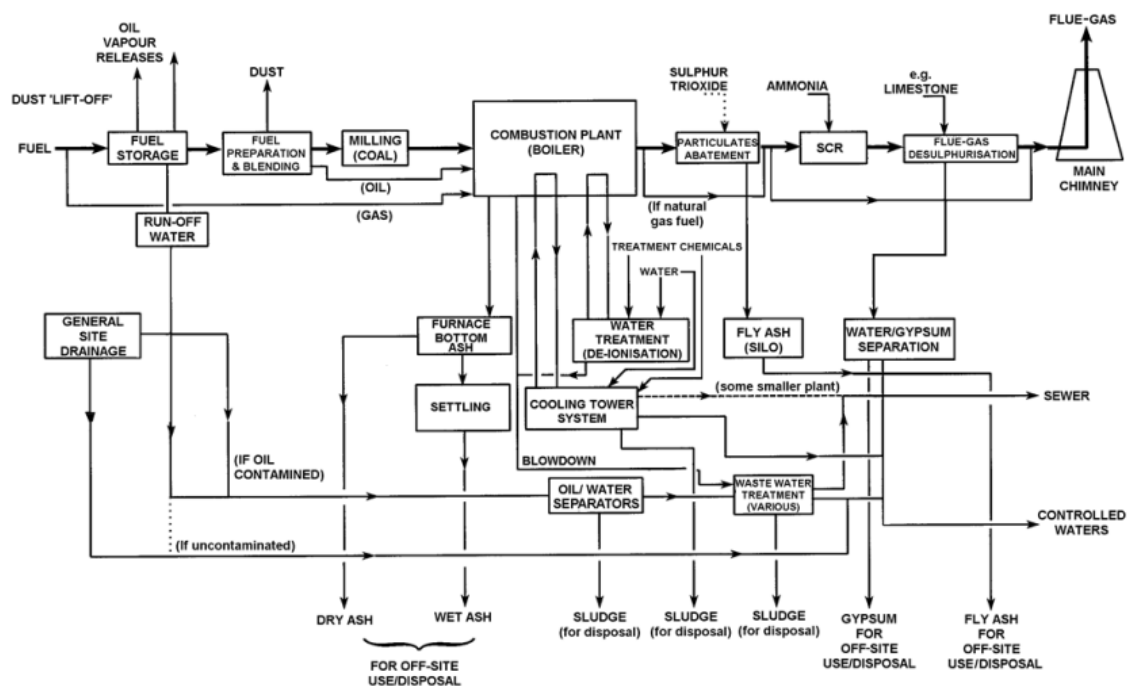


Figura 3-5.- Diagrama de flujo de una planta de combustión y sus operaciones asociadas [111]

El combustible se introduce en la caldera adecuadamente acondicionado en función de sus características. Ahí se produce el proceso de combustión mediante el cual se produce la combinación química de oxígeno con el comburente. De todos los compuestos que constituyen el combustible, solo tres elementos químicos tienen interés desde el punto de vista de la combustión, el carbono, el hidrógeno y el azufre, aunque el azufre tiene una importancia menor como fuente de calor. El carbono y el hidrógeno, cuando se queman completamente con oxígeno, se transforman en CO_2 y H_2O siendo el aire la principal fuente de O_2 para la combustión en las calderas. Los productos habituales de la combustión son las cenizas de fondo y las cenizas volantes, residuos que deben ser tratados convenientemente para evitar el daño al medioambiente. Para reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera basados en óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, es mandatorio en las regulaciones actuales incorporar sistemas específicos, ya sea para el filtrado mediante filtros de mangas o precipitadores electrostáticos o mediante la instalación de sistemas tales como la Reducción Catalítica Selectiva (SCR) o los sistemas de desulfuración de gases entre otros.

En los siguientes apartados se proporcionará una visión general de las principales tecnologías y equipos que conforman las grandes plantas de generación eléctrica.

3.1.2 Plantas de generación eléctrica a partir de vapor.

Basan su funcionamiento en el ciclo de Rankine normalmente regenerativo y con recalentamiento. En la Figura 3-4 se han proporcionado los equipos principales que constituyen la instalación y en la Figura 3-5 se ha proporcionado un diagrama conceptual con los flujos de materia más importantes. Hay tres equipos o sistemas principales que configuran una central de estas características, La caldera o generador de vapor, donde se lleva a cabo la combustión del

combustible y el proceso de evaporación del agua hasta convertirlo en vapor a las condiciones de presión y temperatura adecuadas, la Turbina de Vapor que se encuentra acoplada al generador eléctrico y el Condensador donde se realiza la condensación para cerrar el ciclo agua-vapor. Es en la Turbina de Vapor donde se produce la conversión de energía térmica en energía mecánica y en el generador donde se convierte la energía mecánica a energía eléctrica. Se pueden distinguir entonces las siguientes categorías:

- Generador de Vapor y sistemas auxiliares
- Turbina de Vapor y sistemas auxiliares
- Condensador y Sistemas del ciclo Agua-Vapor
- Sistemas Auxiliares de planta
- Sistemas Eléctricos

3.1.2.1 Generadores de vapor

La energía química disponible en los combustibles fósiles (carbón, fuel-oíl, gas) se convierte en energía térmica por combustión en el generador de vapor. El calor así liberado se absorbe alimentando continuamente agua en una combinación de superficies de transferencia de calor, lo que da como resultado una generación continua de vapor. El agua que se introduce en el generador de vapor se llama agua de alimentación. Los procesos de ebullición en el interior de los tubos de caldera, la circulación natural o forzada en su interior son procesos complejos que han sido estudiados con detalle a lo largo de los años [107], [112]. En la Caldera se pueden distinguir distintos sistemas mecánicos que conducen a su operación adecuada:

- Circuito o Sistema de Agua-Vapor donde se introduce el agua de alimentación que será evaporada a las condiciones de presión y temperatura requeridas. En este sistema también se encuentra el sistema de recalentamiento y sobrecalentamiento.
- Hogar de la Caldera donde se realiza la combustión.
- Sistema de quemadores.
- Sistema de Aire Gases de Caldera donde se incluyen los sistemas de extracción de gases y los sistemas de aporte de oxígeno para la combustión
- Sistemas de alimentación y manejo de combustible. En ocasiones estos sistemas se pueden considerar parte externa de la caldera.
- Sistemas de extracción de cenizas volantes y cenizas de fondo.
- Chimenea de gases.
- Sistemas de limpieza y purificación de gases entre los que se encuentran:
 - Precipitador Electrostático o Filtros de Mangas.
 - Sistemas de reducción catalítica SCR.
 - Sistemas de desulfuración de gases, con los subsistemas auxiliares necesarios, tales como alimentación de caliza, extracción de yesos, planta de tratamiento de efluentes, etc.

Como se puede ver los equipos de generación de vapor tienen una complejidad muy alta por lo que solo se proporcionará a continuación una visión general de los dos tipos de calderas más

importantes que se han venido instalando en los últimos años que disponen de los últimos avances para que el impacto medioambiental sea el menor posible con estas tecnologías.

3.1.2.1.1 Calderas de combustión de carbón pulverizado

En estas calderas se requiere que el carbón sea triturado a un tamaño adecuado para que la combustión se realice correctamente y con el rendimiento previsto. El proceso de pulverización normalmente incluye dos etapas. En la primera etapa, el carbón que se recibe desde los sistemas de almacenamiento (parques de carbón) se tritura a un tamaño comprendido entre los 15 25 mm en equipos de trituración desde donde se envía a los silos diarios antes de pasar a la segunda etapa. La segunda etapa es la etapa de molienda, que se realiza en los pulverizadores o molinos donde se tritura a tamaños finos de acuerdo con las características de los carbones y los parámetros de diseño de la caldera, en términos de tiempo de reacción, etc. Si el carbón no se alimenta a los tamaños de diseño requeridos se reducirá el rendimiento de la caldera, aumentarán las emisiones de contaminantes a la atmosfera e incluso se podrán producir daños en los internos de la caldera. Por otra parte una combustión adecuada del carbón depende además de otros factores como el contenido de materia volátil, reactividad, inflamabilidad, estabilidad de la llama, propiedades de esmerilado o abrasión, entre otras.

La eficiencia de una central eléctrica de carbón aumenta a medida que aumenta la presión y la temperatura del vapor. Esto ha llevado a una demanda de temperaturas y presiones más altas a medida que la tecnología se ha ido desarrollando y esto ha requerido el desarrollo de materiales con mayor rendimiento en condiciones cada vez más exigentes. Las calderas más avanzadas proporcionan vapor a una presión de unos 250 bar y una temperatura de 600 °C con el uso de aceros especiales para resistir estas condiciones de trabajo tan elevadas. El carbón se introduce en el hogar a través de los quemadores. El calor generado durante la combustión puede alcanzar los 1500 °C y su transferencia es radiante y convectiva. El calor radiante se acumula en las paredes del hogar donde el agua circula por las tuberías. El calor por convección de los gases de combustión se captura en los haces tubulares en el recorrido de los gases de combustión que circulan hacia la salida de la caldera. En las calderas convencionales, en el circuito agua-vapor se instala un calderín de vapor que contiene agua-vapor en equilibrio para que el vapor se vaya produciendo a medida que aumenta la temperatura del fluido. Los diseños más avanzados, sin embargo, operan a temperaturas y presiones tan altas que no pasan por una etapa en la que coexisten agua y vapor. En estas calderas, el agua se convierte directamente en vapor dentro de los tubos de agua. Este tipo de caldera funciona en el ciclo designado como *supercrítico*, llamado así porque el fluido termodinámico (el agua), entra en lo que se conoce como fase supercrítica sin pasar por una condición en la que coexisten agua y vapor. La Figura 3-6 muestra las dos configuraciones habituales que utilizan calderas subcríticas (a) y supercríticas (b). La Figura 3-7 muestra una caldera subcrítica y supercrítica de dos fabricantes de primera línea mundial.

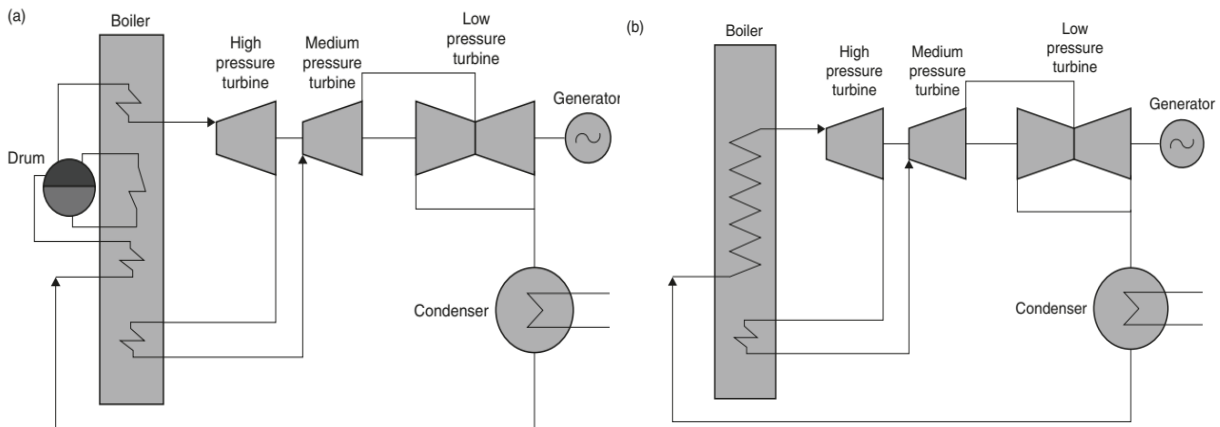


Figura 3-6.- Configuración planta de carbón convencional (a) Subcrítica (b) Supercrítica [110]

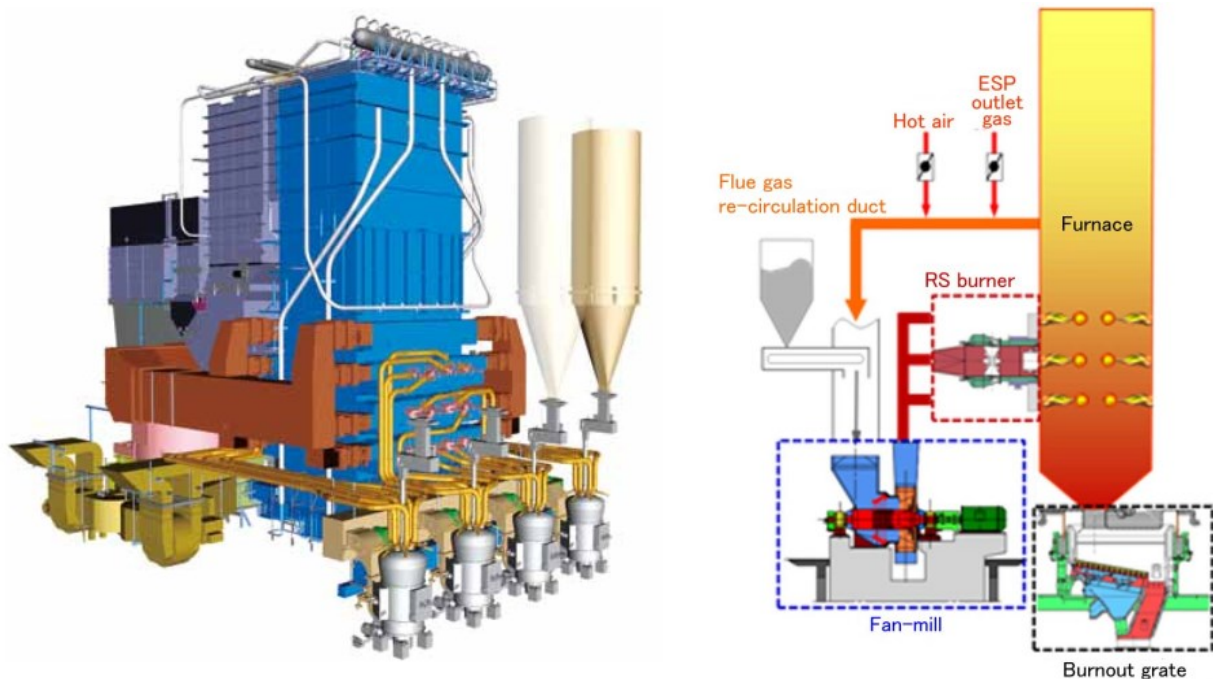


Figura 3-7.- Caldera subcrítica Foster Wheeler (izq.) [113] y supercrítica Mitsubishi (dcha.) [114]

3.1.2.1.2 Calderas de combustión de Lecho Fluidizado

Una de las ventajas principales del uso de esta tecnología es la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera en relación con el SO_2 y NO_x por los procesos de combustión que se realizan en el hogar de la caldera. Igual que en las calderas PC, en las calderas de lecho fluidizado se alimenta carbón molido a un tamaño de unos pocos milímetros, pero se alimenta también caliza molida al hogar donde se tiene un lecho producido por una corriente ascendente de aire que mantiene la mezcla en suspensión mientras se desarrolla el proceso de combustión. La combustión se produce a baja temperatura, en torno a $850\text{ }^\circ\text{C}$ y en el lecho el carbón representa una proporción de material inferior al 5% del total, el resto es caliza y cenizas del proceso. En estas condiciones:

- El azufre del combustible se oxida a SO_2 y este gas reacciona con la caliza, que se descompone para formar sulfatos de calcio. Mas del 96% del azufre es retenido en las cenizas de la combustión.
- Los óxidos de nitrógeno se encuentran en concentraciones comprendidas entre 150 y 300 mg/Nm^3 ya que la combustión se lleva a cabo a baja temperatura.

Existen tres tecnologías diferentes en las calderas de lecho fluidizado:

1. Lecho fluido burbujeante
2. Lecho fluido circulante
3. Lecho fluido a presión

En la Figura 3-8 se proporciona una configuración típica de una caldera de lecho fluidizado circulante. Las principales características de este tipo de calderas se puede encontrar en [115] o en [107] donde se describen en detalle tanto las consideraciones de diseño más significativas así como la descripción de los principales equipos que las componen.

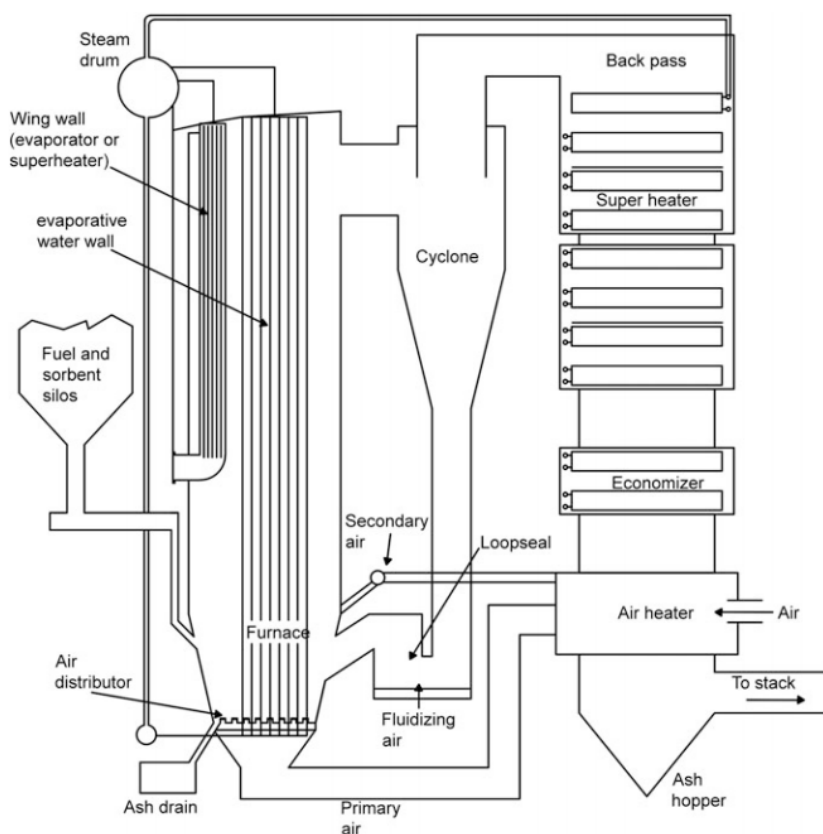


Figura 3-8.-Componentes de una caldera de lecho fluidizado circulante [115]

3.1.2.2 Turbinas de vapor

Junto con la Caldera, la Turbina de vapor es uno de los equipos principales que constituyen las centrales de generación que operan con el ciclo de Rankine. Convierte la energía térmica en energía mecánica mediante la transformación de la energía interna del vapor en energía mecánica que se transmitirá posteriormente a un generador eléctrico donde se producirá electricidad. En una

turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estátor. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estátor también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina. Existen diversas clasificaciones para las Turbinas de Vapor [116] entre ellas según se atiende a:

- Su principio de funcionamiento, se tendrán Turbinas *de acción* o de *reacción* según sea el diseño de sus condiciones de funcionamiento. Ejemplos típicos son las Turbinas Pelton o Kaplan.
- La dirección del flujo de vapor se encuentran tres tipos principales: Turbinas que trabajan con el caudal de vapor en la dirección *radial*, las que trabajan con el flujo de vapor en la dirección *tangencial* o aquellas que operan con el flujo en la dirección *axial*.
- A la presión de suministro se tienen Turbinas de presión *simple, doble presión o mixtas*, las cuales son habituales en las centrales nucleares, no así en centrales térmicas convencionales
- Al modo de extracción del calor, así se tendrán Turbinas *regenerativas* cuando se incluyen varias etapas de extracción de vapor en su expansión; de *condensación*, que son aquellas que minimizan las extracciones en la expansión del vapor y, finalmente, las denominadas como de *contrapresión*, que utilizan la últimas etapas de la expansión para exportación del vapor antes de su condensación.
- A la configuración del rotor se tendrán Turbinas de *Eje único*, de manera que los álabes se encuentran configurados alineados en un rotor acoplado al generador o en varios álabes si se configuran en paralelo en configuración *multiaxial*.
- A las condiciones del vapor a la entrada. Así se tendrán desde Turbinas que operan a bajas presiones 2 bar hasta aquellas que operan a presiones supercríticas, por encima de los 220 bar.

Los principales componentes de una Turbina de vapor son, ver Figura 3-9:

- El rotor, que contiene las coronas giratorias de álabes. Suele ser de acero fundido con aleaciones de Níquel o Cromo. En el rotor se instalan los álabes.
- La carcasa, conteniendo las coronas fijas de toberas o álabes fijos. La carcasa tiene una parte fija, la inferior y una parte móvil, la superior, que se podrá desmontar para acceder al rotor y a las partes internas.
- Álabes, los cuales se instalan en ranuras alrededor del rotor y la carcasa.

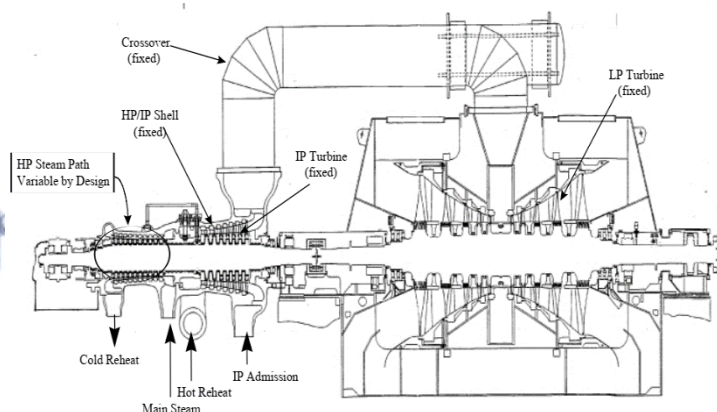
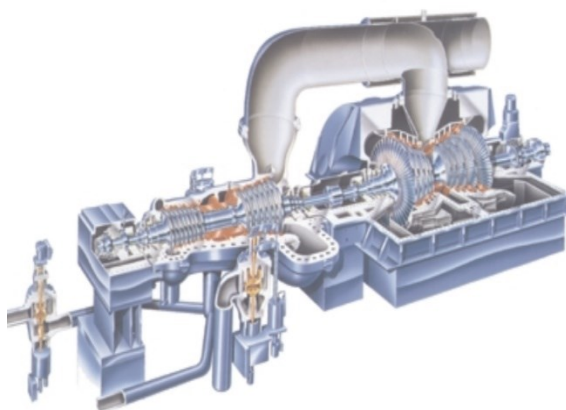


Figura 3-9 Turbina de Vapor D-11 de GE y sección longitudinal [117]

Además, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares, como son los cojinetes, sobre los que gira el rotor, por lo que asegurar la lubricación es fundamental para un correcto funcionamiento y las válvulas de regulación las cuales regulan el caudal de vapor de admisión a la Turbina para su funcionamiento.

Otros elementos y sistemas auxiliares de la Turbina de Vapor son:

- Virador. Es un sistema de engranaje giratorio que se utiliza para forzar una rotación lenta de la máquina en las fases de arranque y parada con objeto de evitar deformaciones o pandeos en el rotor como consecuencia de las variaciones de temperatura en las distintas secciones del mismo. Hay diferentes tipos de viradores, aunque en máquinas grandes pueden ser motores hidráulicos o eléctricos que acoplará con el rotor cuando la velocidad de la turbina sea inferior a un valor y desacoplará cuando sea superior.
- Sistema de lubricación. Es el encargado de asegurar el fluido de lubricación, normalmente aceite, de las partes internas, cojinetes de empuje, de apoyo y reductoras durante su operación. El sistema dispone de un conjunto de tuberías de distribución de aceite a cada parte de la máquina impulsado por un sistema de bombeo, el cual consta de:
 - Bomba principal de aceite, la cual se acciona mediante un acoplamiento al eje de la Turbina, de modo que siempre que se encuentra en funcionamiento la bomba impulsa el fluido de lubricación.
 - Bomba auxiliar de aceite, la cual se acciona por un motor eléctrico para asegurar en caso de baja presión en el circuito de lubricación.
 - Bomba de emergencia, la cual operará en caso de que se produzca una parada de emergencia del Turbogruppo y no exista alimentación eléctrica. Suele alimentarse desde el sistema de corriente continua procedente del sistema de alimentación ininterrumpida de la planta.
- Sistema de refrigeración y sistema de extracción de vapores. Dadas las variaciones en la viscosidad del aceite como consecuencia de los cambios de temperatura que sufre en base a la operación de la máquina, es necesario recoger por un lado los vapores o vahos que se producen y por otro enfriarlo para cerrar el circuito de lubricación.
- Sistema de sellos de Turbina, el cual habitualmente se realiza mediante la inyección de vapor a las partes móviles para evitar la entrada de aire durante su operación permitiendo mejorar su eficiencia al trabajar a valores de vacío altos en el condensador o en las etapas de expansión a baja presión.
- Sistema hidráulico o aceite de control. Usado para accionar los posicionadores hidráulicos de las válvulas de admisión y parada de la Turbina. Consta de un sistema de distribución que opera a alta presión, con valores en el entorno de los 220 bar o superiores y un sistema de bombeo.
- Sistema de control, el cual habitualmente incluye el sistema de gobierno de la Turbina, usado para posicionar adecuadamente las válvulas de admisión de vapor, permitiendo diferentes modos de operación de la máquina, ya sean en control de presión o en control deslizante.

Como parte del sistema de control, se tiene el sistema de protecciones de la Turbina, el cual incorpora mecanismos de protección por sobrevelocidad de la máquina y otros elementos de protección por temperatura, vibraciones u otros. También puede considerarse una parte del sistema de control, el sistema de supervisión y monitorización de la máquina, sistemas expertos y otros sistemas que actualmente se conectan a los sistemas de evaluación predictivos que permiten evaluar el comportamiento de la maquina realizando un mantenimiento predictivo seguro.

3.1.3 Plantas de generación de Ciclo Combinado.

Los ciclos combinados utilizan los gases residuales de la combustión de las Turbinas de Gas para generar vapor en generadores de vapor o intercambiadores recuperadores de calor por el que circula agua para generar vapor que será introducido a una Turbina de vapor para generar electricidad. Las centrales de generación de energía eléctrica que usan la tecnología de ciclo combinado emplean el ciclo termodinámico de Brayton como principio de funcionamiento de las Turbinas de Gas y el ciclo de Rankine para el funcionamiento de las Turbinas de Vapor. Existen diferentes configuraciones para el LayOut de la planta según la tipología de las maquinas a instalar y sus características de funcionamiento. Así se pueden encontrar configuraciones con máquinas monoje, es decir Turbinas de gas que en el mismo eje acoplan una Turbina de Vapor, siendo el Generador eléctrico el mismo para ambas, o en configuración multijeje con generadores diferentes para cada Turbina. La Figura 3-10 muestra una de las posibles configuraciones con los equipos principales que forman un ciclo combinado en configuración monojeje.

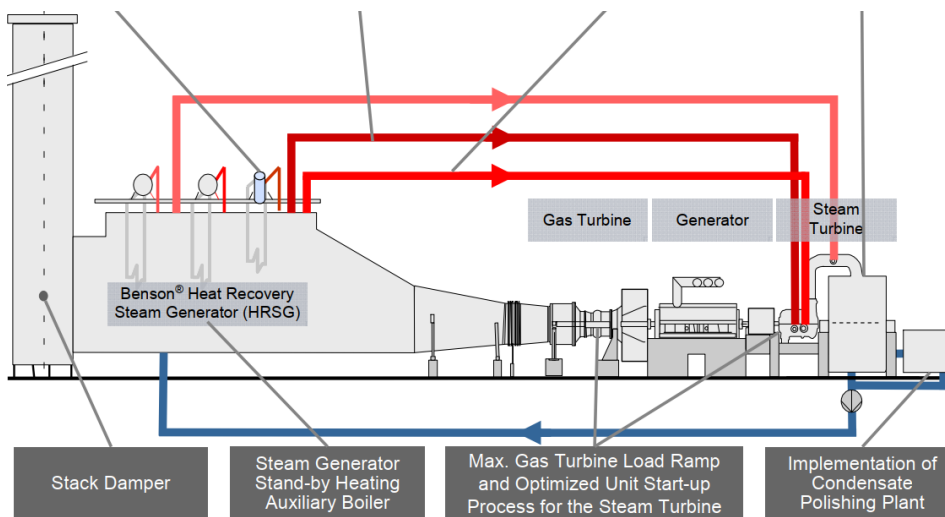


Figura 3-10.- Configuración monojeje de un ciclo combinado con sus equipos principales [118]



Figura 3-11.-Configuración 2x2x1 de GT GE [119]

La Figura 3-11 muestra una configuración 2x2x1 (2 Turbinas de Gas con dos Calderas de recuperación y 1 Turbina de Vapor) de GE.

Los principales equipos que conforman un ciclo combinado son los siguientes:

- Turbina de Gas.
- Generador de vapor HRSG (Heat Recovery Steam Generator).
- Turbina de Vapor.
- Generador Eléctrico.
- Condensador.

3.1.3.1 Turbinas de Gas

La Turbina de Gas es una máquina térmica que extrae la energía del gas de combustión. El gas procede de la combustión con aire del combustible de la Turbina. La Figura 3-12 muestra el esquema principal de funcionamiento de una Turbina de Gas

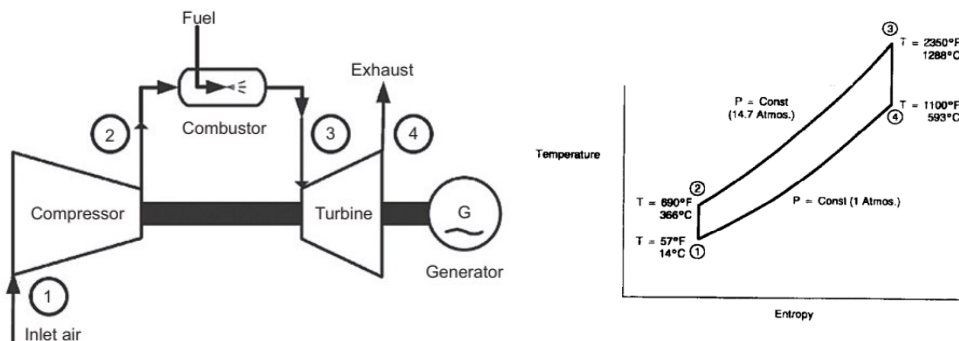


Figura 3-12.- Esquema principal de funcionamiento de una Turbina de Gas [107][120]

Las partes principales de una Turbina de Gas son, tal como se muestra en la Figura 3-12:

- Compresor que eleva la presión de aire.

- Cámara de combustión donde se realiza la combustión una vez pulverizado el combustible en las boquillas de los quemadores y mezclado con el aire a presión.
- Turbina donde se produce la expansión de los gases de combustión convirtiendo la energía térmica en energía mecánica para mover el alternador.

El compresor está acoplado directamente a la turbina y la cámara de combustión está instalada entre ambos. El aire se comprime en el compresor, después se introduce en la cámara de combustión donde se libera energía cuando el aire se mezcla con combustible y se enciende en la cámara de combustión. Como consecuencia de la combustión a presión constante, aumenta la temperatura del aire. Después de salir de la cámara de combustión, los gases resultantes de alta temperatura se dirigen sobre las palas de la turbina de gas, haciendo girar la turbina, que a su vez alimenta el compresor. Finalmente, los gases pasan a través de álabes de turbina adicionales generando más empuje al acelerar los gases de escape calientes por expansión al reducirla a la presión atmosférica realizando un trabajo útil. La energía se extrae en forma de potencia en el eje y se utiliza para mover el generador eléctrico. En comparación con las centrales eléctricas de vapor convencionales con grandes generadores de vapor y condensadores de grandes tamaños, las turbinas de gas, junto con los sistemas asociados, son pequeños lo que les proporciona una gran versatilidad para su instalación.

La Turbina de Gas, al igual que la Turbina de Vapor dispone de las mismas partes y componentes principales descritos antes para esta, como son el rotor, la carcasa, cojinetes, sistemas de lubricación y refrigeración y otros propios de la turbina de gas como son los sistemas de alimentación de combustible, sistema de quemadores y sistemas de control y protección asociados a dichos sistemas de combustión.

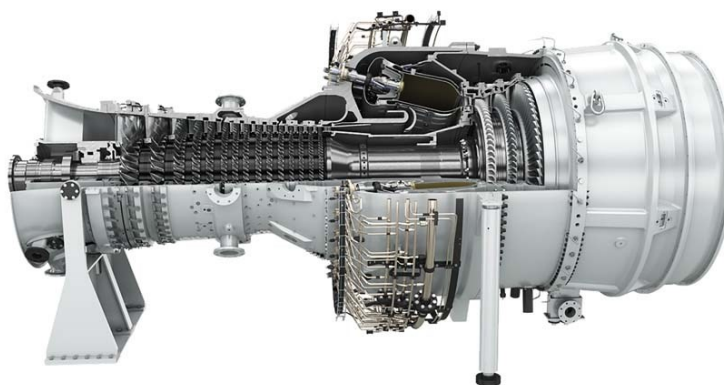


Figura 3-13.- Turbina de Gas Industrial SGT-800 de Siemens [121]

Las turbinas de gas son muy adecuadas para la generación de electricidad en períodos de máxima demanda, ya que pueden arrancar y parar de manera rápida y flexible, lo que permite satisfacer los picos de demanda energética. Funcionan sin problemas y su tiempo de finalización hasta el funcionamiento completo es el más rápido en comparación con otras plantas generadoras de energía. Las turbinas de gas también tienen costos de inversión y de mantenimiento bajos y tienen menos restricciones medioambientales que los motores por ejemplo, los cuales pueden ser

considerados su competencia directa. Entre sus desventajas esta su incompatibilidad con los combustibles sólidos. Hay dos tipos básicos de turbinas de gas: aeroderivadas e industriales. Las unidades aeroderivadas se diseñaron principalmente como motores a reacción de aviones, modificados posteriormente para impulsar generadores eléctricos. Son ligeras y térmicamente eficientes, pero más costosas que las industriales. Las turbinas de gas industriales se utilizan exclusivamente para la generación de energía. La capacidad actual puede llegar a proporcionar más de 800 MW. Las turbinas de gas industriales tienen un costo más bajo por kilovatio instalado que las aeroderivadas, son más resistentes y pueden operar durante más tiempo entre revisiones. Son más adecuadas para la operación de carga base continua con intervalos de inspección y mantenimiento más largos. En [120] para las Turbinas de Gas de GE, en [121] para las de Siemens entre otros, se puede encontrar información relevante acerca del diseño y características de las Turbinas de Gas.

3.1.3.2 Generador de Vapor de Recuperación de Calor (HRSG)

El Generador de Vapor de recuperación de calor HRSG, se sus siglas en inglés, en el ciclo combinado es el elemento encargado de aprovechar la energía de los gases de escape de la turbina de gas transformándola en vapor el cual será introducido posteriormente en la Turbina de Vapor para producir electricidad en el alternador acoplado a ella. Existen HRSGs con post combustión o sin postcombustión, horizontales o verticales entre otras. En la Figura 3-14 se ha representado una HRSG horizontal con dos niveles de presión (alta y baja).

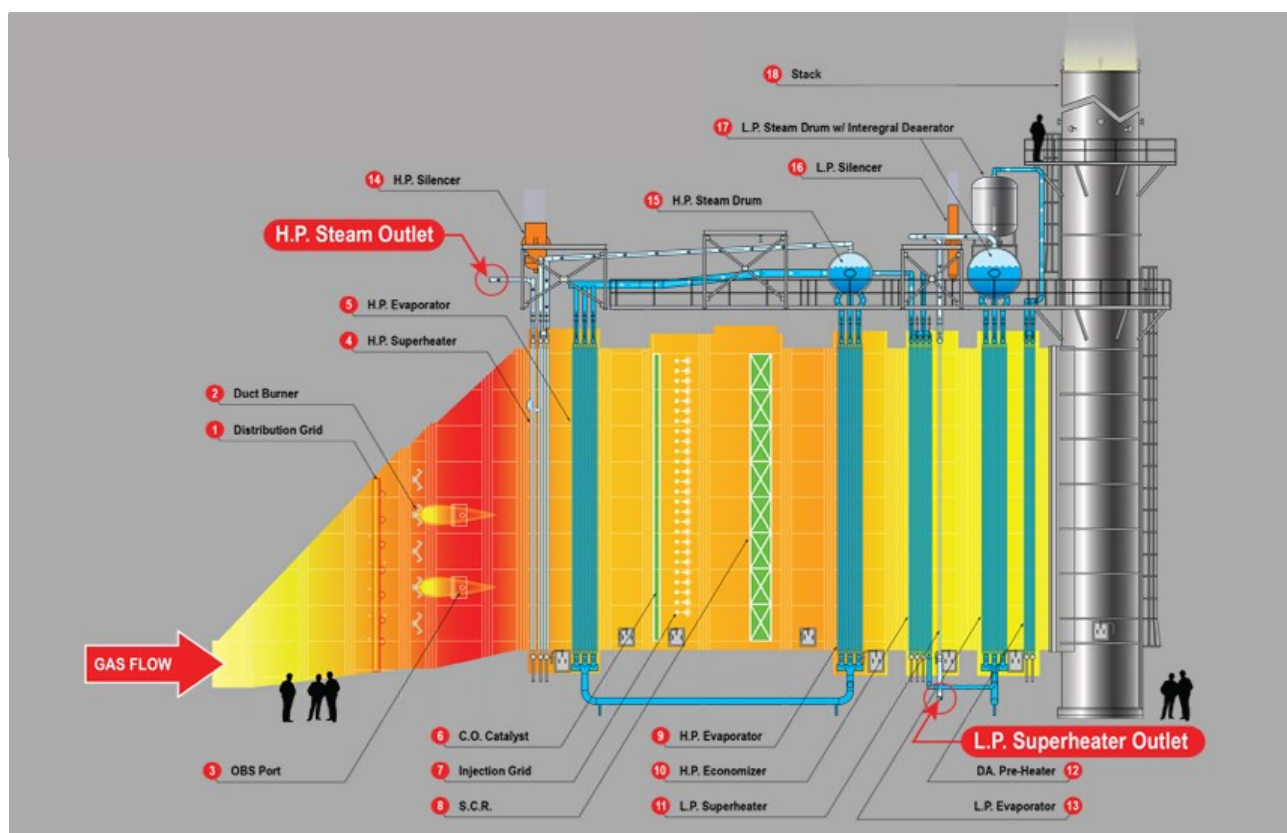


Figura 3-14.- Disposición general de una HRSG con sus elementos principales [122]

Las partes principales de una HRSG son:

- Desgasificador, donde se eliminan los gases disueltos en el agua de alimentación, principalmente O₂ para evitar la corrosión.
- Tanque de agua de alimentación.
- Calderín de vapor donde se produce la generación de vapor.
- Bombas de Agua de alimentación que normalmente trabajan a presiones elevadas.
- Economizador, donde se precalienta el agua de alimentación al entrar en el HRSG.
- Evaporadores, son intercambiadores que aprovechan el calor de los gases de escape de temperatura intermedia para evaporar el agua a la presión del circuito correspondientes. La circulación a través del evaporador puede ser forzada o natural.
- Sobrecalentadores y Recalentadores, son los intercambiadores que se encuentran en la parte más cercana a la entrada de los gases procedentes de la combustión en la turbina de gas.

Se pueden encontrar detalles del funcionamiento relativos a etapas de presión, así como condiciones de operación en arranques, paradas y en transitorios en [109], en [123] o en la bibliografía que se citó al principio de este capítulo.

3.1.4 Cogeneración y otras plantas de generación eléctrica

Las plantas de cogeneración son similares a las plantas de vapor discutidas antes pero se diseñan específicamente para, además de producir electricidad, producir vapor de exportación a otros usos industriales, como puede ser una refinería. También pueden ser usadas para calefacción urbana o “district heating”. Es habitual que al menos el generador que se instale en la cogeneración proporcione energía suficiente para el autoabastecimiento de la propia planta, aunque es normalmente también se dimensiona de manera que se pueda exportar electricidad a la red eléctrica.

Ya se ha citado con anterioridad a las plantas termosolares, con o sin almacenamiento térmico que convierten la radiación solar en energía eléctrica como plantas que en su circuito secundario tienen como principio de funcionamiento un ciclo de Rankine similar al de las plantas convencionales de vapor.

Cualquiera de estas instalaciones dispone de características similares que hacen que lo que se tratará en las siguientes secciones pueda ser considerado aplicable en términos generales en cuanto a tipologías para la construcción de las plantas, obviamente teniendo en consideración las particularidades de cada una y también en cuanto a la metodología que se viene empleando en los últimos años en los proyectos de construcción de estas instalaciones.

3.2 El ciclo de vida del proyecto

Los proyectos de construcción de plantas de generación de energía eléctrica necesitan dotarse de la instalación de infraestructuras de envergadura necesarias para la instalación de máquinas y equipos de grandes dimensiones entre sus actividades principales. La construcción de este tipo de plantas se rige en términos generales por los mismos principios y complejidad que para los grandes proyectos industriales donde se encuentran involucradas todas las especialidades y disciplinas técnicas, siendo necesario establecer para su operativa la implantación de las

metodologías y principios de gestión adecuados. En [124] se proporciona una descripción detallada de la tipología de estos proyectos y en ambos casos, podrían destacarse algunas características comunes:

- a) El tamaño del proyecto en ambos casos requiere de inversiones significativas, requiriendo en el caso de plantas de generación eléctrica de inversiones que oscilan entre los 100 m€ para los proyectos más pequeños, hasta los 1000 m€ para los mayores.
- b) La complejidad, requiriendo de la intervención de múltiples disciplinas técnicas para su diseño y construcción.
- c) La internacionalización, siendo abordados por cualquier organización empresarial en cualquier lugar del mundo.
- d) Los promotores del proyecto. Actualmente la promoción del proyecto puede ser llevada a cabo por cualquier organismo ya que los modelos de ejecución permiten opciones muy diversas permitiendo la entrada al negocio tradicional por empresas alejadas de la explotación de las plantas.
- e) La financiación del proyecto. En la actualidad se articulan formas de financiación del proyecto variadas como es el “project finance” mediante las cuales se puede acceder a la contratación de infraestructuras muy costosas con periodos de retorno largos.
- f) Los esquemas de ejecución del proyecto pueden ser variados.
- g) La estructura de ejecución del proyecto puede requerir de varios participantes con fórmulas de asociación diversas con divisiones de responsabilidades entre los socios, también distintas y muy variadas.

El PMI [125] establece que todos los proyectos, independientemente de su tamaño y complejidad pueden configurarse dentro de la siguiente estructura genérica de ciclo de vida:

- a) Inicio
- b) Organización y preparación
- c) Ejecución
- d) Cierre

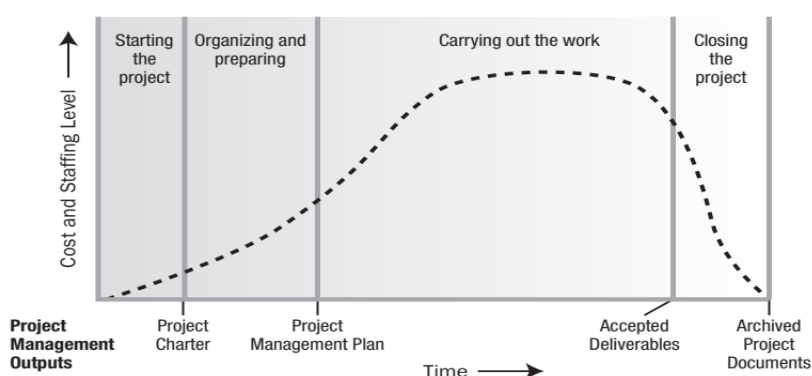


Figura 3-15.- Estructura genérica del ciclo de vida de un proyecto [125]

La Figura 3-15 muestra gráficamente el ciclo de vida de un proyecto en términos de costo y dotación de personal para su ejecución. Interesa aquí destacar que el ciclo de vida es la serie de fases por las que atraviesa un proyecto. Sus fases se determinan en función de las necesidades de

gestión y control de la organización u organizaciones que participan en el proyecto, la naturaleza propia del proyecto y su área de aplicación. Las fases son generalmente acotadas en el tiempo, con un inicio y un final o punto de control. Mientras que cada proyecto tiene un inicio y un final definidos, los entregables específicos y las actividades que se llevan a cabo variarán ampliamente dependiendo del proyecto y la industria involucrada. El ciclo de vida proporciona el marco de referencia básico para la ejecución de cualquier proyecto industrial.

3.2.1 Fases del Proyecto

Los proyectos se estructuran en fases. Cada fase del proyecto es un conjunto de actividades relacionadas de manera lógica, que culmina con la finalización de uno o más entregables. La estructuración en fases permite la división del proyecto en subconjuntos lógicos para facilitar su dirección, planificación y control. En [44] se proporciona un marco de trabajo adecuado para los propósitos de este trabajo adaptados a las particularidades de los proyectos de construcción de plantas de generación. La Figura 3-16 muestra las fases principales de un proyecto de construcción de una planta de generación de energía eléctrica y los dos modos de ejecución que son usados más frecuentemente.

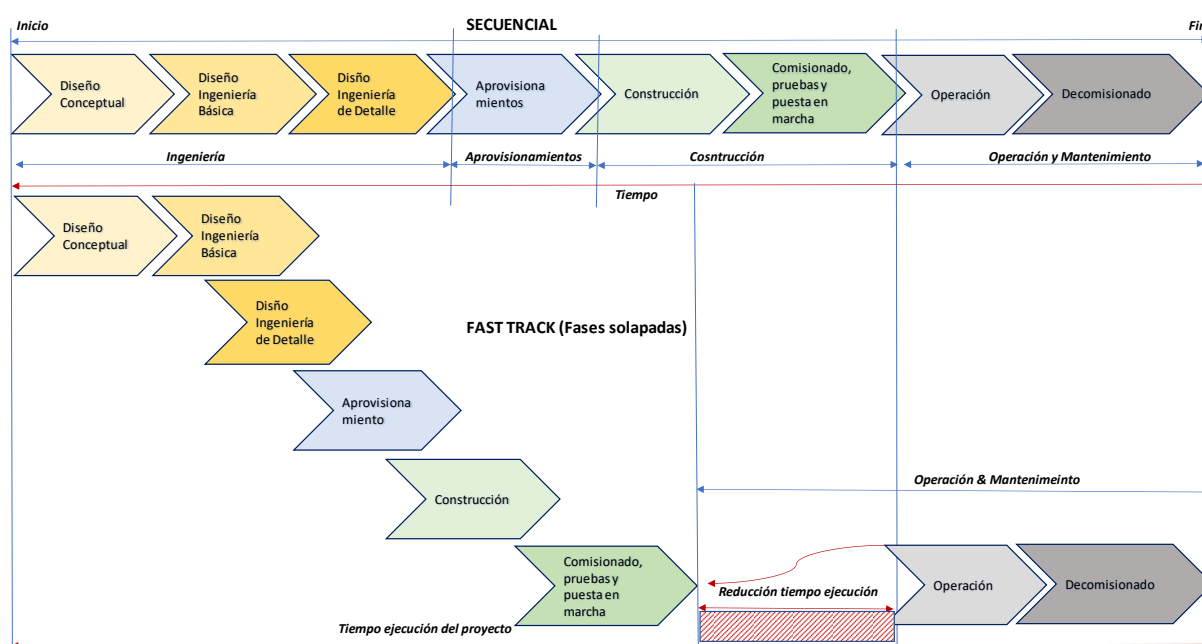


Figura 3-16.- Fases principales de la construcción de una planta de generación eléctrica.

Como se ve, los proyectos se ejecutan normalmente de dos modos diferentes:

- De manera secuencial, de modo que cuando finaliza una fase se inicia la siguiente, tal como se muestra en la Figura 3-16. Esto supone asegurar por un lado la ejecución de cada fase pudiendo verificar de manera inequívoca su cumplimiento. Tiene como inconveniente que es una estructura rígida que penaliza el cronograma o planificación temporal del proyecto.
- Mediante la ejecución con superposición entre las fases. Conocido como “Fast Track” de tal modo que se pueden superponer actividades de unas fases en otras. Con el modo de ejecución Fast Track o de superposición se consigue comprimir el cronograma del proyecto optimizando

y reduciendo los tiempos de ejecución. Esto que puede parecer algo obvio, provoca en muchos proyectos problemas de coordinación, problemas de ejecución y en prácticamente la totalidad de los proyectos incremento de los niveles de riesgo, ya sean asociados a la propia ejecución, como a la seguridad de las personas y el medioambiente al ejecutar actividades de manera simultánea.

Otras consideraciones pueden afectar también a la ejecución de las fases de un proyecto. Así se tienen proyectos que se ejecutan repitiendo de manera intencionada una o más actividades del proyecto de modo que en cada interacción se conoce mejor el producto por parte del equipo del proyecto, conocidos como “Iterativos o incrementales”, o bien los proyectos ejecutados mediante técnicas “adaptativas o métodos ágiles” muy estudiados en la actualidad por su facilidad de adaptación al cambio y las modificaciones durante el propio proceso de diseño y ejecución del proyecto.

3.2.2 Actividades y Objetivos de las fases del proyecto

Atendiendo al esquema de la Figura 3-16, los objetivos de cada etapa se pueden resumir como sigue:

- Fase de Diseño Conceptual. En esta fase se suele definir además de la configuración de la planta, cuáles son los datos básicos de diseño en base a los cuales se establecerán las condiciones medioambientales y operativas en las que funcionará la instalación durante su vida útil. Esto significa que en esta fase quedará definido al menos lo siguiente:
 - i. La tecnología a utilizar y las condiciones en las que operará la planta. Aquí se define el modelo de negocio, determinando también como se realizará la inversión y en qué modo será ejecutado el proyecto.
 - ii. El estudio de impacto ambiental.
 - iii. Es habitual en esta fase realizar un estudio preliminar de riesgos para verificar el impacto de la planta en el entorno y para la seguridad de las personas y el medioambiente.
 - iv. La gestión de las autorizaciones y permisos necesarios con la administración.
 - v. Los límites de batería y el alcance del proyecto. En ocasiones en esta fase se lleva a cabo el estudio del terreno para tener certeza de los costes de construcción.
- Fase de Ingeniería Básica. En otras instalaciones industriales esta fase se entiende como fase FEED (Front End Engineering Design) de sus siglas en inglés, pero en la construcción de plantas de generación no se utiliza esta metodología de trabajo sino que directamente desde la fase de diseño conceptual normalmente se pasa a la contratación en la modalidad de construcción elegida. En el pasado las compañías eléctricas participaban activamente de la fase de ingeniería, aprovisionamientos y construcción, sin embargo ahora ya no es así. En la fase de Ingeniería Básica suele quedar definido lo siguiente:
 - i. La implantación preliminar del proyecto en base a la tecnología seleccionada (LayOut) del proyecto y disposiciones generales de las áreas que lo conforman.
 - ii. Se realiza el plan de ejecución, el plan de aprovisionamientos así como los procedimientos generales que regirán durante la ejecución.

- iii. Se realizan los criterios de diseño del proyecto de todas las especialidades y se establecen los requisitos de HSE que regirán durante toda la ejecución. Estos a menudo incluyen los programas de seguridad que deberán actualizarse durante toda la operación de la planta.
 - iv. Desde el punto de vista del proceso mecánico se desarrollarán los diagramas de flujo y diagramas preliminares P&IDs.
 - v. Se realizarán las especificaciones de suministro de los equipos principales de la planta, tales como calderas de generación de vapor, parques y sistemas de almacenamiento de combustible, Turbina de vapor, Turbinas de Gas, HRSG's, Compresores de gas, etc.
 - vi. Desde el punto de vista eléctrico quedarán definidas las interfases con el operador de la red eléctrica, las subestaciones así como los diagramas unifilares básicos de la instalación. Normalmente los transformadores elevadores de tensión y los generadores en esta fase quedarán dimensionados.
 - vii. Se realizarán todos los estudios y balances de masa y energía para que la configuración de la planta quede cerrada. También se realizan los estudios eléctricos para su implantación en la red eléctrica.
 - viii. Quedará definido el sistema de control principal y los sistemas de protección que se considerarán para la operación de la central. Como se interconectan y como operan en la red eléctrica general.
 - ix. Es habitual en esta fase emitir la planificación detallada del proyecto. Para ello suele ser necesario disponer de listas de materiales que permitan evaluar las cantidades que deben ser aprovisionadas en términos de estructuras, tuberías, cables y volúmenes de obra civil que deben ser realizados.
- Fase de Ingeniería de detalle.
 - i. En esta fase se proporcionan todos los planos con el grado de detalle necesario y suficiente para proceder con la construcción. Así, se realizarán planos de ingeniería civil, modelos en 3D, planos y detalles de montaje de los sistemas mecánicos, eléctricos y de instrumentación y control.
 - ii. En esta fase, además de la ingeniería que se desarrollará por la ingeniería principal del proyecto, se realiza la ingeniería de integración entre todos los suministradores de equipos que a su vez desarrollan su propia ingeniería.
 - iii. Se realiza un control estricto de la planificación o cronograma del proyecto para asegurar su cumplimiento en términos de plazo y coste.
 - iv. Se realizan todas las especificaciones para la compra del denominado "bulk material".
 - v. Se aseguran los diseños de modo que durante la construcción se lleven a cabo el menor número de cambios al diseño.
 - vi. Durante esta fase los especialistas apoyan la gestión de suministros del proyecto mediante la emisión de las requisiciones de compra que incluyen las especificaciones técnicas de los materiales y equipos que componen la instalación.
 - Fase de aprovisionamientos. En esta fase se lleva a cabo la gestión de los suministros y equipos que componen la instalación. Se incluyen aquí, al menos, las siguientes actividades principales:

- i. Gestión de materiales
 - ii. Selección de proveedores
 - iii. Recepción, evaluación de ofertas.
 - iv. Procesos de adjudicación y lanzamiento de pedidos a los vendedores.
 - v. Aprobación de la ingeniería que realizan los diferentes vendedores y suministradores de equipos.
 - vi. Control de calidad de la fabricación.
 - vii. Inspecciones durante la fabricación e inspecciones y recepción de equipos en fabrica.
 - viii. Pruebas de aceptación en fabrica.
 - ix. Transporte y logística para garantizar la llegada a obra.
 - x. Gestión económica de los suministros.
 - xi. Pago de Tasas, importación, exportación y gestión de otros requisitos relacionados con los suministros de materiales y equipos.
- Fase de Construcción. En esta fase se realizan todas las actividades relacionadas con la instalación y montaje de los equipos y sistemas que conforman la instalación. Para ello es necesario realizar actividades de construcción de obras civiles así como el montaje mecánico y eléctrico de equipos y sistemas. Se realizarán actividades tales como:
 - i. Fabricación de estructuras en sitio en talleres de prefabricación
 - ii. Premontaje y ensamblaje de equipos y componentes
 - iii. Control de calidad de la construcción.
 - iv. Gestión de almacén
 - v. Gestión de subcontratistas. En ocasiones la selección de contratistas se realiza directamente por los equipos de obra, mientras que otras compañías centralizan estas actividades como parte de la fase de aprovisionamientos.
 - vi. Gestión del personal en el sitio, maquinaria y servicios de movilidad.
 - vii. Según las compañías, las actividades de precomisionado, entendidas como actividades previas a la puesta en marcha de la planta se realizan en esta fase. En otras compañías el precomisionado forma parte de las actividades de comisionado y lo realizan los equipos de puesta en marcha.
 - viii. Preparación de los paquetes de transferencias a pruebas.
 - Fase de Comisionado. Aquí se lleva a cabo la puesta en servicio de la instalación. Normalmente esta puesta en servicio se realiza a su vez por fases:
 - i. Fase de precomisionado, donde se realizan las pruebas y comprobaciones necesarias para garantizar que el montaje se ha realizado de acuerdo con las especificaciones, de tal modo que los equipos operarán en condiciones seguras. Actividades típicas de esta fase son desde la prueba de señales a los sistemas de control (loop check) hasta operaciones de limpieza de tuberías. La diferencia entre las etapas de precomisionado y comisionado es difusa. En general puede considerarse que el precomisionado incluye todas aquellas actividades que no requieren el movimiento de fluidos por las tuberías. Así, típicamente, la comprobación del alineamiento de un motor o la verificación del rodaje de un motor en frío desacoplado del equipo conducido puede ser considerada una actividad de precomisionado, mientras que el arranque de la bomba acoplada con

el mismo motor con el fluido que transporta puede ser considerada una actividad propia de la fase de comisionado.

- ii. Fase de comisionado propiamente dicha, que incluye la energización de todos los sistemas, la prueba en frío de los equipos, entendida con los fluidos en condiciones fuera de los parámetros de operación, tal como se ha descrito en la fase anterior. En esta fase los equipos eléctricos quedarán energizados y los equipos mecánicos operando en frío, pero todos los sistemas preparados para ser operados en caliente en la siguiente fase. Los lazos de control se habrán preajustado para que cuando operen en caliente se lleve a cabo el ajuste fino. Es importante destacar que en esta fase deben quedar totalmente operativas las funciones de protección y enclavamientos de todos los sistemas que lo conforman. Preferentemente habrán quedado verificados en la fase anterior ya que de lo contrario es muy difícil avanzar con seguridad a esta fase.
 - iii. Puesta en marcha de la planta. Aquí, los equipos y sistemas trabajarán de acuerdo con las especificaciones, proporcionando los caudales, presiones y temperaturas de los fluidos que conforman cada uno. Se generará energía eléctrica y se conectará la planta a la red llevando a cabo todas las pruebas que los operadores requieren para su integración en la red de suministro. Cuando la planta se usa como cogeneración algunas pruebas no son requeridas. En esta fase se ajustarán los lazos de control para que soporten las condiciones normales de operación así como los transitorios y operaciones de emergencia.
 - iv. Dependiendo del contrato que se haya realizado, se procederá en esta fase a la transferencia de la planta al cliente o al operador de la misma (HandOver).
- Fase de Operación y mantenimiento. Esta fase tal como su nombre indica constituye la fase en la que la planta operará en las condiciones para la que se diseñó y parará para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento que los fabricantes de equipo requieren en sus especificaciones.
 - Fase de desmantelamiento y cierre de actividad. En ocasiones se precisa la realización de un proyecto específico que considere todas las actividades necesarias para poder llevar a cabo el cese de actividad de la planta y que su desmantelamiento y reciclado se lleve a cabo en las mejores condiciones posible.

Por supuesto que lo indicado para cada fase está sujeto a variaciones en función de la tipología de los proyectos y de las empresas que lo llevan a cabo, pero en términos generales lo dicho es aplicable a la mayor parte de los proyectos de generación que se realizan en la actualidad.

3.3 Los modelos de ejecución de proyectos en el sector eléctrico

Según Klee [126] existen tres tipologías básicas para la contratación de grandes proyectos industriales, las cuales también pueden ser consideradas aplicables para los proyectos de ejecución en el sector eléctrico:

1. **DBB** (Design-Bid-Build), conocido como Contratación general. Durante décadas fue la metodología de contratación generalmente utilizada y es considerada como la forma tradicional de contratación de proyectos. Aquí el promotor o propietario de la planta es el

responsable del diseño, de modo que es el que tiene bajo su control el desarrollo completo del proyecto. Es un contrato que parte de unas cantidades de materiales a ejecutar y es facturado contra los trabajos efectivamente realizados mediante certificaciones mensuales.

2. **DB** (Design-Build), aquí se incluye también la modalidad conocida como EPC (Engineering-Procurement-Construction). En este modo de contratación, la responsabilidad del diseño es del contratista principal del proyecto de construcción. El promotor o propietario de la planta proporciona las especificaciones técnicas básicas, la normativa aplicable, el alcance del proyecto y los criterios de ejecución de las obras, para que el contratista asuma la responsabilidad global de la ejecución. Es un contrato a precio fijo cerrado (lump sum) y los pagos se realizan de acuerdo con un calendario de pagos acordado entre las partes. Con este método de trabajo el promotor de la planta obtiene una mayor certeza sobre el precio final de la instalación y del plazo de ejecución, mientras que el contratista principal asume un riesgo mayor, por lo que el precio de oferta generalmente contiene un recargo por dicho concepto.
3. **CM** (Construction Management) o Gestión de la Construcción. Esta modalidad incluye el CM “a riesgo” y la contratación de la supervisión de la construcción, también denominada EPCM (Engineering-Procure-Construction Management). En esta metodología el promotor o propietario de la planta asume la contratación directa de los contratistas que ejecutarán las obras normalmente a precio cerrado (lump sum). Por otra parte, de manera separada se contrata a un equipo para la gestión de la construcción mediante un contrato de servicios profesionales. La supervisión de la construcción no incluye normalmente el rendimiento de los contratistas, el cual recae directamente en el propietario, quien es responsable del contrato con estos.

No resulta fácil establecer cuál de los métodos anteriores es mejor y en consecuencia, suelen encontrarse soluciones híbridas que consideran entre otras las condiciones de financiación, las prioridades del promotor o la dificultad del proyecto.

En los últimos años han surgido asociaciones publico privadas (PPP's- Public Private Partnerships) que mediante acuerdos a largo plazo establecen mecanismos de financiación para grandes proyectos de infraestructuras. Entre los sectores donde se vienen realizando esta tipología de proyectos se encuentran las infraestructuras de agua y energía entre otras. Las PPPs pueden adoptar muchas formas diferentes, siendo las más habituales acuerdos BOT / BOO, empresas conjuntas (JV, Joint Venture), leasing o arrendamiento, subcontratación o contratos de gestión y diversas formas de cooperación público-privada [127]:

- BOT ((Build Operate Transfer) Construir, Operar y Transferir. Estos son contratos donde el sector privado asume la responsabilidad principal de la financiación, el diseño, la construcción y la operación de la planta. Una vez finalizado el contrato PPP el control y la propiedad formal del proyecto se transfieren de nuevo al sector público.
- BOO (Build Own Operate) Construir Poseer y Operar. En esta modalidad el control y la propiedad del proyecto permanece en manos privadas. Con un proyecto BOO, la entidad del sector privado financia, construye, posee y opera una instalación de infraestructura de manera efectiva a perpetuidad.
- BOOT (Build, Own, Operate, Transfer) Construir, Poseer, Operar y Transferir. En este modo de contratación la instalación es diseñada, financiada, operada y mantenida por la empresa

concesionaria. La propiedad recae en el concesionario hasta el final del período de concesión, momento en el que los derechos de propiedad y operación se transfieren a la entidad pública.

- Leasing o Arrendamiento. Aquí parte del riesgo se transfiere al sector privado. En esta modalidad el contrato se realiza en modo de concesión de manera que el contrato cubre el diseño, la construcción y la operación, mientras que la financiación corre a cargo del sector público.
- Empresas Conjuntas o Joint Venture (JV). Tienen lugar cuando los sectores público y privado financian, poseen y operan conjuntamente una instalación.
- Contratos de operaciones o de gestión en los cuales el sector privado solo participa parcialmente, por ejemplo, presta un servicio o gestiona la operación. Los contratos de servicio o de gestión permiten al sector privado proporcionar servicios relacionados con la infraestructura durante períodos de tiempo específicos.

Gran parte de los proyectos de construcción de centrales eléctricas que se ejecutan en la actualidad, se realizan en la modalidad de contratación EPC mencionada antes. Muchas consideraciones realizadas por A. Hernández [128], en su análisis para proyectos internacionales, son aplicables para los proyectos de construcción de las centrales de generación eléctrica en esta modalidad de contratación. En primer lugar, es importante saber que no existe una regulación internacional acerca de cómo ha de establecerse la relación contractual entre el cliente/propietario de la planta con el contratista del proyecto. Desde el punto de vista jurídico este tipo de contratos ha venido siendo históricamente una fuente de problemas, lo que los hace atractivos para su estudio [128]. El empleo de esta modalidad de contratos se justifica, entre otros motivos, por la falta de capacidad tecnológica de los países receptores de tecnología, de modo que la utilización de un único contrato que incluya en el alcance la totalidad de las prestaciones hace de los contratos EPC un referente único para su uso. Otro de los factores que se pueden considerar determinantes en los conflictos y disputas que se generan entre promotor y contratista se debe a la inexistencia de una figura jurídica de esta modalidad de contratación EPC. La inexistencia de contratos tipo o estándar que permita la ordenación jurídica a nivel nacional para la resolución de los conflictos ha obligado a que el mercado se autorregule mediante la elaboración de contratos estándar, los cuales se han venido desarrollando por los organismos internacionales mencionados antes, o por asociaciones profesionales como FIDIC (Fédération Internationale des Ingénieurs Conseils) o la ENAA (Engineering Advancement Association of Japan). J. Picha junto con otros autores en [129], analizan los contratos EPC en el sector eléctrico mediante el estudio de cuatro centrales de generación que se ejecutaron bajo esta modalidad de contratación EPC en la República Checa, la Federación Rusa y el sultanato de Omán. Los datos se tomaron de la literatura académica y se completaron con trece entrevistas a propietarios, ejecutivos de empresas contratistas y profesionales legales.

Una de las características fundamentales en los contratos EPC para la construcción de centrales de generación eléctrica es el requisito exigido al contratista de algunos aspectos relacionados con la confiabilidad de la planta, medida en términos de disponibilidad y el rendimiento, medido en términos de consumo específico (Heat Rate) y/o potencia eléctrica bruta y neta exportada a la red eléctrica por la instalación. En otras plantas industriales, el uso y selección de una determinada

tecnología implica que las prestaciones finales de la planta son, a menudo, parte de la responsabilidad del cliente final y el contrato EPC finaliza con la finalización del montaje mecánico (Mechanical completion). Además en los proyectos actuales, muchos de ellos se realizan en la modalidad comentada antes de “Project Finance”, proyecto financiado, lo que se traduce en que el rendimiento y disponibilidad de la instalación es determinante en el cumplimiento del esquema de financiación o modelo de negocio de la planta. El plazo de ejecución del proyecto no solo requiere la finalización mecánica de la instalación si no las pruebas de rendimiento y operación continua de la planta a demanda del operador de red durante un tiempo estipulado en contrato (prueba de Trial run o de funcionamiento continuo).

Por otra parte, es habitual que el contratista principal del EPC realice subcontratos separados para al menos las tres principales áreas de montaje, obra civil, montaje mecánico y montaje eléctrico. Dependiendo de las capacidades técnicas del contratista principal, en ocasiones, todas o parte de las actividades relacionadas con las pruebas y puesta en servicio de la central también se realice mediante su subcontratación.

De acuerdo con [130], existen dos modalidades principales de contratación de las obras: “a tanto alzado” o mediante “precios unitarios”. En el primer caso debe existir un grado de avance de la ingeniería tal que permita la valoración por parte del subcontratista de las partidas de construcción y montaje. Cuando esto no es así, como suele ocurrir en los proyectos ejecutados en la modalidad Fast track, es habitual la contratación mediante precios unitarios. En ocasiones se recurre a otra modalidad “cost plus fee”, a precio de coste mediante certificación o libro abierto, más un porcentaje fijo que será el beneficio industrial de la subcontrata. Aunque la subcontratación por precios unitarios inicialmente no es nada nuevo, en la práctica se ha constatado que cuando se producen retrasos en la entrega de la documentación de ingeniería para la ejecución de las obras, o se producen modificaciones durante la propia ejecución de los trabajos, se producen retrasos evidentes en las actividades de construcción y montaje propias, o en ocasiones impactando en otras actividades o subcontratos, produciendo retrasos encadenados en las diferentes subcontratas con ineficiencias evidentes y falta de coordinación.

Precisamente en estos casos, situaciones habituales en la ejecución de este tipo de contratos, provocan situaciones de estrés en las organizaciones y en las personas alterando las condiciones en las que se evaluaron los riesgos de las obras e instalaciones. Además estas situaciones provocan litigios y conflictos entre los interesados de la construcción provocando descoordinación entre actividades que pueden llegar a resultar peligrosas para las personas, instalaciones o el medioambiente.

Capítulo 4.

Análisis de riesgos en los proyectos de construcción de plantas de generación de energía

4.1 Revisión de la literatura

Existe poca literatura específica acerca del análisis de riesgos en los proyectos de construcción de plantas de generación de energía eléctrica. Los autores no se centran, en general en proporcionar un enfoque global de cómo se llevan a cabo las evaluaciones de peligros y riesgos en este tipo de instalaciones a lo largo del ciclo del proyecto, sino que, en términos generales, estudian o proporcionan metodologías para el análisis y evaluación de la seguridad y los riesgos en determinadas instalaciones o condiciones de estas, ya sea en función de su tipología o de los beneficios que se pretende encontrar con su análisis.

Para la realización de este trabajo, se han llevado a cabo búsquedas bibliográficas selectivas con el rigor científico necesario a través de herramientas de búsqueda, ya sea de las proporcionadas con las principales bases de datos de revistas indexadas, tales como Journal Citation Reports (JCR), Scencedirect de la editorial Elsevier, IEE xplora, o SpringerLink entre otros, o por las herramientas de búsqueda de la propia universidad. También se han consultado la base de datos de Google Scholar, así como ReserchGate y también se han realizado búsquedas en los *papers* de congresos internacionales que incluyen entre sus áreas temáticas las aplicables aquí. Mediante el uso de las principales palabras clave relacionadas con este trabajo, se han obtenido resultados, que en algunos casos incluían referencias fuera del alcance de las centrales de generación, o se referían a centrales nucleares, las cuales han sido convenientemente filtradas mediante búsquedas avanzadas.

Así, en base a los resultados y literatura revisada, se puede establecer una clasificación primaria de la literatura científica que aborda los riesgos de las plantas de generación eléctrica como sigue:

- i. Literatura relacionada con los riesgos operativos o de mantenimiento de las centrales así como de análisis de fallos y su impacto en los costes asociados.
- ii. Trabajos relativos a estudios y análisis de riesgos cualitativos o cuantitativos de centrales térmicas en base a su tipología.
- iii. Automatización de herramientas de evaluación de peligros y riesgos o literatura que recoge análisis HAZOP de algunas centrales en operación
- iv. Otras, como son artículos de opinión o que informan de accidentes ocurridos en centrales como consecuencia de operaciones incorrectas, fugas o explosiones.

Entre los trabajos que pueden ser mencionados dentro del primer bloque se encuentra el trabajo de Chandrana del año 2020 [131], donde se lleva a cabo la identificación de peligros y evaluación de riesgos en una central térmica asociado con las actividades de operación y mantenimiento de dos de los sistemas y equipos principales de la planta, como son, el sistema de manejo de carbón y la caldera, teniendo en cuenta que el combustible es lignito. En el estudio se propone un sistema básico de gestión del riesgo para estos sistemas que son los que se identifican como de mayor probabilidad de ocurrencia proponiendo algunas mejoras en los estándares de seguridad de la planta con objeto de desarrollar estrategias de prevención y control adecuadas.

En la línea del anterior, Safira, Gayuh y Hesty [132], aplican FMEA a una turbobomba de agua de alimentación de una central térmica para encontrar el tipo de mantenimiento recomendado para

cada componente. Después del análisis realizado, se encontró que 9 de los 14 componentes estudiados presentaban un riesgo alto. El mayor de ellos lo presentaba el virador de la turbobomba, que es el componente considerado más crítico, mientras que el que menos criticidad presentaba eran las fugas en línea y válvulas.

Siguiendo en esta misma línea, Buchta y A. y M. Oziemski [133], se realiza la evaluación de la fiabilidad desde el punto de vista de la operación de las unidades que constituyen la mayor central eléctrica de lignito del mundo, que es la central eléctrica de Bełchatów con una capacidad de 5298 MW. Para el análisis se tuvieron en cuenta los incidentes registrados en la planta desde el año 2017, año en la que fue comisionada.

Melani et al [134], aplican HAZOP, FTA y FMEAC a los sistemas de desulfuración de una planta de carbón pulverizado para presentar un método que identifica los componentes más críticos del sistema de modo que se contribuya a la priorización de las acciones de mantenimiento. Los resultados obtenidos proporcionan cuales son los componentes más críticos del sistema que deben ser atendidos de manera específica por el equipo de mantenimiento de la central con objeto de aumentar la disponibilidad de la planta y disminuir el riesgo en su operación.

Putra y Purba[135], aplican FMEA en una central de ciclo combinado de 40 MW en Indonesia para evaluar los fallos de la caldera, la cual se identificó como la principal causa de fallo a partir de los datos de causas de fallo encontradas en un periodo de 4 años, desde 2013 a 2016, en la central. Se aplica FMEA a las cinco causas principales que se identificaron en la caldera, a saber, fallos debidos a tubos de caldera, temperatura del vapor, pérdida de llama, pérdida de combustible o pérdida de combustión. Se obtiene una clasificación que ayudará a los operadores a atender las causas raíz de los problemas principales relacionados con la operación y el mantenimiento de la planta.

Por otra parte, EDP [136], presenta la metodología utilizada para la evaluación de riesgos de la Central Ribatejo en Portugal. Como consecuencia del trabajo se desarrolló un plan de tratamiento de riesgos para la central. Se revisan conceptos, se presentan algunos métodos de evaluación de riesgos y se proporciona un proceso de gestión de riesgos. El análisis de evaluación de riesgos conduce a la elaboración de un plan de tratamiento de riesgos donde se abordan las medidas de mitigación, considerando algunos criterios y los recursos disponibles de la Central Ribatejo mencionada.

El Laboratorio de Control y Monitorización de plantas de generación de la Universidad de Energía del norte de China propone en [137], la construcción de una base de datos con los resultados de los análisis de modo de fallas (FMEA) para unificar el conocimiento y servir como herramienta para la detección de fallos y para la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de centrales eléctricas para garantizar la seguridad y confiabilidad de los equipos.

Constantin et al [138], evalúan los riesgos de los componentes seleccionados de 9 componentes de una caldera y sus líneas de vapor, las cuales trabajan a altas presiones y temperaturas con objeto de elaborar un programa de inspección adecuado en la central.

Un enfoque diferente es el que proporcionan Siquiera y De Souza en [139], donde se evalúan los riesgos de las subestaciones eléctricas con objeto de evitar accidentes y pérdidas de producción a gran escala. Se utiliza una metodología que comprende varios pasos entre los que se encuentran, la definición de niveles de riesgo y modos de fallo en las subestaciones eléctricas. A continuación se procede con la zonificación de áreas y la identificación de los sistemas de protección automatizados, que, mediante el modelado probabilístico de equipos y esquemas de protección, permite la estimación de consecuencias para cada modo de falla y el cálculo e identificación de áreas de riesgo, lo que permite a los autores proporcionar unas recomendaciones de políticas de mantenimiento y protección para reducir el riesgo de la subestación. El método se aplica a una subestación de San Francisco.

Zafra-Cabeza et al [140], proponen la aplicación de la gestión de riesgos para la operación de un ciclo combinado considerando las incertidumbres del proceso. Se aplica un modelo de control predictivo para programar la carga de las Turbinas y un conjunto de acciones de mitigación a ejecutar de acuerdo con un índice de desempeño que considera la generación de energía eléctrica, el consumo de combustible, los ingresos y los costos.

Kumar [141], proporciona enfoque de evaluación de riesgos más global. Se aplica la evaluación de riesgos de la construcción de una central térmica convencional de carbón desde el desarrollo del proyecto, pasando por la etapa de construcción hasta la operación. Los riesgos evaluados se limitan a factores externos, indicadores de riesgo y operaciones del proyecto de modo que, durante el período de construcción, se pueda elaborar un índice de evaluación de riesgos que permita hacer frente a los factores de alto grado identificados proponiendo medidas de mitigación.

Para finalizar los trabajos más relevantes en el apartado de evaluación de riesgos relacionados con la operación y el mantenimiento de centrales, Indrawati et al [142], aplican FMEA a la gestión de un almacén de una central de generación en Indonesia, concluyendo que la principal causa de fallo es la correcta identificación de los materiales.

Respecto del grupo de trabajos que se pueden englobar en el segundo bloque, se pueden destacar los siguientes:

Al Saffar y Ezzat [143], trabajan en los riesgos durante la operación de una central eléctrica ciclo combinado utilizando la identificación de peligros. El estudio se centra en el riesgo durante el funcionamiento en condiciones normales de caldera de recuperación, las turbinas de gas, la turbina de vapor y los generadores. La evaluación se realiza utilizando la técnica de análisis del árbol de eventos ETA durante condiciones anormales de trabajo de los sistemas principales. Los peligros identificados se clasifican según sus consecuencias y amenazas para el funcionamiento de la planta. Para el análisis se eligen tres sistemas principales: la caldera, las turbinas de gas y de vapor y el generador. El riesgo y el peligro se determinan en función de estos tres sistemas durante los transitorios. La evaluación de riesgos se basa en la probabilidad ocurrencia y gravedad de las consecuencias de los peligros identificados.

Alrifaey et al [144], estudian los modos de fallo en los generadores eléctricos de una planta de generación instalada en una planta de refino de Yemen encontrando que los principales riesgos se encuentran en el fallo mecánico y en la fuga de gas del generador, lo que afecta en los modos de

fallo de la planta en su conjunto. El método usado para el análisis de riesgos es FMEA corregido para obtener pesos más precisos en la evaluación de riesgos. El método propuesto se designa como FMEA lingüístico híbrido que utiliza la metodología difusa propuesta por Zahed y otras correcciones para obtener los pesos adecuados y, así, corregir los valores que de acuerdo con su experiencia proporcionan los expertos que participan en los estudios de riesgos.

Musyafa y Adiyagsa [145], aplican HAZOP y FTA al sistema de molienda de una caldera de una central térmica simulando los escenarios del estudio en LabView, con objeto de conocer los peligros y riesgos del sistema. Después de realizado el estudio sobre 17 puntos seleccionados se proporcionan una serie de recomendaciones que pueden ser incorporadas en las instrucciones de operación y mantenimiento del sistema.

Rathod et al [146], describen varios tipos de análisis de peligros y evaluación de riesgos en una central térmica. La central utilizada para la evaluación es una central térmica de carbón pulverizado con configuración convencional. Se identifican y evalúan los peligros dividiendo la planta en 9 áreas diferentes, desde la planta de manejo de carbón hasta la planta de producción de H₂. En cada área se identifican los peligros más importantes, evaluando a continuación en una matriz de evaluación de riesgos la gravedad y probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos por métodos cualitativos, obteniendo una clasificación de los riesgos identificando cuales de ellos se encuentran en un nivel inaceptable. También se recomiendan posibles acciones correctivas para mejorar la medida y el análisis de seguridad.

Siguiendo en esta línea de trabajos, Qi-quan [147] evalúa los riesgos de una planta de generación de ciclo combinado que usa gas como combustible principal de la Turbina de Gas. Se usan técnicas de análisis cuantitativo de riesgos QRA en base al histórico de accidentes y fallos de la planta después de diez años de operación y se aplica el modelo de lógica difusa de MatLab para corregir los pesos de la probabilidad de ocurrencia y consecuencias. El trabajo se realiza atendiendo a los principales riesgos de la central y a los principales factores de influencia para identificar el equipo/sistema de mayor riesgo. Así entre los principales riesgos se identifican el factor humano, la Turbina de Gas, la Turbina de Vapor, el sistema de gas, el sistema eléctrico, la caldera HRSG, los factores ambientales y los factores de gestión. Entre los principales factores de influencia se consideran los defectos de los equipos, la falta de control y la conciencia de seguridad de las personas. Al aplicar las correcciones de la metodología propuesta se llega a la conclusión de que la Turbina de Gas y en concreto la línea de gas es el elemento con más riesgo de la planta principalmente por el sellado del equipo y la imposibilidad de detectar fugas de gas.

El trabajo desarrollado por A. Ahmad et al [148] considera el estudio de dos accidentes que se producen en dos centrales diferentes localizadas en Malasia, casos de estudio para la identificación de peligros, evaluación y mitigación de riesgos (designado como HIRAC de sus siglas en ingles), para cada una. El enfoque de este estudio está relacionado con accidentes en el puesto de trabajo y tienen poca relación con el objeto de este trabajo. También tiene un enfoque similar el desarrollado por Yongbo et al [149], donde se estudian las implicaciones de salud ocupacional en un entorno de una central térmica mediante técnicas ISM (Modelado estructural interpretativo).

Respecto de los trabajos que se pueden considerar incluidos en el tercer bloque, Gu et al [150], proporcionan un método de comparación de casos llamado CBR-Gray, que integra el enfoque Delphi y la teoría del sistema gris. El trabajo proporciona un método de selección de casos el cual es usado por el grupo de expertos para evaluar los riesgos relacionados con la operación de una planta termoeléctrica. El método y la selección de casos se ensaya en una central al este de China proporcionando resultados aceptables frente al tradicional juicio de los expertos, el cual desde el punto de vista de los autores presenta algunos retos para realizar una correcta y objetiva evaluación de riesgos, siempre desde un punto de vista operacional de la planta en términos de estabilidad operativa y económicamente segura. Se trata de seleccionar el mejor de los casos que se han producido con anterioridad de modo que los índices aplicables a la evaluación tengan la mayor subjetividad posible y se aproximen al máximo a la realidad. El estudio tiene componentes fundamentalmente probabilísticos y estadísticos, no tanto aplicables a los objetivos de esta tesis.

Yang et al [151], proponen un modelo matemático para la evaluación de la seguridad de un sistema para centrales térmicas integrando el proceso de jerarquía analítica difusa, el análisis de pares de conjuntos y el análisis de la funcionalidad del sistema. Sobre esta base, se analizan los factores clave que influyen en la seguridad de la central térmica y se concluye que el método es útil para asegurar las fuentes de datos, pero se reconoce la dificultad que entraña la gran cantidad de cálculos propuestos, lo que hace necesario el desarrollo informático. Algunos trabajos relacionados con este se pueden encontrar en [152] o en [153].

Aplicación del control inteligente se ha desarrollado en los últimos años para automatizar la evaluación de riesgos en centrales. Por ejemplo se han desarrollado aplicaciones de lógica difusa, las cuales incorporan la utilización de motores de inferencia con cuantificadores difusos mediante la incorporación de variables lingüísticas, ha tenido una gran difusión a lo largo de los últimos años. Algunos ejemplos se tienen en [154], [155], [156] y [157]. El uso de redes neuronales difusas [158], redes bayesianas [159], [160], principalmente en líneas eléctricas de evacuación de energía en centrales, incluso también con el uso de sistemas difusos [161] también puede ser destacado.

Por otra parte Zhang et al [162], proponen un método de modelado para evaluar la seguridad de los equipos y sistemas de centrales térmicas mediante la aplicación y combinación del método SDG (Signed Directed Graph) con el HAZOP, SDG-HAZOP, el cual se estructura en base a grafos y técnicas de jerarquías analíticas (AHP). El método lo aplican al control de nivel de un desaireador de una central térmica para evaluar la respuesta del sistema ante perturbaciones y desviaciones utilizando la técnica de evaluación propuesta.

Conviene destacar separadamente los resultados del grupo de trabajo del foro de prevención de pérdidas por incendios de la India "*Fire Loss Prevention Forum of India*", el cual después de sus trabajos, publica en 2018 el libro blanco [163], donde se obtienen las siguientes conclusiones y aspectos más destacables:

1. A partir del estudio de 10 casos de accidentes graves producidos en este país en los últimos años se identifican las principales áreas de riesgo de la planta como sigue:

- Riesgos de rotura de equipos que conducen a la pérdida de generación de energía. Los equipos principales como son la Turbina de Vapor, Caldera y Generador se identifican como los de mayor riesgo.
 - Riesgos de incendio y explosión, identificando hasta 7 áreas o sistemas diferentes desde el aceite de lubricación, hasta el manejo de combustible, pasando por los cables de potencia y los transformadores principales.
 - Otros sistemas como los de corriente continua y baterías o los Aerocondensadores también se identifican como potenciales peligros en la planta.
2. Se revisa la legislación aplicable a los proyectos de construcción de centrales térmicas de la india, concluyendo que deben ser actualizados para acomodar sus requisitos a las tecnologías e instalaciones actuales.
 3. Los integrantes del grupo acuerdan difundir los resultados del estudio a los reguladores e interesados del sector.

Finalmente, como parte del último bloque, conviene destacar algunos artículos relacionados de revistas de divulgación general, que aunque no tienen el necesario rigor científico, ilustran de manera muy efectiva las consecuencias de algunos accidentes que se han producido en la industria eléctrica en los últimos años. Algunos también tienen carácter divulgativo de la seguridad en este tipo de instalaciones. Así, el grupo de usuarios de ciclos combinados [164], reflexiona acerca de las causas raíz de los accidentes que se producen en una planta de ciclo combinado y como pueden ser reducidas. Una revisión divulgativa de la seguridad en las plantas de generación se proporciona en [165], pasando por los riesgos eléctricos, los de la caldera, hasta los riesgos químicos.

Respecto de accidentes que han encontrado una repercusión importante en los últimos años, se pueden mencionar los siguientes:

- NFPA en su publicación del año 2011 [166], profundiza en el accidente ocurrido en la planta de Kleen Energy en Estados Unidos. La explosión, que ocurrió el 7 de febrero de 2010, fue causada por el soplado de tuberías con gas, según la investigación de la Junta de Seguridad Química de los Estados Unidos (CSB) [167]. El soplado con gas es un procedimiento de limpieza muy usado en las plantas de energía alimentadas con gas natural, donde se sopla el propio gas a través de las tuberías a alta presión para eliminar los restos del interior de las tuberías después de su montaje. NFPA respondió a este accidente mediante la creación de un nuevo estándar, NFPA 56 (PS), el cual actualmente prohíbe el uso de gas para realizar estas tareas de limpieza. Se utilizarán desde entonces sistemas temporales para la limpieza de estas tuberías por medios diferentes al uso del propio gas.
- Uno de los accidentes con más víctimas mortales de los últimos años se produjo en Noviembre del 2017 en una planta térmica de carbón en India, tras la explosión de la caldera. En [168] se relata cómo se produjo el accidente y se incluye un video de instantes después de la explosión, El número de víctimas ascendió a 43 en el momento de la crónica.
- Mención por haberse producido muy recientemente es el accidente reportado en una central térmica en India por la explosión de la caldera con el resultado de cinco víctimas mortales [169].

Después de la exhaustiva revisión realizada, se puede asegurar que no existe una tradición arraigada en el sector de la industria de generación de energía eléctrica centrada, específicamente, en el análisis de riesgos y prevención de accidentes, con líneas de investigación claras y centradas en aspectos específicos que puedan ser establecidos por los interesados en esta industria, como si existe en otras, por ejemplo la industria petroquímica o de oil & gas. Las plantas de generación de energía son instalaciones complejas que requieren análisis y revisiones de seguridad complejas, si se pretende abordar de una manera eficaz la seguridad de la planta desde un punto de vista completo. Sectorialmente, los estudios y análisis de seguridad en la industria eléctrica no han sido pioneras nunca, excepto para el caso de las instalaciones nucleares, a pesar de que han provocado numerosos accidentes a lo largo de los años, si bien hay que reconocer que ninguno de ellos de la repercusión mediática ni social como si se ha producido en otros sectores, como el de refino o el nuclear, donde la sociedad en su conjunto ha reaccionado exigiendo estándares más rigurosos en sus instalaciones. Quizás esta sea una de las razones por la cual probablemente, el sector eléctrico no ha tenido la necesidad de emprender este camino como si lo han tenido que emprender los sectores mencionados.

El libro blanco del grupo de trabajo de FLPMI del año 2018 da prueba de ello, recogiendo entre sus tres principales conclusiones la necesidad de revisar los estándares de seguridad local aplicables a las centrales térmicas o la necesidad de distribuir entre las organizaciones empresariales o a los principales interesados del sector, sus conclusiones en relación con los riesgos de este tipo de instalaciones.

En los capítulos siguientes se va a realizar una revisión exhaustiva de los estudios y análisis de riesgos que se realizan de manera sistemática en las distintas etapas de los proyectos de construcción de centrales eléctricas, proporcionando una visión general del alcance de dichos estudios y sus principales resultados.

Se prestará especial atención a los análisis de riesgos que se llevan a cabo relacionados con la seguridad en el proceso, la cual no debe ser atendida exclusivamente en la etapa de ingeniería, si no en todas y cada una de las etapas. Ciertamente, si la seguridad del proceso no se atiende en la etapa de ingeniería, evidentemente será difícil corregir el diseño inadecuado en etapas posteriores, pero en todas ellas deberá ser tenido en cuenta, como se verá más adelante. El sector eléctrico maneja sustancias lo suficientemente peligrosas como para atender los mismos conceptos que se manejan en otros sectores. El cumplimiento de estándares relacionados con los sistemas de protección y seguridad de los procesos deben ser incorporados a los análisis y estudios de riesgos, tal como se ha venido incorporando en las últimas décadas los estudios de peligrosidad y operatividad HAZOP, los cuales hasta no hace tantos años no formaban parte de los estudios estándar en la etapa de ingeniería.

4.2 Análisis de riesgos y ciclo de vida del proyecto

De acuerdo con el Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos del Instituto Americano de Ingenieros Químicos [170], la estrategia para reducir el riesgo, ya sea por reducción de la frecuencia o por disminución de las consecuencias, se pueden clasificar en una de cuatro categorías siguientes:

- **Inherente:** Con esta estrategia se elimina el peligro mediante el uso de materiales y condiciones de proceso que son menos peligrosos, por ejemplo usando agua como disolvente en lugar de un disolvente inflamable.
- **Pasivo:** Minimizar el peligro a través del diseño de los equipos y de los procesos de manera que se reduzca bien la frecuencia o bien las consecuencias del peligro sin el uso de otros dispositivos; por ejemplo, construyendo una contención alrededor de un tanque de combustible de manera que sea capaz de confinar su contenido en caso de fuga.
- **Activo:** Mediante el uso de sistemas de mitigación que detecten y respondan a las posibles desviaciones del proceso de su funcionamiento normal. Así se utilizan sistemas de control, sistemas de alarmas y sistemas instrumentados de seguridad, entre otros; por ejemplo, instalando en el mismo tanque del ejemplo anterior un interruptor de nivel que parará la bomba de llenado cuando se alcance el nivel alto.
- **Procedimental:** Mediante la aplicación de políticas de seguridad, procedimientos de operación, sistemas de capacitación y formación del personal, controles administrativos, sistemas de respuesta de emergencia y otros enfoques de gestión que prevengan incidentes o para minimizar sus efectos; por ejemplo, procedimientos de trabajo en caliente y permisos de trabajo. Estos enfoques se conocen comúnmente como controles administrativos.

Las cuatro categorías contribuyen al incremento de la seguridad del proceso analizado. La secuencia natural para analizar, reducir y gestionar el riesgo se considerará de forma jerárquica, de manera que primero se intentará eliminar el peligro mediante la seguridad inherente, luego mediante la incorporación de elementos pasivos, si con ello no se consigue se utilizarán elementos de mitigación activos y finalmente se implementarán controles administrativos tales como procedimientos de operación específicos. La diferencia fundamental entre la seguridad inherente y las otras tres categorías es que la seguridad inherente busca eliminar el peligro en la fuente, a diferencia de aceptar el peligro e intentar mitigar los efectos. Si se implementa de manera eficiente la primera categoría, el Diseño Inherente más Seguro **ISD**, de sus siglas en inglés, la implementación de otras capas de protección y sus costos asociados en tiempo y costes, pueden no ser necesarios o en todo caso mucho más limitados. Forma parte de la misión de la dirección del proyecto y de la dirección de la empresa proponer un diseño **ISD** que permita la disminución del riesgo a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

En los capítulos siguientes se propone una revisión de los estudios de seguridad y análisis de riesgos que se llevan a cabo en el proyecto de construcción de una central de generación eléctrica. Se seguirá la estructura y guía propuesta por CCPS en [44] y que considera la relación de este enfoque con el que también se da en [42] el cual se sustenta en los cuatro pilares básicos mencionados ya mencionados previamente, a saber:

- Compromiso con la seguridad del proceso:
“El Plan de HSE para el Proyecto y los estándares de ingeniería demuestran este compromiso”.
- Comprensión de los peligros y los riesgos
“El diseño de las nuevas instalaciones requiere el conocimiento del proceso, la identificación de peligros y el análisis de riesgos”.
- Gestionar los riesgos
“Las nuevas instalaciones requieren integridad, operabilidad y mantenibilidad por personal competente”.
- Aprender de la experiencia
“Las lecciones aprendidas de instalaciones similares deben incorporarse a las nuevas instalaciones”.

Las relaciones significativas con los elementos de seguridad del proceso se muestran en la Tabla 4.1.

Pilar RBPS	Elemento RBPS	Actividades del proyecto relacionadas con el elemento RBPS
Compromiso con la seguridad de los procesos	Cultura de seguridad de procesos	Presente en todas las actividades del proyecto
	Cumplimiento de normas	Utilizar estándares y "buenas practicas de ingeniería"
	Competencia en seguridad de procesos	Involucrar a empleados y contratistas competentes
	Participación de la fuerza laboral	Responsabilidades de seguridad en el diseño, construcción y operaciones para empleados y contratistas.
	Alcance de las partes interesadas	Consultar e informar sobre los riesgos potenciales durante la planificación y ejecución del proyecto
Comprender los peligros y los riesgos	Gestión del conocimiento de procesos	Incorporar conocimientos sobre materiales, tecnología y equipos.
	Identificación de peligros y análisis de riesgos	Identificar peligros y evaluar riesgos asociados Identificar medidas para la reducción de riesgos
Gestionar el riesgo	Procedimientos operativos	Desarrollar procedimientos para la puesta en servicio y las operaciones.
	Practicas seguras de trabajo	Desarrollar procedimientos para las actividades de construcción Planificar y realizar la instalación y la puesta en servicio previa
	Integridad y confiabilidad de activos	Asegurar la mantenibilidad y confiabilidad, especialmente SCE Garantizar la calidad del diseño, la adquisición y la construcción
	Gestión de contratistas	Prequalificar a las empresas contratadas candidatas Garantizar que los servicios contratados cumplan los objetivos de seguridad
	Garantía de formación y rendimiento	Capacitar a empleados y contratistas Certificaciones para ingenieros, inspectores y técnicos
	Gestión del cambio	Evaluar los cambios de diseño posteriores a HAZOP Evaluar los cambios propuestos desde el personal en campo
	Disponibilidad operacional	Confirmar que los activos una vez instalados cumplen con las especificaciones de diseño Confirmar que no hay acciones y / o documentación pendientes
	Realización de las operaciones	Taplicar a todas las actividades del proyecto Abordar rápidamente las actividades / condiciones inseguras
	Gestión de las Emergencias	Desarrollar planes de respuesta de emergencia para la construcción y las operaciones
Aprender de la experiencia	Investigación del incidente	Incorporar lecciones aprendidas de instalaciones similares Investigar incidentes con rapidez
	Medición y métricas	Recopilar, analizar y archivar datos
	Auditorías	Llevar a cabo revisiones técnicas independientes
	Gestión de la Revisión y mejora continua	Evaluar si todos los elementos de RBPS funcionan según lo previsto y producen los resultados deseados

RBPS : Risk Based Process Safety.- Sistema de gestión de seguridad basado en riesgos

Tabla 4.1.- Relación entre las actividades del proyecto y los pilares básicos de RBPS [44].

Como puede verse en esta tabla, casi todos los elementos de un sistema de gestión de seguridad de procesos basado en riesgos tienen alguna relación con el desarrollo del proyecto.

Aunque se prestará especial atención a los aspectos relacionados con la seguridad del proceso haciendo hincapié en las técnicas más usadas en los proyectos de construcción de centrales, se revisarán todos los aspectos relacionados con la seguridad industrial a lo largo de las etapas del ciclo de vida del proyecto, atendiendo a las particularidades y especificidades de este tipo de instalaciones.

Para la selección de los métodos de análisis que se han venido aplicando, históricamente, a los proyectos de construcción de centrales térmicas en cada una de las etapas de su ciclo de vida, se ha estudiado una amplia muestra de proyectos (69 proyectos en total), realizados en los últimos 25 años por distintos contratistas y tecnólogos internacionales, todos ellos considerando el ciclo de vida del proyecto desde su etapa temprana hasta la recepción e inicio de su operación comercial. La mayor parte de los proyectos estudiados han sido realizados en la modalidad de ejecución EPC.

4.3 Las etapas de diseño previo

4.3.1 Equipo de HSE para el proyecto

En el apartado 3.2 se ha discutido el ciclo de vida del proyecto y las principales fases de que consta. Se ha proporcionado también una breve descripción de los alcances que típicamente se tienen en cada fase.

Es habitual que al inicio del proyecto, tanto el promotor de la planta, bien directamente, o bien a través de la ingeniería contratada que realizará las funciones de Ingeniería de la Propiedad, así como el contratista principal, nombren un equipo de especialistas de HSE. El equipo de HSE asignado al proyecto gestionará y coordinará las actividades relativas al cumplimiento de los requisitos legales y contractuales en materia de HSE. Aunque esto es lo habitual, conviene señalar que aún todavía existen compañías en el ámbito de la industria eléctrica que entre sus departamentos técnicos no disponen de un departamento específico para realizar estas tareas de HSE, lo cual es un síntoma del retraso que se viene produciendo en el sector en relación con la implantación de muchas de las actividades y estudios que se realizan específicamente en estas áreas. Lo anterior sin perjuicio de que en el ámbito de la construcción, las figuras relevantes en obra sí que se designan específicamente un responsable de HSE para acometer estos trabajos y planes de seguridad y salud laboral.

Asumiendo que se trabaja con el esquema general, entre las actividades que vendrá a realizar el equipo de HSE para el proyecto, se encuentran las siguientes:

- Coordinación con el equipo de HSE del cliente o promotor de la planta
- Identificar, aplicar y verificar el cumplimiento de los requisitos medioambientales de aplicación en el proyecto, en función del alcance contractual y la legislación ambiental de aplicación.
- Realizar, cuando sea requerido, los Informes de Seguridad Seveso o “Major Hazards Reports” según donde se esté realizando el proyecto.
- Lista de sustancias peligrosas y fuentes de escape.
- Criterio de clasificación de sustancias peligrosas. El establecimiento de criterios de clasificación claros es necesario para la preparación de las listas de sustancias peligrosas, identificar servicios, sistemas de protección contra incendios, detección de Fire & Gas, áreas clasificadas, o requisitos de ignifugado, entre otros. Además, es muy conveniente que el cliente se encuentre alineado y de acuerdo con los criterios establecidos, en el caso de que no los fije directamente.
- Revisión del diseño de la instalación (modelado 3D), para cumplimiento de la normativa de aplicación en cuanto a Seguridad y Salud Laboral y prevención de riesgos laborales, tales como separación mínima entre equipos, disposición de los mismos en planta, escaleras, accesos y viales, vías de escape, manejo de materiales, áreas protegidas por ruido, zonas de carga y descarga de químicos, etc.
- Asegurar el cumplimiento de los niveles máximos de ruido que se han de respetar tanto en el interior (ruido ocupacional), como en el exterior de las instalaciones (ruido ambiental).

Formará parte de esta actividad el desarrollo o subcontratación a una tercera parte de los estudios predictivos preliminares y finales de ruido para que el diseño de la planta se realice adecuadamente. La campaña o campañas necesarias para medición de ruido (base, de fondo) y verificación de cumplimiento también están en su ámbito de responsabilidad.

- Ingeniería de Factores Humanos y Ergonomía cuando sea de aplicación.
- Participación y supervisión en la Clasificación de Áreas Peligrosas en base a la normativa de aplicación y términos contractuales.
- Emisión del Estudio de riesgo de explosión, estudio ATEX o documento de Protección Contra Explosiones, cuando así lo requiera el Contrato.
- Definición de las emisiones, inmisiones y efluentes del proyecto, en estado gaseoso, líquido o sólido, tales como gases de combustión en chimeneas, venteos de válvulas de seguridad o durante la puesta en marcha, emisiones de polvo de procesos de manejo, transporte y almacenamiento de sólidos, combustibles o residuos y emisión de efluentes líquidos y posibles vertidos contaminantes, entre otros.
- Con carácter general en los proyectos de generación, se puede emitir radiación térmica, producida por los equipos en los cuales se produce un proceso de calentamiento, combustión o incineración, así como en los equipos y sistemas en los que se producen reacciones químicas exotérmicas, para la cual es necesario tomar medidas de protección y seguridad en la fase de ingeniería.
- Participación en el diseño de los sistemas de detección de fuego y gases, conocidos como sistemas de Fire & Gas, así como en los sistemas de protección contra incendios.
- Elaboración del Estudio de Riesgo de Incendio cuando sea requerido.
- Asegurar y especificar la instalación en planta de toda la señalización de HSE (rutas de escape, áreas de manejo de químicos, áreas peligrosas, ubicación de equipos de emergencia, puntos de encuentro, etc.) necesaria para para la operación segura de la planta.
- Especificación de los Requisitos de Seguridad (SRS) y Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS). La SRS es el documento que registra todo el ciclo de vida del sistema instrumentado de seguridad SIS incluyendo en él todas las funciones instrumentadas de seguridad, sus niveles y todos los parámetros que las definen. Durante la fase de ingeniería, habitualmente a continuación del HAZOP, se realiza un estudio para asignar a cada una de las funciones instrumentadas de seguridad que forman parte del SIS un SIL requerido, que se determina en función de la criticidad de cada caso. Este estudio se denomina Asignación o Determinación del SIL. Es muy habitual también que la categorización SIL se defina simultáneamente con el estudio HAZOP utilizando la metodología LOPA. Posteriormente, mediante la arquitectura y la selección de elementos, debe garantizarse el cumplimiento con el nivel requerido (fase de verificación del SIL).

4.3.2 Estudios y análisis de riesgos en la fase de diseño previo

La variabilidad de estudios a incluir en las etapas previas de un proyecto depende en gran medida de las prácticas empresariales del promotor o propietario de la planta. Los estudios de viabilidad y selección de la tecnología variarán en función de la empresa que acometa el proyecto. No es lo

mismo que el proyecto lo lleve a cabo una utility o un promotor financiero; el enfoque será muy diferente y los estudios que se realizarán en esta fase probablemente también. Mientras que una buscará probablemente la mejor tecnología que se adapte a la explotación u operación comercial posterior, dentro del marco operativo de la compañía, la otra probablemente buscará la mayor rentabilidad en el menor plazo posible. El enfoque de los estudios previos será diferente, incluso dependiendo del tipo de planta a instalar, no será lo mismo plantear instalar y buscar la mejor localización de una planta térmica que aproveche el carbón de una mina próxima o una central de ciclo combinado situada en las proximidades de una planta de regasificación.

De cualquier modo, además de los objetivos técnicos y comerciales, el promotor de la obra deberá identificar los aspectos de seguridad, salud y medioambiente para las distintas alternativas, los cuales, en algún caso pueden resultar determinantes para la propia viabilidad del proyecto.

En general, en esta fase se realizan estudios de dos tipos, relacionados con la Seguridad Industrial y los relacionados con la Seguridad del Proceso.

Entre los estudios relacionados con la *Seguridad Industrial* se encuentran los siguientes:

- **Estudio de Impacto Ambiental (EIA)** – Habitualmente se recibe como datos de entrada para realizar el proyecto en la etapa de inicio de los trabajos de ingeniería. La aprobación de la autoridad gubernamental es condición habitual para el inicio de las obras y para poder proceder con el contrato. El EIA es un documento técnico que se realiza para valorar los impactos ambientales de un proyecto sobre el medio ambiente y en él se especifica la información necesaria para evaluar los posibles efectos significativos del proyecto sobre el mismo. Su principal objetivo no es otro que adoptar las decisiones más adecuadas para prevenir y minimizar dichos efectos. En el EIA se debe incluir las afecciones del proyecto, tanto en su fase de construcción como en su operación posterior. Debe incluir un inventario ambiental del estado del lugar antes de la instalación de la planta y de los efectos de la implantación tanto positivos como negativos, en relación con los efectos, tanto permanentes como temporales y aquellos irreversibles.

En los proyectos EPC, habitualmente los contratos establecen que dentro del alcance del promotor o propietario de la planta se encuentra desde la solicitud y tramitación de todos los permisos medioambientales hasta la gestión ante las autoridades administrativas de los mismos. Sin embargo, es también habitual que la documentación e información técnica necesaria a proporcionar en cada fase del proyecto a las autoridades competentes, se encuentre dentro del alcance del contratista principal del contrato.

Forma parte del equipo de HSE del proyecto el análisis del EIA, el cual es determinante en el marco de ejecución del proyecto, la asignación de responsabilidades a cada disciplina técnica que debe atender su cumplimiento y finalmente, la identificación del estado de los permisos ambientales y su impacto en los hitos del proyecto en términos de plazo y coste, entre otras.

- **Estudios Seveso o “Major Hazards Reports”**. – De manera similar a lo que ocurre con los permisos ambientales, el Cliente, es el responsable de obtener la aprobación de los informes de seguridad requeridos por las autoridades competentes. No obstante, es cada vez más habitual

que los clientes incluyan en el alcance del contratista principal del contrato la preparación de dichos informes de seguridad, limitándose simplemente en su alcance a proporcionar la información necesaria para su preparación y a dar el soporte para su tramitación ante las autoridades competentes. No en todos los casos la inclusión de este alcance es clara, si no que a veces queda incorporado dentro de los requisitos de cumplimiento con la normativa, y ahí es donde puede estar el problema, implícitamente se encuentra incluido en el alcance del contratista, pero no se ha declarado de manera explícita, lo que puede provocar que no se realicen los estudios necesarios en cada etapa y en el momento en el que sea requerido por las autoridades no se pueda proceder con los pasos siguientes con los consiguientes problemas e impactos en plazo y costes consiguientes.

En este caso, según se vio en el capítulo 2, con carácter general dichos informes de seguridad constan de las siguientes secciones:

- Política de prevención de accidentes graves.
- Sistema de gestión de dicha política.
- Identificación de los accidentes graves, la cuantificación de sus consecuencias y el cálculo del riesgo asociado a los mismos.
- Las medidas para eliminar el riesgo o reducirlo a niveles ALARP, tanto de ingeniería como a nivel de procedimientos operacionales y de seguridad.
- El Plan de Emergencia Interno y la coordinación con el Plan de Emergencia Externo.

Por lo tanto, es probable que se tenga que dar respuesta a todas o algunas de las diferentes secciones del informe de seguridad para lo que se requiere de la contribución de diversas especialidades coordinadas por el equipo de HSE.

- **Evaluación de Riesgos para la Salud HRA (Health Risk Assessment)**. – La evaluación de riesgos para la salud (también conocida como evaluación de salud y bienestar) es una de las herramientas de detección más utilizadas en el campo de la promoción de la salud y, a menudo, es el primer paso en los programas de promoción de la salud de múltiples componentes. La evaluación de riesgos para la salud es un cuestionario de salud, que se utiliza para proporcionar a las personas una evaluación de sus riesgos para la salud y la calidad de vida. Normalmente, una HRA incorpora tres elementos clave: un cuestionario, un cálculo o puntuación de riesgo y alguna forma de retroalimentación.

Es muy poco habitual que este tipo de estudios se realicen de manera sistemática en los proyectos de ejecución de plantas térmicas, aunque las administraciones y organismos gubernamentales cada vez son más exigentes con su elaboración, sirva como ejemplo la guía de aplicación editada por la comunidad de Madrid, precisamente para este fin. [171].

- **Paquete de documentación básica para permisería**. – En ocasiones se precisa elaborar paquetes diferenciados para la tramitación de permisos por áreas diferenciadas de la planta o ejecuciones diferenciadas. Por ejemplo se puede tramitar la ejecución de la obra civil hasta cota cero, con unos requisitos diferentes de los que se requerirán en la construcción posterior. Dentro de este paquete en ocasiones se incorporan requisitos relacionados con la seguridad industrial a nivel preliminar.

Entre los estudios relacionados con la *Seguridad del Proceso*, lógicamente a nivel preliminar, es habitual encontrar los siguientes:

- **Estudio HAZID.** – Habitualmente lo realiza en su estadio más temprano el cliente, pero es habitual repetirlo en la etapa de Ingeniería Básica, lo más pronto posible una vez firmado el contrato. Según se realice en un momento o en otro, se tendrá el HAZID conceptual o el HAZID detallado. En el apartado siguiente se describe con algún detalle cómo se aborda este estudio en los proyectos de generación térmica. Como se verá existen estudios de identificación de peligros muy especializados para el fabricante (OEM, Original Equipment Manufactured) y estudios HAZID con diferentes grados de detalle. Los estudios HAZID es conveniente realizarlos en una etapa lo más temprana posible, de manera que se puedan identificar los peligros y amenazas del proyecto anticipadamente para que se puedan incorporar en el desarrollo del proyecto todas las barreras y medidas de mitigación como parte del desarrollo del propio proyecto. De esta forma no se incurrirá en costes adicionales para el contratista y las medidas estén previstas desde el propio desarrollo conceptual como coste de inversión (CAPEX) del proyecto.
- **QRA Preliminar.** - En ocasiones este análisis se denomina Análisis Conceptual de Riesgos (CRA, Concept Risk Analysis). El QRA preliminar elaborado en esta etapa tan temprana evalúa asuntos estratégicos que pueden resultar claves para la propia viabilidad de la planta, asuntos tales como su ubicación definitiva, la localización, el entorno y los habitantes de la zona, las infraestructuras básicas necesarias, logística y otros que se puedan identificar determinantes respecto a la tecnología, al proceso, etc. El HAZID conceptual normalmente proporciona la base para identificar los escenarios que pueden resultar de interés para el QRA. El QRA preliminar se puede entender como una forma simplificada del QRA, el cual utilizará los datos básicos de una determinada tecnología genérica combinada con los datos específicos del sitio donde se instalará la central, combinándolos adecuadamente para poder estimar cuantitativamente los riesgos a los que estará sometida la planta. Debido a la naturaleza básica de la información disponible sobre las tecnologías y procesos en esta etapa del proyecto, el análisis utiliza datos procedentes de la industria, como son datos genéricos de la probabilidad de incendios / explosiones para instalaciones similares, etc.

Conviene destacar en este punto dos estudios que en otros sectores se vienen realizando de manera sistemática en esta fase en los últimos años y que por el momento no se ha incorporado en las etapas de diseño previo para los proyectos de construcción de centrales térmicas:

- Revisión de diseño previo realizada desde el punto de vista del *Diseño Inherentemente más Seguro (ISD, Inherently Safer Design)* ya mencionado antes en este trabajo. Como se ha mencionado, el diseño inherentemente más seguro es aquel que evita los peligros en lugar de controlarlos, reduciendo la cantidad de material peligroso, diseñando equipos para las peores condiciones de operación y reduciendo el número de operaciones peligrosas en las instalaciones. El diseño inherentemente más seguro busca la eliminación o reducción del

peligro en el diseño antes de su gestión y control. Cuanto antes se aplique el diseño ISD más efectivo será. Aunque se pueden aplicar en etapas posteriores, la experiencia de CCPS [172] y de otros autores [173], indica que cuanto antes se aborde el diseño ISD por los especialistas, más seguro será el diseño de la planta. La aplicación del diseño inherentemente más seguro seguramente ni resulta tan obvio como puede serlo para la industria química, ni de aplicación tan directa como en dicha industria, pero los conceptos que lo rigen si pueden ser objeto de estudio para la industria de plantas de generación eléctrica. El uso de una bomba diseñada precisamente para lubricar cuando el equipo no tiene otra posibilidad de lubricación, como es el caso de una bomba de lubricación de emergencia en las Turbinas o diseñar un tanque para la condición de vacío, de modo que se pueda garantizar su integridad en todas las condiciones de operación, en operaciones transitorias o de emergencia, son ejemplos de cómo se garantizan los niveles de seguridad mediante la aplicación de técnicas ISD en el ámbito de las centrales eléctricas.

- Estudios relacionados con la *Ingeniería de Factores Humanos y Ergonomía (HFE)*. La Ingeniería de Factores Humanos es el estudio de todos los factores relacionados con la interfaz humana con la maquinaria, el proceso y el entorno para facilitar el trabajo de la forma correcta. Los factores humanos a menudo se asocian con la ergonomía, pero es mucho más amplio que la ergonomía por sí sola e incluye la fisiología y psicología del operador que se espera que realice una tarea. Cuando se aplica a un problema, la HFE estudia los factores que contribuyen a que un operador no complete una tarea correctamente. En técnicas como el análisis de causa raíz o en FMEA, se estudia entre otras causas el error del operador y se deben considerar no solo el error sino las causas que conducen a ese error cuando se identifica al ser humano como el centro del problema que se estudia. Cuando se aplica en el diseño de la máquina o el proceso, la HFE evita errores al eliminar o describir las condiciones del proceso que podrían resultar en errores humanos.

En proyectos de Oil & Gas forma parte del alcance del cliente la preparación de la estrategia HFE, la cual sirve de base para la elaboración de los estudios de detalle en la fase de ingeniería. La estrategia de HFE se prepara habitualmente en la fase de ingeniería conceptual. Por tanto, es muy conveniente introducir el término factores humanos desde la etapa previa. La falta absoluta de este tipo de estudios en los proyectos térmicos, que ni los clientes los realizan, ni los contratistas los conocen con el detalle suficiente, afecta a la identificación de peligros y análisis de causa raíz en los incidentes y, en otros casos, los errores humanos conducen a pérdidas de producción. En China existen gran cantidad de plantas térmicas y allí se están realizando algunos estudios encaminados a entender y proporcionar métodos de gestión para mitigar riesgos de producción debidos a errores humanos [174]. En el capítulo 5 se proporcionará una visión algo más cercana de como se viene abordando el error humano en la ejecución de tareas y su relación con los accidentes.

4.4 Análisis de riesgos en la fase de ingeniería

4.4.1 Etapa de Ingeniería Básica

Conviene revisar lo indicado en el capítulo 3.2.2 para revisar las actividades que se realizan habitualmente en esta fase del proyecto.

Respecto a los estudios y análisis de riesgos que se realizan en la etapa de ingeniería incluidos en el alcance del Proyecto o que pudieran surgir a lo largo del mismo, se ha podido comprobar que lo más habitual es que sean realizados por una tercera parte mediante la subcontratación de los servicios especializados correspondientes. Normalmente el encargado de llevar a cabo la gestión y subcontratación de dichos estudios es el equipo de HSE asignado al proyecto, el cual se encargará de llevar a cabo la gestión y apoyo al departamento de compras mediante la realización de la especificación técnica que servirá de base para la contratación dichos estudios. El equipo de HSE preparará la requisición para petición de oferta, realizará la tabulación de ofertas recibidas y elaborará, finalmente, la requisición para compra así como la coordinación, el seguimiento y cierre de los mismos con las compañías especializadas que proporcionarán dichos estudios y servicios.

Normalmente, los estudios que se realizan en un proyecto se identifican en el Plan de HSE del Proyecto o en el Plan de Gestión Ambiental. Es habitual en los proyectos de generación eléctrica distinguir entre el plan de HSE para la fase de ingeniería y aprovisionamientos y el plan de HSE para la construcción ya que tienen alcances muy diferenciados.

4.4.1.1 Plan de HSE para el proyecto

En el plan de HSE para las fases de ingeniería y aprovisionamientos se incluye habitualmente los objetivos de gestión, ambientales, de seguridad y de ergonomía y salud para el proyecto de acuerdo con las políticas de HSE tanto del promotor como del contratista principal de la obra.

En el plan se incorpora la estrategia del equipo de gestión de HSE para el proyecto, la organización y responsabilidades del personal clave y como se realizan las interrelaciones con los otros miembros del PMT. También se incluye la gestión de las actividades que realiza el equipo de HSE para el proyecto entre las que se incluyen aquellas relativas a la propia gestión, registros, auditorías y sistemas de revisión y gestión del cambio y las actividades relacionadas con la Seguridad, Salud y Medioambiente. Entre las actividades de diseño relacionadas con HSE, tal como se introdujo al principio de este capítulo, se encuentran:

- Revisión de la Legislación, Códigos, Guías y Especificaciones de aplicación
- Revisión de la implantación (LayOut) de la planta, para verificar entre otras cuestiones, todas aquellas relativas con los requerimientos de diseño relacionados con el espaciado mínimo de equipos, cubetos y drenajes, rutas de escape, requerimientos de accesibilidad, ubicación de duchas-lavaojos de seguridad, etc. entre otros. Otros requisitos de acuerdo con la normativa local de aplicación a escaleras, barandillas, rampas, etc. También formará parte de las actividades a realizar durante la etapa de diseño básico, de modo que los posibles incumplimientos se detecten a la mayor brevedad.

- El equipo de HSE en base a las consideraciones contractuales y de normativa local establecerá los estudios que se realizarán en las etapas de diseño. Entre los estudios que se vienen realizando de manera estandarizada en las etapas de ingeniería se encuentran:
 - Clasificación de Áreas Peligrosas. Este documento según la localización de la planta incorporará determinados documentos complementarios
 - Estudio HAZOP
 - Hojas de Datos de Seguridad HDS (SDS, Safety Data Sheets)
 - Vías de evacuación y rutas de escape
 - Ergonomía y salud ocupacional, desde el punto de vista de la ergonomía y la gestión de los productos químicos buscando la menor exposición de los operadores a las sustancias peligrosas, entornos o situaciones de trabajo peligrosas. Se revisa la accesibilidad a los equipos e instrumentos para la operación y mantenimiento, así como, las condiciones ambientales de trabajo (por ejemplo, niveles de iluminación, el ruido y las vibraciones, la protección de las piezas móviles, las emisiones, el estrés de calor, etc.)
 - Sistema de detección contraincendios y sistemas de detección de fuego y gas
 - Gestión medioambiental, entre los que destacan, control de ruido de acuerdo con la normativa local y condiciones contractuales, vertido de efluentes, gestión de residuos o sistemas de recogida de drenajes y fugas.

En el plan de HSE para la Construcción se describe el sistema de Seguridad, Salud y Medioambiente a implantar en obra. Siempre debe prestarse especial atención a la normativa de aplicación local, además de a la división de responsabilidades contractuales entre el cliente y el contratista principal. Así, el plan para la construcción habitualmente incluye, al menos lo siguiente:

- Definición de la política de HSE para la obra de acuerdo con la política en esta materia tanto por parte del cliente como del contratista principal
- Se establecen las bases para la ejecución del plan de seguridad para la construcción, de manera que, se incluya o defina, al menos, lo siguiente:
 - Se definen los representantes de los responsables de Seguridad, Salud y Medio Ambiente (SSMA).
 - Se identifican y valoran los riesgos en el trabajo.
 - Se establecen los requisitos en materia de SSMA para todos los participantes en los trabajos.
 - Prevención de incidentes/accidentes mediante información y formación de todos los empleados.
 - Se establecen procedimientos previos a la ejecución de ciertas actividades, así como procedimientos de investigación de cualquier accidente que pueda ocurrir.
 - Se potencia la motivación de seguridad para los empleados para prevenir hábitos y condiciones de trabajo no seguros y medidas incentivas.

- Se incorpora la vigilancia requerida para asegurar que las medidas de SSMA se toman en la obra en el momento correcto y que se monitorizan los procedimientos establecidos, incluyendo acciones correctivas inmediatas.
- Se preparan e incorporan procedimientos para acciones de Emergencia.
- Se dota de instalaciones sanitarias y médicas y asistencia para trabajadores heridos.
- Se prepara un Plan de Seguridad, Salud en el trabajo y Protección ambiental por cada Subcontratista, previo a empezar los trabajos en obra.
- Se establece con claridad el alcance de los trabajos durante la fase de construcción en base a los términos contractuales identificando “quien hace que”.
- Se establece la organización de la seguridad en obra, estableciendo las personas clave así como las responsabilidades y obligaciones de cada organización y personal clave.
- Se recogen los requisitos exigidos a los subcontratistas en materia de SSMA y el contenido del plan de HSE a incluir por cada uno de ellos.
- Se incorporan los requisitos al programa de comunicación entre los involucrados en la ejecución de las obras.
- Requisitos y metodología aplicable a las reuniones de SSMA, como deben realizarse así como debe documentarse entre las partes involucradas.
- Charlas a pie de obra, como deben realizarse.
- Requisitos para la iniciación y formación de los empleados en obra.
- Inclusión en el plan de HSE de programas de motivación y campañas de concienciación a los empleados.
- Supervisión e inspecciones de seguridad. Implementación y elaboración de procedimientos de investigación de incidentes/accidentes en obra.
- Informes y registros de seguridad
- Sistemas de permisos de trabajo y bloqueo y etiquetado.
- Gestión de Peligros en la construcción:
 - Identificación y evaluación de peligros en la construcción.
 - Análisis de seguridad en el trabajo y exposición de métodos de trabajo. Se analizan actividades tales como trabajar en altura, espacios confinados, elevaciones críticas, excavaciones, limpiezas químicas, etiquetado y bloqueo, electricidad, voladuras de arena entre otras.
 - Peligros generales en construcción y comisionado, tales como caídas, golpes, lesiones, contactos eléctricos, proyección de partículas, etc., deben ser identificados, controlados y minimizados al menos a valores ALARP.
- Se establecen los requisitos de seguridad en la obra relativos a reglas generales de comportamiento, uso de los materiales de protección colectiva e individual así como condiciones de trabajos en altura, etc.

En general en el plan de HSE para la construcción se debe atender a todos los requisitos de seguridad personal y medioambiental de la obra. En el capítulo siguiente se proporcionarán algunos aspectos complementarios a los incluidos de manera general en este apartado.

4.4.1.2 Listas de sustancias peligrosas y fuentes de escape

En las plantas térmicas, como en otras instalaciones industriales, existen procesos en los que se producen gases o concentraciones de sustancias que mezcladas con aire pueden dar lugar a explosiones en presencia de una fuente de energía, tales como un arco eléctrico, una chispa o una temperatura elevada. Para prevenir los riesgos de formación de atmósferas explosivas, se elabora, de acuerdo con la normativa de aplicación al proyecto, el Estudio de Clasificación de Áreas Peligrosas donde se recogen las posibles fuentes de escape de gases, vapores, polvos inflamables o combustibles. En la clasificación de áreas peligrosas se definen los equipos y sistemas que pueden verse afectados por dichas zonas según su localización e instalación de modo que se pueda evaluar el riesgo de formación de tales atmósferas explosivas.

Para la elaboración de la clasificación de áreas peligrosas se necesita identificar la Lista de Sustancias Peligrosas presentes en el proyecto. Como se indicó previamente para la elaboración de la lista de sustancias peligrosas debe estar claramente definido el criterio de clasificación de sustancias peligrosas y a ser posible acordado previamente con el cliente, por supuesto siempre de acuerdo con los requisitos normativos.

Para la determinación de si una sustancia se considera peligrosa para su inclusión en la lista se tendrán en cuenta las propiedades de las sustancias y mezclas peligrosas, las cuales se pueden encontrar en las siguientes fuentes dependiendo del Proyecto:

- Hojas de datos de sustancias inflamables.
- Fichas de Seguridad de los Productos (Material Safety Data Sheets, MSDS), tales como aditivos químicos, lubricantes, etc. Las MSDS deben ser solicitadas a los diferentes vendedores y suministradores por los responsables del suministro como parte de las actividades de HSE relacionadas con Aprovisionamiento.
- Bases de datos internas del Departamento de HSE del que se dispone en las compañías.
- Bases de datos de fichas de seguridad de organismos internacionales (para sustancias puras).

La Lista de Sustancias Peligrosas es un documento básico de partida para generar otros como la Lista de Fuentes de Escape o la Lista de Equipos Peligrosos.

A continuación, se proporciona un ejemplo de su contenido tanto para líquidos y gases como para sólidos tomado de un proyecto de central térmica de un ciclo combinado, por un lado y de una central de biomasa, por otro.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Rev	Sustancia peligrosa					punto de inflamabilidad [°C]	Densidad ² [kg / m ³]	LFL ¹		UFL ¹		Volatilidad		Densidad relativa de gas ²	Temperatura de ignición ² [°C]	Clase de grupo y temperatura	Documento de referencia	Observaciones	
	No.	Nombre	Tipo	Composición	Categoría peligrosa (si)			[kg / m ³]	Vol.%	[kg / m ³]	Vol.%	Presión de vapor a 20°C [kPa]	Punto de ebullición [°C]						
1. SUSTANCIAS INFLAMABLES GENERALES																			
0	1.1	Gasóleo	L	Gasóleo, mezcla de hidrocarburos	Inflam. Líq. 3	> 65	-	-	1	-	6	-	-	≥ 3.5	> 250	IAT3	MSP Parte A, Apéndice 8 - Composición del fueloil para el punto de inflamación UNE 202007:2006 IN, tabla A.1 para otros parámetros	Valores aproximados	
0	1.2	Gas natural	GRAMO	Mezcla de hidrocarburos (metano, etano, propano, butano, pentano...)	Inflamable irritante	< 0	-	-	3,93 - 6,60	-	13,2 - 17,5	-	< 0	0,5-0,7	482	IAT1	UNE 202007:2006 IN, tabla A.1	Valores aproximados	
0	1.3	Hidrógeno	GRAMO	H ₂	Inflamable	< 0	-	-	4	-	75	-	-252,7	0,07	500	IIC1	UNE 202007:2006 IN, tabla A.1		
2. QUÍMICOS PARA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SISTEMA DE OXIDACIÓN DE QUÍMICOS																			
0	2.1	Ameniaco acuoso	L	NEWFA HAMPSHIRE, CH ₃ N (7-9%)	(9) Met. Corr. 1 piel Corr. 1B Ojos dañ. 1. STOT SE 3 Aquatic Chronic 3	No determinado	California, 960 a 20 °C	-	15	-	28	No determinado	No determinado	Esta información no está disponible	No determinado	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Ferrox 3129)	Sin propiedades explosivas. Dosificado al sistema de condensado, sistema de agua de alimentación de caldera, sistema de distribución de agua de desmineral y agua a auxiliar.	
0	2.2	Fosfato (solución de TSP)	L	Ortofosfato trisódico (10-15%)	(9) Met. Corr. 1 piel Irrit. 2 Ojos Irrit. 2	No determinado	California, 1030-1070 a 20 °C	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	Esta información no está disponible	No determinado	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Ferrox 3355)	Sin propiedades explosivas. Dosificado al tambor P de la caldera.	
0	2.3	Captador de oxígeno (carbohidratos)	L	Carbohidratos (8%)	(9) Sens. De piel 2	No determinado	California, 1020	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	California, 2,3	California, > 100 °C	Esta información no está disponible	No determinado	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Ferrox 360)	Sin propiedades explosivas. Dosificado al sistema de condensado, sistema de agua de alimentación de caldera y caldera auxiliar.	
0	2.4	Inhibidor corrosivo	L	Mezcla de Nitrito de sodio (25 - 50%) Hidróxido de sodio (1 - 5%) Fosfora cáustica (<1%)	(9) Toxicidad aguda, 4 piel Irrit. 2 Ojos Irrit. 2 Acuático agudo 1	> 100	California, 1340 a 20 °C	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	Esta información no está disponible	No determinado	-	Datos de la MSDS del proveedor (KURITA; Korrodes 8377)	Sin propiedades explosivas. Dosificado en circuito cerrado de agua de refrigeración. Llenado inicial y luego por purga.	
0	2.5	Biocida	L	Mezcla de 5-cloro-2-metil-2H-tiazol-3-ona (No CE 241-508-7) 2-metil-2H-tiazol-3-ona (No CE 230-239-6) (3-1)	(9) piel Corr. 1B Ojos dañ. 1 Sens. De piel 1 Acuático crónico 3	> 100	California, 1090 a 20 °C	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	California, 2,3	California, 100 °C a 1.013 hPa	Esta información no está disponible	> 600	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Kurita F-5106)	Sin propiedades explosivas. Dosificado en circuito cerrado de agua de refrigeración. Adición mensual.	
0	2.6	Hipoclorito de sodio	L	Hipoclorito de sodio (10-15%)	Provoca quemaduras en piel, ojos y tubo digestivo. Nocivo si se ingiere. (9) piel Corr. 1B Ojos Corr. 1A Acute Tox (oral) 5	No es inflamable	1240	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	104,4	No determinado	-	-	Datos de MSDS del proveedor (Aquechemie DMCC; AC 8006)	Dosificado en tanque de agua potable	
0	2.7	Bisulfito de sodio 40%	L	Bisulfito de sodio (NaHSO ₃) 35-40% sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄) <1% de sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄) <6%	(9) Toxicidad aguda oral, categoría 4; Irritación de la piel, categoría 3; Irritación ocular, categoría 2A; Toxicidad específica en determinados órganos: exposición única, categoría 3; Corrosivo para los metales, categoría 1	No aplica	1130 - 1180	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<32 mm Hg en total (12 mm Hg SO ₂) a 25 °C	103 estimado	Similar al agua	No aplica	-	Datos de MSDS del proveedor (Aquechemie DMCC; AC 8291)	Para planta de tratamiento de agua
0	2.8	Anticorrosante	L	Ácido aminofosfónico en agua	(9) Met. Corr. 1 Ojos Irrit. 2	No aplica	1300	No aplica	No aplica	-	-	No determinado	> 105	-	No aplica	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Omnicor 1070)	El producto no es explosivo. Para planta de tratamiento de agua	
0	2.9	Ácido sulfúrico	L	Ácido sulfúrico (98%)	Veneno Peligro, Nocivo si se inhala, Provoca quemaduras graves. Puede ser fatal en caso de ingestión (9) Met. Corr. 1 piel Corr. 1A Ojos Corr. 1A STOT SE 3 Toxicidad aguda (oral) 5	No aplica	1830-1840 a 25 °C	-	-	-	-	-	327	3,4	-	-	Datos de MSDS del proveedor (Aquechemie DMCC; AC 8027)	Para Planta de Tratamiento de Agua y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Nota IMPORTANTE: El ácido sulfúrico reacciona con la mayoría de los metales para producir gas hidrógeno, que puede formar una mezcla explosiva con el aire.	
1	2.10	Hidróxido de sodio	L	Sosa cáustica 30%	(9) piel Corr. 1A Met. Corr. 1	No aplica	1340	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	2.1	105 °C solución al 10% 145 °C solución al 50%	datos no disponibles	datos no disponibles	-	Datos de MSDS del proveedor (Brenntag; UICOR DE SODA; CAUSTICA = 2% - 5% - 50% (11-106 RTW))	Para Planta de Tratamiento de Agua y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. El producto no es explosivo	
0	2.11	Coagulante (Cloruro Férrico 40%)	L	Mezcla de Cloruro férrico 28-43% Ácido clorhídrico <5%	(9) Corrosión e irritación cutáneas Categoría 1B; Lesiones o irritación ocular graves Categoría 2; Peligro para el medio ambiente acuático. Categoría de peligro agudo 2	No aplica	1260-1480	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-	105 - 110	No disponible	No aplica	-	Datos de MSDS del proveedor (Aquechemie DMCC; AC 8041)	Para planta de tratamiento de agua	
0	2.12	Poli-electrolito	L	Poli-electrolito	No clasificado como peligroso	No determinado	1200	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	California > 200	Esta información no está disponible	No determinado	-	Datos de MSDS del proveedor (KURITA; Ferrocyl 8704)	Sin propiedades explosivas. Para planta de tratamiento de agua	
0	2.13	Ácido cítrico	L	H ₃ C ₆ H ₅ O ₇ (solución al 50%)	(9) Toxicidad aguda, cutánea (Categoría 5) Irritación cutánea (Categoría 3) Irritación ocular (Categoría 2A)	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	Datos no disponibles	1011	-	Datos de la MSDS de referencia	No se considera un riesgo de explosión. Para limpieza de Plantas de Tratamiento de Agua. A confirmar con proveedor final.	
3. QUÍMICOS PARA PLANTA DE ELECTROCLORACIÓN																			
1	3.1	Ácido clorhídrico	L	Ácido clorhídrico 32 - 36%	(9) piel Corr. 1B STOT SE 2	No conocida	1100 - 1200	No conocida	No conocida	No conocida	No conocida	215 mmHg	110	No conocida	No conocida	-	Datos del documento del proveedor: 70150-00-PIN-SHP-HD-000 FICHAS DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL	Se utiliza para la limpieza de electrodos.	
1	3.2	Hidróxido de sodio	L	Sosa cáustica 5-50%	(9) Piel Corr 1A	No conocida	Gravedad específica: 1,63	No conocida	No conocida	No conocida	No conocida	5,4 a los 40 °C	-145	No conocida	No conocida	-	Datos del documento del proveedor: 70150-00-PIN-SHP-HD-000 FICHAS DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL		
1	3.3	Bisulfito de sodio	L	Solución de bisulfito de sodio al 36-40%	(9) Toxicidad aguda, 4	No conocida	1320-1370	No conocida	No conocida	No conocida	No conocida	27 mbar a 20 °C	98	No conocida	No conocida	-	Datos del documento del proveedor: 70150-00-PIN-SHP-HD-000 FICHAS DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL		
4. TURBINA DE GAS / TURBINA DE VAPOR / GENERADOR GT Y OTROS EQUIPOS PRINCIPALES DE GE																			
1	4.1	aceite lubricante para turbinas de gas	L	Mezcla de hidrocarburos	-	> 215	-	-	-	-	-	-	-	-	> 215	IAT3	GEK32568K	Compra local.	
1	4.2	aceite lubricante para turbinas de vapor	L	Mezcla de hidrocarburos	-	≥ 200	≤ 880 a 15 °C	-	-	-	-	-	-	-	> 200	IAT3	HTGD90117_U	Compra local.	
1	4.3	Cilindros de aire / CO ₂ / gas	GRAMO	Helio / CO ₂ / Nitrogeno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Compra local	

Tabla 4.2.- Ejemplo de Lista de sustancias peligrosas para Líquidos y gases. Fuente: Archivo

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Rev	No.	Sustancia peligrosa			Contenido de humedad [%]	Sobrepresión de explosión máxima [bar]	Kst [bar m / s]	Clase de explosión de polvo	LFL ¹⁾ [g / m ³]	ITC ²⁾ [C]	ITL ³⁾ (5 mm) [C]	Energía mínima de ignición [mJ]	Temperatura máxima del equipo [C]	Grupo de polvo	Documento de referencia	Observaciones
		Nombre	Composición	Tamaño de partícula [mmetro]												
3	1	Biomasa (mezcla de pellets y astillas de madera)	Acc. Contrato EPC	Acc. Contrato EPC	50 para virutas de madera 5 para pellets de madera	10	200	St-1	15 - 40 (*)	400	260 (**)	17	185	IIIB	Contrato EPC. Anexo 2, Parte D	(*) Valores estimados. Valor típico de resistividad del polvo de madera proporcionado ZE + 12 ohm. Metro. (**) Basado en la práctica recomendada de NFPA 499 para la clasificación de polvos combustibles y de ubicaciones peligrosas (clasificadas) para instalaciones eléctricas en áreas de procesos químicos (2017) a la temperatura mínima de ignición de las capas de polvo de madera (Marin Pastier, Ivana Turcková, Zuzana Turčková, Josef Hránský; 2013), la temperatura mínima de ignición de las nubes de polvo de madera a y capas de polvo de madera de 5 mm es superior a 260 °C.
2	2	Polvo de virutas de madera (***)	Acc. Contrato EPC	Acc. Contrato EPC	50	8,9	132	St-1	15 - 40 (*)	410	310	70	235	IIIB	Contrato EPC. Anexo 2, Parte D	(*) Valores estimados. Valor típico de resistividad del polvo de madera proporcionado ZE + 12 ohm. Metro. (**) Según Contrato EPC. Anexo 2, Parte D, estas propiedades explosivas se considerarán para el descargador continuo de buques.
2	3	Polvo de pellets de madera (***)	Acc. Contrato EPC	Acc. Contrato EPC	5	8,1	146	St-1	15 - 40 (*)	450	300	70	225	IIIB	Contrato EPC. Anexo 2, Parte D	(*) Valores estimados. Valor típico de resistividad del polvo de madera proporcionado ZE + 12 ohm. Metro. (**) Según Contrato EPC. Anexo 2, Parte D, estas propiedades explosivas se considerarán para el descargador continuo de buques.
2	4	Carbón activado	Carbón activado; Duroc Hg o equivalente	Acc. Ficha de datos	8	8	79	St-1	60	400	-	100 000	325	IIIB	Documento de Caldera: 7xxx20-YF..SE..xxx-002	
1	5	Cenizas de fondo de caldera	*	*	*	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	* Consulte el documento xxx-20-HBA-MRD-xxx-001
1	6	Cenizas volantes de calderas	*	*	*	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	* Consulte el documento xxx-20-ET..MRD-xxx-001
1	7	Arena de cama	*	*	*	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	* Consulte el documento xxx-20-HHH-MRD-xxx-001
1	8	Lima apagada / hidratada	Ca (OH) 2 (>90% en peso)	7 ± 3 µm 80% <10 µm	<1	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	No Explosivo	Contrato EPC. Programa 2A	

Observaciones:

1) LFL: Concentración mínima explosiva
 2) ITC: temperatura de ignición de una nube de polvo
 3) ITL: temperatura de ignición de una capa de polvo.
 4) Temperatura máxima del equipo: Valor mínimo entre los siguientes:

$$T_{max1} = \frac{2}{3} ITC$$

$$T_{max2} = ITL - 75^{\circ}C$$

5) Para fines de diseño, esta lista es IFC. Las celdas HOLD significan que los datos finales se incluirán en la edición As Built una vez que el tercero relacionado confirme el valor de entrada.

Tabla 4.3.- Ejemplo de Lista de sustancias peligrosas para sólidos. Fuente: Archivo

La lista de Fuentes de Escape es un documento en el que se identifican las potenciales fuentes de escape de sustancias inflamables, gases y/o polvos que pueden generar una atmósfera potencialmente explosiva, basado en las características de la sustancia que puede fugar, así como las características de dicha emisión en función del tipo de gas/ vapor, de su temperatura, etc. Para su desarrollo es necesario disponer de la Lista de Sustancias Peligrosas y la Lista de Equipos del Proyecto, así como las especificaciones aplicables del Proyecto. Dicho documento es básico para la realización del Plano de Clasificación de Áreas Peligrosas.

A continuación, un ejemplo de las fuentes de escape líquidas y gaseosas de una planta de generación, continuando con el ejemplo anterior, que utiliza combustible de biomasa como fuente principal:

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Área: Planta general																		
Dibujo de referencia: XXXX-0-XXX-XXX-es -001 Rev.0																		
Rev	Zona		Fuente de liberación					Sustancia inflamable			Ventilación			Área peligrosa				
	Identificación	No.	Descripción	Localización	Área del plano de referencia	Grado de liberación ¹	Sustancia ²	Temperatura y presión		Estado ³	Tipo ⁴	Grado	Disponibilidad	Tipo de área		Referencia	Comentarios	
								[°C]	[bar]					0-1-2-NC	Extensión del área			
													Vertical [m]	Horizontal [m]				
A	Caldera	1.1	Tanque de amoníaco	Área de calderas	-	-	Amoníaco acuoso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte el documento XXX-20-RF_SE_XXX-002	
A		1.2	Sistema de agua con amoníaco	Área de calderas	-	-	Amoníaco acuoso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte el documento XXX-20-RF_SE_XXX-002	
A		1.3	Sistema de aceite ligero	Área de calderas	-	-	Gasoleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte el documento XXX-20-RF_SE_XXX-002
A		1.4	Sistema de gas de encendido	Área de calderas	-	-	Propano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte el documento XXX-20-RF_SE_XXX-002
A	Tanque de combustible ligero	2.1	Superficie líquida (interior)	Interior del tanque LFO	-	NR	Gasoleo	-15/20	Atm.	L	norte	Bajo	Pobre	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		2.2	Ventilación del tanque	Techo del tanque	-	NR	Gasoleo	-15/20	Atm.	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		2.3	Bridas, juntas, conexiones.	Alrededor del tanque LFO	-	NR	Gasoleo	-15/20	Atm.	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Sistema de combustible ligero	3.1	Bridas, conexiones, válvulas de tuberías.	Desde el área de descarga de camiones LFO hasta el tanque	-	NR	Gasoleo	-15/20	2,5	L	norte	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		3.2	Bridas, conexiones, válvulas de tuberías.	Desde tanque hasta bombas LFO.	-	NR	Gasoleo	-15/20	1,5	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		3.3	Bombas LFO	Bombas LFO	-	NR	Gasoleo	-15/20	23	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		3.4	Bridas, conexiones, válvulas de tuberías.	Des de bombas LFO hasta calderas auxiliares y conexiones de calderas principales	-	NR	Gasoleo	-15/20	19/23	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Caldera auxiliar	4	Sistema de aceite combustible ligero	Área de caldera auxiliar	-	-	Gasoleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte XXXXXXXXXXXX documento XX-XXX-XXX-XXX-XXX	
A	Generador diesel de emergencia	5.1	Superficie líquida en el interior del tanque LFO	Interior del tanque LFO del generador diesel de emergencia	-	NR	Gasoleo	Ambiente	Atm.	L	norte	Bajo	Pobre	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		5.2	Ventilación del tanque LFO	Techo del generador diesel de emergencia	-	NR	Gasoleo	Ambiente	Atm.	L	norte	Medio	Bien	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Casa de Bombas Contra Incendios	6	Equipo, tanque, conexiones de tubería, válvulas, etc. de la Casa de Bombas Contra Incendios	Casa de Bombas Contra Incendios	-	-	Gasoleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Para la calificación de áreas peligrosas, consulte XXXXXXXXXXXX documento XX-XXX-XXX-XXX-XXX	
A	Sistema de dosificación de productos químicos	7.1	IBC de amoníaco	Alrededor del contenedor del sistema de dosificación de productos químicos	-	NR	Amoníaco acuoso	Ambiente	Atm.	L	norte	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		7.2	Bomba de llenado de amoníaco	Alrededor del contenedor del sistema de dosificación de productos químicos	-	NR	Amoníaco acuoso	Ambiente	<25	L	norte	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		7.3	Superficie líquida (interior)	Interior del tanque de almacenamiento de amoníaco	-	NR	Amoníaco acuoso	Ambiente	Atm.	L	norte	Bajo	Pobre	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		7.4	Bombas dosificadoras de amoníaco	Sistema de amoníaco para sistema de dosificación de productos químicos	-	NR	Amoníaco acuoso	Ambiente	<25	L	A	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A		7.5	Líneas de amoníaco, válvulas, conexiones bridadas	Sistema de amoníaco para dosificación de productos químicos	-	NR	Amoníaco acuoso	Ambiente	<25	L	UN	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Sistema de dosificación de propano	8	Dosificación de propano		-	NR	Propano			L				NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Sistema de aceite lubricación para turbina de vapor	9	Bombas, filtros, tanques, conexiones de tuberías, válvulas, etc. del sistema de aceite lubricante de turbina de vapor	Área de generación	-	NR	Acete lubricación	30/65	atm./199	L	A	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado
A	Sistema de aceite de control de turbina de vapor	10	Bombas, filtros, tanques, conexiones de tuberías, válvulas, etc. del sistema de aceite de control de turbina de vapor	Área de generación	-	NR	Acete de Control	60	40/160	L	A	Medio	Justa	NC	-	-	BS EN 60079-10	No clasificado

Observaciones:
 (1) Grado de lanzamiento:
 C: continuo
 P: Primario
 S: secundario
 NR: Sin liberación
 (2) Sustancia:
 Consulte la lista de sustancias inflamables.
 (3) Estado de la sustancia inflamable:
 L: líquido
 G: gas
 (4) Tipo de ventilación:
 N: natural
 A: artificial

Tabla 4.4.- Ejemplo de Lista de Fuentes de Escape. Fuente: Archivo

4.4.1.3 Estudios HAZID

Cuando se realiza un estudio HAZID el estado del proyecto es fundamental para que el resultado sea el adecuado a los objetivos que se buscan. Precisamente en base a esta premisa se tendrán dos tipos de estudios HAZID:

- HAZID Conceptual. Normalmente utilizado en las etapas de diseño previo.
- HAZID detallado. Normalmente desarrollado en las etapas de ingeniería básica o de detalle, según se haya realizado previamente el conceptual.

HAZID Conceptual. Es el que habitualmente se desarrolla en las etapas de diseño previo. Con este tipo de estudio se busca identificar todos los riesgos asociados sistemáticamente con la instalación de la planta o con su actividad. Como el estudio se realiza en la etapa inicial, la información disponible para su desarrollo es mínima, aunque existen algunos documentos básicos que suelen estar disponibles, tales como la legislación aplicable, los estándares de aplicación del cliente, la regulación medioambiental aplicable o la filosofía de operación de la planta y los planes de desarrollo e instalación en el sitio.

Para el correcto desarrollo del estudio HAZID, ya sea conceptual o detallado, se atenderán los siguientes elementos básicos de verificación (Checklist), los cuales se organizan normalmente en las cuatro categorías básicas siguientes:

1. Peligros externos y medioambientales. En esta categoría se incluyen aspectos relacionados con los peligros que tienen en cuenta las propias condiciones ambientales de temperatura, humedad, etc., como aquellos relacionados con las condiciones sísmicas o las relativas a condiciones especiales del terreno. También se evalúan aspectos como los efectos de la planta en los alrededores, como pueden ser los relativos a la proximidad de áreas habitadas, afección de infraestructuras tales como líneas de transmisión, tuberías de gas, etc., el impacto medioambiental, como puede ser descargas atmosféricas de gases de combustión, efluentes líquidos a ríos o mares o tratamiento de residuos, entre otros y las afecciones a las infraestructuras, por ejemplo, conexión o ampliación de carreteras, ferrocarriles o desvío provisional de ríos. Se tienen en cuenta otros aspectos relacionados con peligros de terceras partes, como pueden ser sabotajes, huelgas o incluso en determinados casos posibles actos terroristas, entre otros. Finalmente es habitual considerar aquí consideraciones relacionadas con los factores humanos, como pueden ser aquellos debidos a una incorrecta formación o aquellos debidos a accidentes laborales.
2. Peligros de la propia instalación. Se incluyen en esta categoría los aquellos que están directamente relacionados con la filosofía de control y operación de la planta, redundancias de unidades de generación, procedimientos de arranque y parada de la unidad, así como la respuesta de emergencia de la planta ante una pérdida total de alimentación eléctrica, desconexión de las líneas de evacuación, etc. También se consideran en esta categoría los peligros de explosión y fuego identificando todos los peligros que se encuentren relacionados con fuentes de ignición, materiales inflamables o explosivos que puedan afectar al entorno, a la implantación o a los alrededores de la instalación. También se suelen incluir en este apartado las respuestas ante incendio y las instalaciones contraincendios de la planta, así como

protección al operador, como pueden ser equipos de protección individual, comunicaciones, respuesta ante emergencias, etc.

Entre los peligros de proceso habitualmente se estudian la minimización de productos peligrosos en el almacén, sobrepresiones y sobretemperaturas de operación, venteos o fugas de sustancias peligrosas, fugas y contención de tanques de almacenamiento de sustancias peligrosas. También se evalúan los sistemas auxiliares de la central como pueden ser los sistemas eléctricos, sistemas contraincendios de agua, sistemas de manejo de combustible, ya sea en estado gas, líquido o sólido como el carbón o biomasa, así como otros sistemas de almacenamiento de productos químicos. Las instalaciones temporales para la construcción o modificaciones de las instalaciones existentes, incluyendo los puntos de conexión entre ambas y las interfases también suele ser objeto de análisis en esta etapa.

3. Peligros relacionados con la seguridad y salud laboral, como pueden ser aquellos relacionados con las condiciones de la localización donde se realizará la obra, tales como enfermedades infecciosas o atmosferas peligrosas en función de las condiciones de trabajo que pueden darse y también otras relacionadas propiamente con la prevención de riesgos laborales.
4. Problemas relacionados con la implementación del proyecto. En esta categoría se incluyen aspectos tales como la estrategia de contratación donde se consideran asuntos relacionados con la legislación aplicable, así como las regulaciones aplicables para la ingeniería y la construcción o los requisitos medioambientales de aplicación. También se evalúan que estudios sería necesario realizar en otras etapas del proyecto en base a las específicas condiciones del sitio o de la obra y los planes de contingencia en lo que se refiere a movilización, asistencia médica, contingencias y apoyo de brigadas contraincendios, por ejemplo.

Evidentemente si el estudio HAZID, se realiza en las etapas previas, la documentación disponible es muy escasa y el detalle será consecuentemente también menor, mientras que si se realiza el estudio en la etapa de ingeniería básica, lo cual es recomendable, se dispondrá de información más detallada que permitirá realizar una evaluación más pormenorizada lo que conducirá a un análisis más riguroso.

Caso Estudio 1. HAZID conceptual.

En este caso se plantea el análisis HAZID de una planta de generación de energía eléctrica cuyo combustible principal es biomasa recibida por barco y transferida a la planta desde una infraestructura portuaria que descarga el combustible a silos de almacenamiento. El transporte del combustible se lleva a cabo mediante un sistema de manejo de sólidos por cintas transportadoras y sistemas de desvío a cada silo. La planta está constituida por una caldera de lecho fluidizado cuya función principal es la generación de vapor para alimentar a una Turbina de vapor que moverá un generador eléctrico para producir electricidad.

El análisis HAZID se realiza en la etapa de viabilidad técnico-económica del proyecto, en un momento en el que se desconocen algunos aspectos determinantes del diseño y se tienen algunas incógnitas, lo que lleva a asumir algunas hipótesis de trabajo. Por ejemplo en el momento en el que se realiza el análisis no se conoce con el suficiente detalle si se podrá o no proporcionar

biomasa por carretera, por lo que en el estudio no se considera esa opción. Tampoco se conoce quien será el operador de la planta de descarga del muelle, por lo que también se asume que lo realizará el propietario de la planta. Tampoco se consideró en el estudio otras consideraciones relativas a las instalaciones necesarias para el almacenamiento y alimentación a la caldera del combustible secundario, fueloil ligero, las cuales en ese momento no se tenía detalle suficiente para su análisis.

El alcance del estudio se limitó a la identificación de peligros y problemas relacionados con la operación desde un punto de vista global, a la identificación de cualquier peligro externo y a la identificación de áreas de incertidumbre o salvaguardas adicionales que puedan ser necesarias. También se identificaron los códigos o normas pertinentes aplicables.

En el Anexo 1 se incluye resumidamente el contenido del informe HAZID que fue realizado por una tercera parte a solicitud del promotor de la planta. En el informe del estudio preliminar se reconoce como objetivo principal del mismo el registro formal de las posibles desviaciones de seguridad y operatividad implicadas en las fases del proyecto (demolición, construcción, puesta en servicio y operación de la planta), así como demostrar que se llevó a cabo una revisión integral de los peligros y operabilidad. Mediante este estudio se identificaron las fortalezas y debilidades de la propuesta de la planta tal como se encontraba concebida en ese momento.

Para el estudio se acordó el uso de las palabras guía genéricas que se incluyen en la Tabla 4.5. El propio uso de estas palabras proporciona el grado de detalle buscado en el estudio.

PALABRA CLAVE	COMENTARIO
Pérdida de contención	
Ventilación	(incluida la pérdida de ventilación)
Fuego	(incluidos líquidos inflamables, impacto, fricción, sobrepresión, electrostática)
Explosión / detonación	
Mantenibilidad	(incluyendo peligros durante el mantenimiento, facilidad de mantenimiento, mantenimiento incorrecto)
Manejo Remoto	
Pérdida de servicios	(incluida la pérdida de: potencia, vapor, agua, aire, proceso productos químicos, otros)
Mezcla	
Efluentes / Lavados	
Corrosión / Erosión	(incluyendo mecánica y eléctrica)
Peligro químico	
Método de funcionamiento	
Mecánico	
dominó	(incluye operaciones coincidentes)
Clima extremo	(incluyendo: viento, temperatura, lluvia, nieve, relámpagos, inundación)
Sísmico	
Toxicidad	(incluidos sólidos, líquidos, gases, asfixia).
Impacto / carga caída	(incluidas lesiones por atrapamiento / aplastamiento, derrames)

Factores externos	(impacto de vehículo, explosión / incendio de otros edificios, etc.)
Desechos / Residuos	
Cuestiones ambientales	
Polvo	
Niebla	
Seguridad convencional	(incluidos espacios confinados, trabajo en altura, acceso no autorizado, ruido, electricidad, acceso / salida, asfixia)
Instrumentación y Control	
Planes de Contingencia /	
Procedimientos	(incluidas acciones de emergencia)
Aptitud para un propósito	
Personal	(error humano, formación, experiencia, contratistas)
Comunicaciones	(incluida la pérdida de teléfono, radio, transmisiones y alarmas)

Tabla 4.5.- Palabras Guía estudio HAZID conceptual. Fuente: Archivo

Para el análisis se establecieron 11 nodos de estudio. Se consideraron los siguientes:

- Nodo 1.- Demolición
- Nodo 2.- Construcción de planta / mejora de muelle
- Nodo 3.- Actividades Portuarias
- Nodo 4.- Transportadores
- Nodo 5.- Entregas por carretera
- Nodo 6.- Almacenamiento y manipulación de biomasa
- Nodo 7.- Caldera de combustión
- Nodo 8.- Sistema de gases de combustión
- Nodo 9.- Ciclo de condensado de vapor de agua
- Nodo 10.- Niveles y diseño
- Nodo 11.- Puesta en servicio de la planta

La lista de asistentes a las reuniones es reducida, está formada por solo 3 personas las cuales se eligieron por su conocimiento del proyecto y experiencia en su desarrollo. La reunión comenzó con la discusión de las palabras guía y los nodos a estudiar. Una vez acordado esto, antes de la discusión de cada nodo, el ingeniero de proyectos y el gerente de proyecto describen los procesos y equipos de la planta involucrados utilizando los planos preliminares de diseño de la planta y los diagramas de flujo.

Las palabras clave se aplicaron a las operaciones individuales para cada uno de los nodos listados arriba. Se registran para cada palabra clave cualquier posible causa de desviación de las condiciones de operación normal. Se anotan las consecuencias y las salvaguardas previstas. Los asistentes acordaron que las protecciones consistían en tres tipos: el diseño de los equipos, protecciones de ingeniería (por ejemplo, la conexión a tierra eléctrica), procedimientos operativos, o una combinación de los tres.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

A continuación se proporciona un extracto del análisis realizado sobre el nodo 9 mediante la aplicación de las palabras guía.

Planta de energía de biomasa		HAZID			
D de palabra clave	Causas	Consecuencias	Salvaguardias / Mitigación	Recomendaciones	Comentario
Nodo 9 - Ciclo de agua / vapor y condensado, incluida la turbina de vapor					
9.1.1	Pérdida de Contención	Fugas de vapor	La integridad del sistema de vapor falla, peligro industrial	Adición de productos químicos. Gestión de combustible.	
9.1.2	Pérdida de Contención	Alta presión línea de vapor	Vapor ventilado, peligro industrial	Diseño. alivio de presión.	
9.3.1	Fuego	Fuego	Daños en el equipo y peligro para el personal	Fluido resistente al fuego. Sistema de diluvio.	
9.5.1	Mantenibilidad	Falta de ventilación	Condiciones de trabajo malas y posiblemente peligrosas	No requiere mucho mantenimiento.	
9.5.2	Mantenibilidad	Falta de acceso a calentadores de alimento.	Riesgo potencial de caída para el personal.	Buen acceso.	
9.5.3	Mantenibilidad	Falta de acceso a turbinas	Riesgo potencial de caída del personal	Asegúrese de que el diseño incorpore plataformas de acceso y medios de elevación adecuados	Asegurar que la grúa es adecuada para la sala de turbinas
9.7.1	Pérdida de servicios	Perdida de potencia	Pérdida de válvulas de control	El equipo disparará. Protección estándar	Asegurar rearme de la protección
9.7.2	Pérdida de servicios	Perdida de agua	Disparo.	Sistema diseñado para alarmar y disparar si las temperaturas exceden los niveles recomendados. Disparo en el control de nivel del calderín - sistema disparado.	Considerar Alarma de fuga
9.7.3	Pérdida de servicios	Pérdida de comprimido aire	Pérdida de actuación de la válvula de control.	El equipo disparará. Protección estándar.	
9.7.4	Pérdida de servicios	Pérdida de químicos de proceso	Calidad caldera / vapor fuera de los límites	Muestreo en línea para monitorear la calidad del vapor.	
9.8.1	Mezcla	Exceso de agua en el vapor.	Fallo catastrófico de la turbina: posibles lesiones.	Asegúrese de que las purgas tengan suficientes sistemas de seguridad para evitar que el condensado ingrese a la turbina. Sistemas de seguridad para evitar el arrastre del calderín.	
9.9.1	Efluentes / Lavados	Agua de purga	Estará caliente, potencialmente peligroso para el sistema y el medio ambiente.	Use el sistema de enfriamiento y opere dentro de los límites de temperatura definidos.	Se puede reutilizar en el sistema de gases de combustión.
10.1	Corrosión / Erosión	Erosión de los alabes de la turbina	Mal desempeño de turbina y posible falla de los alabes	Control del título del vapor. Diseño de sistema de drenaje: para eliminar el agua de la turbina.	
9.18.1	Impacto / caída de carga	Mantenimiento ocupaciones	Nocivo para el personal / planta.	Sin actividades de rutina para levantar la planta	
9.19.1	Factores externos	Condición de falla en rejilla poniendo estrés en turbina – cambios de choque	Posible mecánica falla.	Diseñado para hacer frente a condiciones de falla	Proteger la sincronización
9.25.1	Control / Instrumentación	Sistema de control DCS falla (o potencial falla).	Daños a las plantas.	Diseño para apagar de forma controlada.	
9.26.1	Planes de Contingencia / Procedimientos	Mal acceso / salida al depósito de combustible.	Incapacidad para combatir el fuego con eficacia.	Proporcione acceso / salida adecuados.	El edificio tiene 210 m de largo.

Tabla 4.6 Extracto análisis HAZID conceptual nodo 9. Fuente: Archivo

Se puede observar que el análisis se realiza a un nivel superior. Véase por ejemplo como se revisa la condición externa de fallo de la red sobre la turbina y su posible consecuencia de fallo mecánico. En el ejemplo siguiente se buscará el detalle de este fallo o su equivalente para poder comprobar la diferencia en el tipo de análisis que se realiza en uno u otro caso.

Para finalizar, a continuación se proporciona un extracto de las 72 recomendaciones propuestas por el equipo HAZID.

Se ha seleccionado las recomendaciones del nodo 9 como ejemplo significativo del agua vapor.

Se puede observar que son recomendaciones dirigidas a una gestión adecuada de los esfuerzos del proyecto así como del diseño posterior. Véase como ejemplo la recomendación 7.5.1 en relación con la realización posterior del estudio RAM (ARM Availability, Reliability and Maintainability), lo que condujo a su incorporación en el contrato y realización posterior por el contratista principal como parte de su alcance.

Nº	Nº HAZID	Recomendación
49	6.1.2	Revisar las alternativas de protección contra el sobrecalentamiento.
50	6.1.3	Revisar las alternativas de protección contra el sobrellenado.
51	6.2.2	Confirmar si es imprescindible tener ventilación para el almacenamiento de biomasa.
52	6.3.1	Recomendar que el parque de chips esté dividida en zonas, por lo que la inundación no será completa. Se requiere un seguro para los sistemas de extinción de incendios. Se recomienda un tanque de agua contra incendios dedicado para el combustible almacenado
53	6.3.3	Instale puertas cortafuego para interconectar transportadores y detectores de fuego para parada de los transportadores
54	6.5.4	Proporcionar puertas de acceso en ambos extremos.
55	6.7.3	Considerar la detección de incendios y la lucha contra incendios como parte de régimen de funcionamiento.
56	6.9.1	El sistema de drenaje debe tener capacidad para aceptar el flujo del tanque lleno de agua contra incendios.
57	6.24.4	Si el acceso a los edificios de almacenamiento se requiere regularmente, este deben tenerse en cuenta en la etapa de diseño.
58	7.5.1	Necesita revisión / estudio ARM para garantizar la mantenibilidad.
59	7.25.1	Actividad de puesta en servicio para garantizar que el sistema de filtrado/ estructurado de alarmas asegura que el operador atiende las alarmas importantes. Asegúrese de que el sistema de control sea de alta integridad.
60	7.27.1	Especificar equipo estándar adecuado.
61	8.1.1	Durante la construcción, asegurar que haya aislamiento entre trabajo de acero y el cuerpo principal ya que esto causa puntos fríos que provocan a una mayor degradación.
62	8.5.3	Se recomienda instalar un instrumento de bloqueo por nivel en las tolvas
63	9.26.1	Se recomienda el consejo oficial de bomberos sobre los requisitos de acceso.
64	10.2.1	Verificar que el diseño cumpla con los estándares y expectativas actuales.
65	10.3.1	Garantizar un acceso adecuado para los vehículos de emergencia. Asegurar un espacio adecuado para la evacuación. Asegurar que haya tiempo suficiente para la evacuación. Los estándares de separación de incendios entre la sala de calderas y cualquier otro edificio debe ser de al menos 2 horas. Se requiere separación dentro de la sala de calderas entre áreas limpias y sucias

Tabla 4.7.- Recomendaciones HAZID conceptual nodos 6 a 10. Fuente: Archivo

Caso Estudio 2. HAZID detallado

Solo a efectos comparativos, una vez iniciado el proyecto mencionado en los párrafos precedentes, el contratista principal realizó un estudio HAZID en la etapa de ingeniería del proyecto. El estudio se contrató a una tercera parte, la cual organizó nodos diferentes a los propuestos en el estudio previo. En la Tabla 4.8 se proporcionan los nodos analizados en los que se dividió la planta para el estudio.

Sección de Planta	Equipo Principal
Sistema CSU	Instalaciones de descarga continua de buques (CSU)
Caldera CFB	Caldera de lecho fluidizado circulante, SNCR y sistema catalizador deslizante, sistema de inyección de reactivo / absorbente, sistema de ventilador de tiro inducido, sistema de recirculación de gases de combustión, filtros de tela, sistemas de manejo de calderas y cenizas volantes, sistema de precalentadores de aire y conductos de gases de combustión, chimenea principal, CEMS, Tanque de amonio / Área de descarga de amoniaco, sistema de manejo de cenizas, sistemas de aire primario y secundario
Sistema ACC	Condensador enfriado por aire, tanque de condensado, bombas de condensado
Sistema FHS	Instalaciones del sistema de manejo de combustible (FHS), sección secadora de astillas de madera y planta auxiliar, estación de recepción de camiones de astillas / pellets de madera, sistema de nitrógeno
Sistema Planta de Potencia	Turbina de vapor y generador (STG), edificio eléctrico principal, transformador de unidad, transformador principal, reactor de derivación, sistemas de derivación de turbina de vapor de alta presión y baja presión
Otros equipos: Sistemas Auxiliares	Caldera auxiliar, fueloil de arranque, generador diésel de emergencia
Otros equipos: Sistemas comunes generales	Planta de tratamiento de efluentes, planta de tratamiento de agua, tanque de agua cruda y de extinción de incendios, bombas de extinción de incendios, tanque de agua desmineralizada
Otros equipos: Civil y edificios	Edificios de administración, taller de almacén cálido, carreteras, entrada a la planta principal
Exteriores	Carreteras adyacentes, ferrocarriles y áreas urbanas, tendido de cables de alta tensión, instalaciones temporales

Tabla 4.8.- Nodos estudio HAZID caso 2. Fuente: Archivo.

Un amplio extracto del estudio se ha incluido en el Anexo 1 para que el lector pueda profundizar en alguno de los asuntos tratados más adelante.

Las sesiones se organizaron en una semana de lunes a jueves y tuvo una asistencia considerable de especialistas. Asistieron por parte de la tercera parte un líder de HAZID y un secretario, por parte del contratista asistieron 2 ingenieros de HSE y los especialistas requeridos para el análisis de cada nodo/área en que se dividió la planta para el estudio. En total asistieron hasta 17 especialistas en las diferentes etapas y días de estudio.

La metodología fue esencialmente la misma que la descrita antes. Las palabras clave se aplican secuencialmente a cada subdivisión de la sección de la planta de tal manera que mediante una lluvia de ideas se identifican todas las causas potenciales aplicables a una sección. La credibilidad y la especificidad de cada causa son acordadas entre los miembros del equipo de HAZID considerando los eventos importantes. Una vez que los miembros del equipo están de acuerdo en

la credibilidad de la causa, se evalúan las posibles consecuencias de cada peligro en la instalación. La evaluación de las consecuencias se realiza en términos de seguridad para las personas, el medio ambiente, los equipos y la imagen de la compañía, todo ello asumiendo que no existen salvaguardas que puedan mitigar las consecuencias. Las consecuencias son cronológicas y se describen claramente para garantizar un enfoque coherente que permita una mayor evaluación de riesgos (en caso de ser necesario). A continuación, se enumeran las medidas de mitigación / salvaguardas previstas en el diseño de la planta y aplicables a las consecuencias específicas.

El siguiente paso de la metodología HAZID es evaluar el Riesgo Residual asociado al evento, mediante la Matriz de Riesgos del Proyecto. La Matriz de Riesgos detallada aplicable al proyecto en cuestión se proporciona en la Tabla 4.9.

Evaluación de las consecuencias					Evaluación de la probabilidad					
Valor	Descripción	Personas	Medioambiente	Equipos	Imagen	Valor	Descripción	Definición		
1	Despreciable	Daños personales despreciables Efectos leves sobre la salud, lesión de primeros auxilios. Sin efectos sobre el rendimiento en el trabajo	De daño leve a daño irrelevante Pérdida de contención sin escape al medioambiente	De sin impacto a impacto leve. Daños menores al equipo/sin retraso en las operaciones Mínimo impacto local sobre la unidad individual	Sin impacto a impacto leve. Poca conciencia pública del incidente. No existe preocupación del público. No hay reacción en los medios de comunicación.	1	Muy improbable	Posibilidad de ocurrencia en la industria extremadamente remota. Extremadamente remoto cambio de ocurrencia ($< 10^{-5}$)		
2	Menor	Lesión leve Sin efectos irreversibles Sin efectos fuera del sitio	Daño menor al medio ambiente. Pérdida de contención con escape menor al medioambiente.	Daños menores. Daños menores al equipo: hasta 1 día de retraso en las operaciones	Espacio limitado. Algunas preocupaciones públicas locales. Algunas quejas. Leve cobertura de los medios.	2	Poco Probable	Evento raro en la industria. No es probable durante las operaciones o la vida del equipo un evento similar (10^{-4})		
3	Significativo	Lesión grave Discapacidad permanente y efecto sobre la salud Fuera del sitio: Efectos menores/no permanentes	Daños locales. Pérdida de contención con escape significativo al medioambiente. Escape o fuga con causa de contaminación moderada en el sitio y alguna contaminación fuera del sitio (pero de extensión limitada in duración y área de extensión) requiriendo trabajos de remedio.	Impactos localizados. Daños importantes en el equipo: varios días de retraso en las operaciones. La unidad parará parcialmente. Se necesita reparación y reposición de piezas para el proceso.	Impacto considerable. Preocupación pública regional. Numerosas quejas. Extensa y negativa atención de los medios locales y regionales.	3	Ocasional	Evento poco frecuente que puede ocurrir durante las operaciones pero solo de vez en cuando (10^{-3}).		
4	Severo	Muerte (1-2); múltiples lesiones graves / discapacidad permanente y efectos sobre la salud	Daños mayores. Pérdida de contención con escapes severos al medio ambiente. Escape o fuga con contaminación significativa fuera del sitio	Daños importantes al equipo: pérdida prolongada de operaciones. Prada parcial de la planta. Posibles daños limitados a edificaciones exteriores, infraestructuras, etc.	Gran impacto nacional. Preocupación pública regional. Numerosas quejas. Extensa y negativa atención de los medios locales y regionales. Cobertura nacional de prensa y TV.	4	Probable	Evento que ocurrirá con probabilidad durante la ejecución (10^{-1} a 10^{-2})		
5	Catastrófico	Múltiples muertes en el sitio y varias lesiones graves fuera del sitio.	Daños extensos: contaminación externa importante y sostenida con daños al medioambiente fuera del sitio.	Impacto masivo. Pérdida total de la unidad principal de la planta y posibles daños a unidades adyacentes. Daños extensos a muchos procesos y utilities.	Gran impacto internacional. Impacto severo potencial en el negocio futuro.	5	Frecuente	Es probable que ocurra varias veces al año en las localizaciones. Evento que es probable que ocurra varias veces al año durante la vida de la planta.		

Tabla 4.9.- Matriz de riesgos del proyecto. Fuente: Archivo.

La evaluación del nivel de riesgo residual se considera aceptable si la clasificación de riesgo cae en el área verde de la matriz de riesgo, por lo que no se requieren más acciones. Si la clasificación de riesgo obtenida cae en el área amarilla de la matriz de riesgo, se puede considerar como ALARP (tan bajo como sea razonablemente posible) y es decisión del equipo HAZID considerar si se consideran necesarias medidas de protección adicionales o no. Por otro lado, si la clasificación del riesgo cae en el área roja, el riesgo es crítico y se deben recomendar acciones adicionales de reducción del riesgo.

Se identificaron y analizaron un total de trescientos treinta y ocho (338) escenarios, Ver Figura 4.1 para detalles.

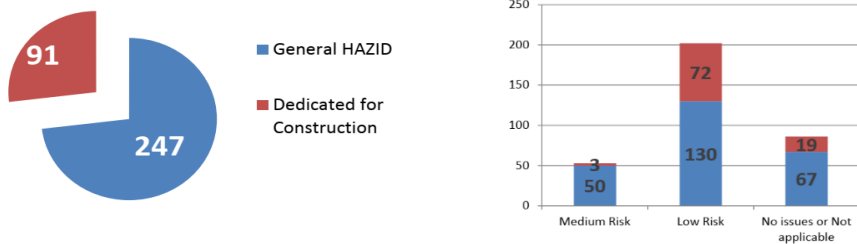


Figura 4.1.- Resultados del estudio HAZID detallado caso 2. Fuente: Archivo

Finalmente, se incluyen las recomendaciones generales y detalladas proporcionadas en el estudio.

Item	RESPONSABLE	ACCIÓN GENERAL RECOMENDADA
1	Contratista	Asegúrese de que se consideren las rutas de evacuación de emergencia adecuadas y los puntos de reunión durante el diseño.
2	Contratista	Asegurar que se proporcione el procedimiento adecuado para la puesta en marcha y las actividades de construcción simultáneas.
3	Contratista	Asegúrese de que todas las áreas de la planta estén cubiertas en el alcance del documento de filosofía de lucha contra incendios.
4	Contratista	Asegurar que el diseño de los sistemas eléctricos garantizará la integridad del sistema.
5	Contratista	Garantizar unas condiciones de trabajo ergonómicas y adecuadas para todas las instalaciones.

Item	RESPONSABLE	ACCIÓN SUGERIDA
1	Empleador & Contratista	Asegurar que se implemente un plan de capacitación continuo adecuado para garantizar las competencias de los operadores durante la vida útil de la planta (Empleador) El empleador proporcionará operadores calificados para la capacitación (Empleador) El contratista debe implementar un plan de capacitación para calificar a los operadores antes de hacerse cargo de la planta (Contratista)
2	Contratista	Asegúrese de que todas las posibles fallas de la Caldera y el equipo principal se analicen durante el estudio HAZOP
3	Contratista	Asegúrese de que el diseño de la chimenea cumpla con las aplicaciones de la normativa de aviación para las implicaciones del tamaño de la chimenea.
4	Contratista	Analizar todos los escenarios potenciales de incendio y explosión debido a la pérdida de control de la Caldera durante el estudio HAZOP o la evaluación del riesgo de explosión.
5	Contratista	Considere la posibilidad de implementar duchas de seguridad / lavaojos cerca del almacén de productos químicos.
6	Contratista	Se realizará un Análisis de Consecuencias para evaluar: escenarios de polvo, VCE y UVCE.
7	Contratista	Analizar todos los escenarios potenciales de incendio y explosión debido a la pérdida de control del FHS (incluidas las emisiones de polvo) durante el estudio HAZOP o la evaluación del riesgo de explosión.
8	Contratista	Asegúrese de que el diseño del sistema de descarga de camiones sea adecuado para minimizar el riesgo de accidente.
9	TBD	Para proporcionar la información de los servicios existentes.

Tabla 4.10.- Acciones recomendadas generales y particulares Caso estudio 2. Fuente: Archivo

Véase que como resultado del análisis HAZID se recomienda la realización de un análisis de consecuencias (recomendación N.º 6), el cual fue desarrollado posteriormente en la etapa de ingeniería de detalle.

Caso Estudio 3. HAZID Detallado para un ciclo combinado.

Para no centrar en exceso los casos a centrales térmicas, a continuación se incluye otro caso referido a un proyecto consistente en el cierre de un ciclo simple a ciclo combinado. El ciclo lo forman dos turbinas de gas cuyo calor residual de los gases de escape se aprovecharán mediante la instalación de sendas HRSGs que en ciclo cerrado generarán vapor que será conducido a un grupo turbina-generador donde se producirá energía eléctrica adicional a la que producen las turbinas de gas. El contrato es en la modalidad EPC.

La sesión HAZID se realiza en un único día con un equipo constituido por los siguientes perfiles clave:

Equipo del promotor, representado por:

- Director de Proyecto del propietario de la planta

- 5 ingenieros especialistas en operación y mantenimiento de la planta existente
- Responsable de ingeniería del proyecto
- Superintendente de operaciones
- Equipo de ingeniería de la propiedad, representado por el responsable del proyecto, responsable de HSE, responsable de calidad y responsables del emplazamiento por parte del cliente.

Equipo del contratista EPC, atendido por:

- Director de Proyecto
- Ingenieros de proyecto
- Responsable de HSE
- Responsable de ingeniería
- Responsable de procesos

Equipo de coordinación HAZID, compuesto por:

- Líder HAZID, el cual en este caso será un subcontrato de una tercera parte.

El equipo utilizó para su análisis las siguientes palabras Guía:

1. Riesgos externos y ambientales
 - 1.1. Riesgos naturales y ambientales
 - 1.2. Efectos de la instalación en el entorno
 - 1.3. Impacto medioambiental
 - 1.4. Infraestructura
2. Riesgos de las instalaciones
 - 2.1. Riesgos de incendio y explosión
 - 2.2. Riesgos del proceso
 - 2.3. Sistemas de servicios públicos
 - 2.4. Riesgos de mantenimiento
 - 2.5. Construcción / Instalaciones existentes
3. Riesgos para la salud
 - 3.1. Riesgos para la salud
4. Problemas de implementación del proyecto
 - 4.1. Implementación de proyecto

La metodología que se siguió para este estudio fue similar a la descrita antes para el HAZID detallado, para cada palabra guía, el equipo de HAZID analiza diferentes causas posibles y posibles consecuencias, así como las salvaguardas asociadas que son parte del diseño. Estas salvaguardas pueden ser medidas para prevenir que ocurra el peligro (medidas de prevención) y medidas para mitigar las consecuencias si el peligro ocurriera (medidas de mitigación).

Una vez definido el escenario completo para esta guía, el equipo categoriza el riesgo mediante la Matriz de Clasificación de Riesgo. Para hacer eso, la severidad y la probabilidad de cada consecuencia particular se especifican usando los siguientes criterios:

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

- Se evalúa la gravedad de las consecuencias sin considerar las medidas de mitigación identificadas. Las consecuencias pueden ser para la seguridad (personal o público en general), el medio ambiente, los activos o la imagen.

- El nivel de frecuencia se determina considerando la causa del peligro potencial.

Considerando que el nivel de riesgo es una combinación de consecuencia y probabilidad. El nivel de riesgo obtenido será de acuerdo con la ya conocida formulación:

$$Riesgo = Probabilidad \times Consecuencia$$

Las matrices de riesgo y el criterio de aceptación son similares a los que se definieron en el caso anterior y se han incluido en la Tabla 4.9.

A continuación se proporciona un ejemplo de la hoja de trabajo del estudio, que como se verá difiere de la que se presentó en la Figura 4.2.

Peligros (palabras guía)	Causas	Efectos de peligro / Consecuencias	C	P	R	Salvaguardas / Mitigación / Control	Nivel de riesgo	Recomendación	Acción por
1.1. Riesgos naturales y ambientales	1.1.1. Clima externo (viento extremo, máximo según xx-00-YTC-GR_xx-001: 165 km / h)	1.1.1.1. Daños a equipos y estructuras.	4	4	H16	1. Los equipos y estructuras están diseñados para este viento extremo.	Bajo	: No se necesita acción.	
	1.1.2. Clima externo (temperatura extrema, superior a 40,56°C (máxima según xxx-00-YTC-GR_xx-001))	1.1.2.1. Aumento de temperatura en estructuras con daños en las mismas. 1.1.2.2. Posible aumento de presión en líneas con líquido con potencial daño a las mismas.	3	5	H15	1. Los equipos y las estructuras están diseñados para esta temperatura extrema. 1. Medidas de seguridad como PSV, alarmas de presión, etc. (A analizar en detalle en el estudio HAZOP)	Bajo	: No se necesita acción.	
	1.1.3. Clima externo (temperatura extrema, inferior a 22°C (máxima según xxx-00-YTC-GR_xx-001))	1.1.3.1. Sin consecuencias significativas.							
	1.1.4. Clima externo (lluvia extrema)	1.1.4.1. Posible inundación de la instalación con riesgo de daños al equipo.	4	4	H16	1. Sistema de drenaje. 2. Nuevas instalaciones a la altura actual de la planta o por encima de ella. 3. Acondicionamiento y limpieza de los canales existentes.	Medio	: No se necesita acción.	
	1.1.5. Clima externo (niebla densa)	1.1.5.1. Posible colisión de camiones / equipos pesados con estructuras y equipos con posibles daños a las instalaciones y al personal. 1.1.5.2. Posible colisión de aeronaves ...	3 4	2 2	L6 M8	1. Limitación de velocidad. 2. Procedimientos operativos. 3. Iluminación. 4. Distancia de seguridad entre edificio y carretera considerada en planta de parcela o elementos mecánicos de protección. 1. Procedimientos operativos.	Bajo Bajo	No se necesita acción. : Sin acción ...	

Figura 4.3.- Ejemplo hoja de trabajo HAZID detallado Caso 3. Fuente: Archivo.

Finalmente se proporciona la lista de recomendaciones del estudio:

Proyecto de conversión de SC a CC

Sesión: (1)

Sistema / Categoría de peligro: (1) Conversión a ciclo combinado / Peligros externos y ambientales

Peligros (palabras de guía)	Nivel de riesgo con salvaguardas	Recomendaciones	Acción por
1.2. Efectos de la instalación en el alrededores	Bajo	1. Incluir este escenario (fuga en el gasoducto) en el QRA del proyecto.	HSE TR
1.4. Infraestructura	Bajo	2. Incluir en la Planificación de Emergencias los canales de comunicación para los grupos de respuesta a emergencias teniendo en cuenta la instalación de unión y la comunidad. 3. Verifique si las partes interesadas tienen números de teléfono de respaldo que no están conectados a Internet.	Termocandelaria / HSE TR Termocandelaria

Sistema / Categoría de peligro: Conversión de ciclo combinado / Peligros de las instalaciones

Peligros (palabras de guía)	Nivel de riesgo con salvaguardas	Recomendaciones	Acción por
2.1. Riesgos de incendio y explosión	Bajo	4. Proporcione el mantenimiento adecuado a los sistemas de aislamiento de las tuberías y siga las recomendaciones del manual de mantenimiento.	Propietario
	Bajo	5. Establecer comunicación con el departamento de extinción de incendios local para diseñar correctamente el sistema de extinción de incendios.	Propietario
2.4. Mantenimiento riesgos	Bajo	6. Asegúrese de que los equipos de extinción de incendios operados manualmente estén ubicados fuera de las zonas de radiación térmica que podrían afectar al personal (QRA).	HSE Contratista
	Bajo	7. Asegurarse de que las rutas de evacuación estén ubicadas fuera de las zonas de radiación térmica que puedan afectar al personal (QRA).	HSE Contratista
	Bajo	8. Identificar con carteles a cada aficionado. 9. Revise el acceso durante la revisión del modelo 3D. 10. Revise los sistemas de aislamiento y derivación durante la revisión del modelo 3D. 11. Diseñar interruptores locales manuales de acuerdo con la especificación contractual (en campo para aislar eléctricamente los equipos para evitar la puesta en marcha desde la sala de control).	HSE Contratista Contratista Propietario / Contratista Propietario / Contratista Contratista

Sistema / Categoría de peligro: Conversión de ciclo combinado / Riesgos para la salud

Peligros (palabras de guía)	Nivel de riesgo con salvaguardas	Recomendaciones	Acción por
3.1. Riesgos para la salud	Elevado	12. Asegurar la implementación de las recomendaciones de OMS.	Propietario / Contratista

Sistema / Categoría de peligro: (4) Ciclo combinado de Conversión / Problemas de implementación del proyecto

Peligros (palabras de guía)	Nivel de riesgo con salvaguardas	Recomendaciones	Acción por
4.1. Proyecto implementación	Bajo	13. Defina el alcance del entrenamiento de antemano (lo antes posible).	Propietario / Contratista
	Bajo	14. Asegúrese de que los equipos de logística tomen medidas cuando se prevé que las entregas de materiales se retrasen en el origen.	Contratista
	Bajo	15. Intensificar la comunicación entre Propietario y Contratista y TR luego de la entrega del material en origen.	Propietario / Contratista

Tabla 4.11.- Lista de recomendaciones estudio HAZID caso 3. Fuente: Archivo

4.4.2 Etapa de Ingeniería de Detalle

En este punto es muy interesante revisar con una perspectiva de más de una década el artículo de Fluor [175], donde la compañía declara la realización de estudios HAZOP como práctica habitual en los proyectos de construcción de centrales térmicas. Los análisis preliminares de peligros, estudios HAZOP y otros similares, se realizaban de manera sistemática en las plantas de generación y de cogeneración instaladas en refinerías o en sus instalaciones auxiliares. Sin embargo, hasta la fecha en la que Fluor lo amplía a las plantas de generación eléctrica, no era práctica habitual en estos proyectos. Hay algunas razones que lo pueden justificar, entre las que se encuentran la estabilidad tecnológica de los ciclos termodinámicos en los que se basan estas plantas o en la propia estabilidad de las redes eléctricas. Tras los cambios debidos a la incorporación de las energías alternativas, así como a cambios en la regulación medioambiental exigiendo menores cuotas de emisiones contaminantes a la atmosfera, se incorporaron nuevas tecnologías relacionadas con la combustión y en la depuración de gases, haciendo más exigentes las medidas de seguridad, ya sea desde el punto de vista medioambiental como de la propia seguridad de los procesos. La entrada en el mercado de la construcción de plantas de generación eléctrica de contratistas internacionales como Fluor, que tradicionalmente, trabajaban en otras industrias favoreció la incorporación y aplicación de estas técnicas por los clientes y promotores en sus especificaciones, haciendo de todo ello una mejora notable en términos de seguridad. Por ejemplo, muchos de los ciclos combinados que se construyeron en España en los primeros años del 2000-2005 no incorporaron estudios HAZOP en la fase de ingeniería, algo que ahora es absolutamente habitual en todos los proyectos.

4.4.2.1 Estudios HAZOP

En los últimos años la realización de estudios HAZOP en los proyectos de construcción de centrales eléctricas se ha convertido en práctica habitual y es común realizarlo al final de la ingeniería básica o al inicio de la ingeniería de detalle. Es tan común su realización que se considera habitualmente como hito de proyecto para la edición de los P&IDs y descripciones funcionales de los sistemas y equipos. Constituye un hito importante en la congelación del diseño de los sistemas y equipos que conformarán la central y proporciona una garantía al cliente de la correcta realización del diseño de la planta.

La metodología HAZOP puede ser aplicada además de a los sistemas de proceso, equipos mecánicos y unidades paquete, al diseño de los sistemas e instalaciones eléctricas, e-HAZOP, o HAZOP eléctrico. Un E-HAZOP es un estudio que se realiza sobre los sistemas eléctricos de la central para evaluar los peligros potenciales que pueden proceder del fallo de los sistemas, equipos y componentes eléctricos. Procede de la metodología HAZOP pero se especializa para sistemas eléctricos. Se analizan escenarios tales como sobrecargas de energía, fallos de suministro de 24 VCC, disponibilidad de fuente de alimentación ininterrumpida (UPS), fallos del transformador principal o de los trafos auxiliares, falta de tensión en barras de alimentación o de distribución entre otros. El e-HAZOP se realiza sobre todos los sistemas eléctricos, desde el sistema de generación, hasta la transformación, transmisión y la distribución de energía, incluyendo la filosofía de deslastre de carga, cuando así proceda. Mas adelante se proporcionará un caso de

estudio e-HAZOP para un ciclo combinado, que aunque no está extendida su aplicación, en los últimos años se ha visto los beneficios de su realización. Sirva como ejemplo la reflexión que se realiza en [176] acerca del uso de la metodología HAZOP para la distribución eléctrica.

En los últimos años, se está generalizando la incorporación en los proyectos de estudios HAZOP relacionados con los sistemas de control, los denominados C-HAZOP (Computer HAZOP). Un CHAZOP es un estudio HAZOP de los sistemas de control y seguridad que tiene por objeto evaluar y minimizar el efecto de los fallos de sus subsistemas que pueden tener consecuencias para la planta o que afectan a la capacidad de un operador para tomar determinadas acciones correctivas. Se extrapola de la metodología HAZOP pero se especializa en sistemas de control y sistemas de seguridad. Utiliza palabras guía específicas, por ejemplo, no hay señal, señal fuera de rango, no hay energía, no hay comunicación, fallo de la tarjeta de E / S, programación de software incorrecta o inadecuada así como ataque cibernético. Cubre además todos los lazos instrumentados de seguridad, desde la instrumentación de campo hasta los relés, sistemas de control (DCS, PLCs/SCADA, PSD / ESD, F&G, etc.), tarjetas de E/S, interruptores, actuadores, paneles de control local, alimentación, instrucciones, etc. Consultar [88] para detalles acerca de estas técnicas de análisis.

En los proyectos de plantas de generación se vienen realizando dos tipos de estudios HAZOP:

- HAZOP y
- HAZOP/SIL, donde se realiza de manera integrada el estudio HAZOP con el estudio de determinación o asignación de niveles SIL, lo que también es habitual en otros sectores.

La metodología HAZOP aplicada en los proyectos de centrales de generación eléctrica, es la habitual que se viene utilizando en otros sectores industriales. Se emplean una serie de palabras guía para instar a los especialistas a identificar peligros y posibles problemas de operatividad de la planta o sistema evaluado. El enfoque es multidisciplinar de modo que se aportan durante el estudio puntos de vista diversos. La metodología busca estimular el pensamiento creativo y el examen imaginativo del proceso sometido a revisión. El hecho de realizar las sesiones con equipos multidisciplinarios utilizando la técnica de la tormenta de ideas, proporciona una revisión de mayor profundidad y amplitud que la que se lograría de manera individual. El estudio utiliza como fuente principal y primaria de los datos los P&ID, así como las descripciones funcionales, planos de disposición general y otra documentación auxiliar que permita a los miembros del equipo comprender completamente el proceso que se está revisando. En plantas de generación eléctrica no es habitual el uso de diagramas causa-efecto como parte de la documentación, aunque dependiendo de las prácticas de los contratistas o promotores puede encontrarse su uso.

El proceso de revisión de HAZOP se puede resumir en los siguientes puntos clave:

1. Identificación de nodos. El líder del HAZOP divide la planta / sistema en secciones manejables denominadas nodos. Los nodos se acuerdan antes de iniciar las sesiones. El tamaño del nodo depende de la complejidad del sistema que se está estudiando pero, en general, un nodo consta de un equipo principal de equipo y las tuberías y equipos asociados. Los nodos, siempre que sea posible, comienzan y terminan en válvulas u otros límites físicos. El alcance de cada nodo se marca en su correspondiente P&ID.

2. Se define cual es la función principal del nodo y sus parámetros en operación normal. Antes del inicio del estudio del nodo el procesista procede con una breve presentación del nodo a analizar.
3. Utilizando las “palabras guía”, se aplica una desviación al nodo. Una desviación es una combinación de un parámetro (por ejemplo el flujo), y una palabra guía, (como puede ser menos), que combinadas hacen por ejemplo, menos flujo. Con el uso de las palabras guía combinadas con los parámetros se facilita el proceso de lluvia o tormenta de ideas de modo que se incita al equipo a proponer desviaciones en el diseño. Cada desviación se aplica al nodo que se está estudiando y se considera con referencia a los parámetros de proceso apropiados para desarrollar dichas desviaciones del diseño. Téngase en cuenta que no todas las combinaciones de palabra guía / parámetro son aplicables a todos los nodos y, cuando el equipo cree que este es el caso, se registra "no aplicable" o "no se identificaron causas".
4. Se identifican todas las posibles causas de la desviación. Es importante que las causas identificadas sean específicas, ya que las consecuencias, las salvaguardas y las probabilidades pueden variar según el modo de fallo. Además, no se deben considerar dobles causas de fallo.
5. Típicamente, en el HAZOP se consideran las siguientes causas principales: error humano, fallo del equipo y causas externas.
6. Para cada causa, se identifican todas las posibles consecuencias asumiendo que no existen salvaguardas. El equipo debe determinar las consecuencias de cada combinación de causa/ desviación identificada en términos del impacto en las personas, el medio ambiente y los equipos. Las consecuencias deben estar totalmente desarrolladas detallando los efectos que ocurrirían hasta que se materialice el evento final. Durante la determinación de las consecuencias, no se deben tener en cuenta tampoco las protecciones.
7. Identificar todas las salvaguardas existentes de que se dispone bien sea para prevenir la causa o para limitar las consecuencias. Las salvaguardas deben estar consideradas en el diseño en el momento de la revisión para ser tenidas en cuenta dentro del estudio HAZOP y no deben generar peligros adicionales imprevistos.
Cuando los procedimientos de operación y las acciones requeridas no están disponibles o lo suficientemente desarrolladas en el momento de realizar el HAZOP, las salvaguardas se registrarán como recomendaciones en lugar de salvaguardas para que sean incluidas en los correspondientes procedimientos.
8. Riesgo. Para cada elemento identificado, es necesario determinar si los niveles de riesgo son aceptables o no. Esta clasificación de riesgo se lleva a cabo utilizando la matriz de riesgo del proyecto. Para la asignación de la probabilidad y de las consecuencias, se dispone de tablas similares a las proporcionadas en la Tabla 4.9 que se proporcionó en el estudio HAZID.
La clasificación de riesgos debe llevarse a cabo evaluando la consecuencia final asumiendo que no hay salvaguardas. Sin embargo, la probabilidad considera la presencia de salvaguardas que actúan para reducir la probabilidad de que ocurra un evento. Cuando el nivel de riesgo es alto o cuando el riesgo no se considera aceptable, se hacen recomendaciones.
Las recomendaciones se deben redactar de forma independiente sin referencia a las hojas de trabajo de HAZOP y se asignarán a un responsable de realizar la acción de modo que pueda realizarse un seguimiento adecuado de cada una hasta su cierre.

9. Finalizar la evaluación del nodo identificando desviaciones adicionales a la estudiada y registrada; y repetir los pasos anteriores para el siguiente nodo hasta que se estudien todos los nodos definidos en el alcance del HAZOP.

Continuando con las actividades más representativas necesarias para realizar el estudio HAZOP, una vez que el procedimiento se encuentra definido y acordado entre las partes en base a las condiciones contractuales, la planificación y elección del momento adecuado para su realización puede resultar determinante en el éxito del propio proyecto. Si el estudio HAZOP se realiza muy tarde y con el diseño muy maduro, algunas recomendaciones podrán tener una difícil implementación. La dificultad para implementar las acciones del HAZOP puede ocurrir por la inversión necesaria para su implementación, por el tiempo requerido para obtener los materiales y equipos necesarios o por el tiempo de montaje adicional para su instalación en planta. Por el contrario, si el diseño está poco maduro en el momento de su evaluación entonces se estará probablemente realizando un análisis deficiente y el estudio no tendrá la profundidad necesaria, lo que probablemente conduzca a comentarios y reclamaciones continuas durante el diseño que podrían haber sido evitadas si el HAZOP se realiza con el proyecto en un estado adecuado para su análisis.

En proyectos EPC, es habitual que las partes acuerden una fecha tentativa en el cronograma de proyecto contractual marcando hitos por ambas partes para su cumplimiento. Como se indicó antes el HAZOP se ha convertido en una garantía para las partes de que el diseño se ha realizado atendiendo a las mejores prácticas. Disponer de la documentación y garantizar que los especialistas la estudian de acuerdo con el cronograma forma parte del éxito del HAZOP.

En los proyectos de construcción de plantas de generación de electricidad es habitual disponer de sesiones diferenciadas para los equipos principales y para los sistemas y equipos auxiliares del BOP (Balance Of Plant). Así es muy habitual programar las sesiones y dividir la planta en:

- Sistemas Agua Vapor del BOP
- Caldera y equipos Auxiliares
- Turbina de Gas y HRSGs para ciclos combinados
- Turbina de Vapor
- Sistemas Auxiliares
- Sistemas paquete

Cuando se realiza un HAZOP eléctrico (en ocasiones se incluye como parte del HAZOP principal), se designa como otros nodos adicionales relacionados con:

- Sistemas eléctricos

En los proyectos de construcción de centrales térmicas, es habitual la paquetización de algunas unidades o sistemas de proceso que permiten independizarlas del resto del proyecto, bien por sus características o bien por su envergadura. Uno de los problemas que se tienen en la ejecución de los proyectos es la coordinación en la planificación de las actividades relacionadas con el HAZOP con la compra temprana de estas unidades paquete. Es muy difícil coordinar estos grandes suministros con la ejecución de la ingeniería del proyecto de tal modo que los diseños se encuentren en un estado de avance similar que permita hacer coincidir el HAZOP de unos sistemas

con los de las unidades paquete. Ejemplos de unidades paquete a las que suele realizársele un HAZOP independiente o en fases diferentes del diseño son:

- Sistemas de manejo de sólidos. Sistemas en los cuales se almacena y transportan combustibles sólidos como carbón, biomasa, petcoke u otros desde los parques de almacenamiento hasta los silos de alimentación diarios de la caldera. También se encuentran en esta categoría, los sistemas de manejo de cenizas y los sistemas de almacenamiento y tratamiento de caliza para sistemas de desulfuración de gases.
- Sistemas de almacenamiento de combustible líquido desde los tanques de almacenamiento hasta los tanques diarios. Sistemas más habituales en plantas de energía de refinerías.
- Sistemas de tratamiento de agua, sistemas de tratamiento de gases.
- Estaciones de regulación y medida de gases y Estaciones de compresión. Ambas normalmente parte del alcance del contratista pero con muchas interfases con el cliente.

Ejemplos de análisis HAZOP para centrales térmicas se pueden encontrar en la bibliografía [134], [143], [145] o [146].

A continuación se proporcionan dos ejemplos como casos de estudio significativos, ambos para un ciclo combinado. En el primer caso se proporcionará la metodología y resultados más significativos de un análisis HAZOP y el segundo un análisis combinado HAZOP/SIL también para un ciclo combinado, el cual cada vez es más habitual para cubrir la demanda de los clientes en cuanto al cumplimiento de la normativa IEC 61508 y 61511.

Estudio Caso 4.- HAZOP

El estudio elegido es el realizado durante 10 días en las oficinas del contratista principal de un proyecto de construcción de una central térmica de 800 MW en México consistente en la instalación llave en mano (EPC) de un ciclo combinado en configuración 2x2x1. La planta consta de los siguientes equipos principales:

- Turbinas de Gas para la operación con combustible gas natural
- Sistema de recuperación de calor residual, mediante la instalación de sendas calderas de recuperación HRSG, con tres niveles de presión.
- Sistema de vapor con sistema de derivación (bypass) al condensador.
- Turbina de vapor que recoge el vapor procedente de las HRSGs y lo turbinas en tres niveles operativos de presión.
- Aerocondensador para condensación y recuperación del vapor expandido en la turbina de vapor.
- Generadores eléctricos refrigerados por hidrogeno
- Sistema de interconexión con la red eléctrica mexicana mediante la instalación de dos subestaciones eléctricas
- Estación de regulación y medida y sistema de compresión de gas natural para regular la presión operativa de gas en todo el rango de presión requerido.
- Planta de tratamiento de agua desmineralizada y efluentes líquidos
- Otros sistemas auxiliares de la central como aire comprimido, muestreo o dosificación química entre otros.

El alcance de los sistemas y equipos se dividió en 59 nodos, de cuyo análisis se registraron un total de 61 recomendaciones. Los nodos se marcaron en los P&ID los cuales forman parte esencial de la documentación del estudio para el desarrollo de las sesiones. Los siguientes sistemas y equipos de paquetes fueron analizados durante el estudio:

- Sistemas de combustible gas
- Sistemas de agua vapor: Sistema de agua de alimentación, sistema de vapor y bypass, sistema de vapor auxiliar, sistema de condensado
- Sistemas de refrigeración auxiliar: sistema de agua de circulación, sistema de agua de enfriamiento secundario, sistema de agua de refrigeración del circuito cerrado
- Sistemas auxiliares de planta: Sistema de distribución de agua desmineralizada y de servicio, sistema de distribución de agua potable, sistema de drenajes de planta
- Sistemas y plantas paquete:
 - o Estación de regulación y medida de gas
 - o Compresores de gas
 - o Aerocondensador (ACC)
 - o Turbinas de gas
 - o HRSGs
 - o Turbina de vapor
- Otros sistemas como sistema de aire comprimido, dosificación química o drenajes de caldera.

En el Anexo 1 se proporciona la lista de nodos del proyecto.

La metodología usada se corresponde esencialmente con la norma IEC 61882 [177] y las prácticas reguladas por la compañía contratista del proyecto, ya que el cliente no aporta ni requisitos metodológicos ni matriz de riesgos.

La matriz de riesgos del proyecto y otras consideraciones de la realización del estudio se proporcionan en detalle en el Anexo 1, donde se ha incorporado un resumen del mismo.

En la Tabla 4.12 se proporcionan las matrices de trabajo del proyecto.

Índice de Frecuencia del evento		
Tipo	Frecuencia	Significado
1	Extremadamente raro	No se espera que ocurra durante la vida del equipo (probablemente una vez durante 100 – 1000 años)
2	Raro	Pudiera ocurrir una vez durante la vida del equipo (probablemente una vez durante 10 – 100 años)
3	Poco Frecuente	Pudiera ocurrir una vez durante la vida del equipo (probablemente una vez durante 1 – 10 años)
4	Frecuente	Pudiera ocurrir más de una vez al año

Índice de magnitud de las consecuencias	
Tipo	Significado
1	Ligera No ocurren lesiones ni impacto a la salud y al ambiente. Sin daños a equipos. Sin pérdidas de producción. Costes por daños menor de 75.000\$.
2	Moderada Lesiones menores, daño menor a la salud y al ambiente. Daños menores a equipos. Pocos días de pérdida de producción (menos de 1 semana). Costes por daños entre 75.000\$ y 750.000\$.
3	Severa Lesiones o impacto moderado a la salud y al ambiente. Daños importantes a equipos. Pérdida parcial de producción (más de 1 semana). Daños ilimitados en el exterior de la Planta. Costes por daños entre 750.000\$ y 7.500.000\$.
4	Catastrófica Muerte o lesiones severas (catastrófico) y gran impacto al ambiente. Impacto masivo con pérdida total de la Planta y daños ilimitados en el exterior de la Planta. Costes por daños mayor de 7.500.000\$.

Matriz de Jerarquización de Riesgo					
Índice de Riesgo		Magnitud			
		Ligera	Moderada	Severa	Catastrófica
Frecuencia	Extremadamente raro	1	2	3	4
	Raro	2	4	6	8
	Poco Frecuente	3	6	9	12
	Frecuente	4	8	12	16

Clasificación Riesgo		
Rango	Significado	Descripción
1, 2, 3	Aceptable	Rango general aceptable. No se requieren medidas de mitigación y abatimiento, sin embargo se debe asegurar la implementación de las medidas de seguridad establecidas.
4 y 6	Aceptable con control	Se deben revisar controles y procedimientos de ingeniería y administrativos y realizar las modificaciones y cambios pertinentes en un periodo corto de 3 a 6 meses.
8 y 9	No deseable	Se deben revisar controles y procedimientos de ingeniería y administrativos y realizar las modificaciones y cambios pertinentes en un periodo corto de 1 a 3 meses.
12 y 16	Inaceptable	Se deben revisar controles y procedimientos de ingeniería y administrativos y realizar los ajustes requeridos para contar con una instalación segura. Periodo de ejecución inmediato.

Tabla 4.12.- Matriz de jerarquización y clasificación del riesgo. Fuente: Archivo.

A continuación se proporciona un ejemplo de hojas de trabajo y resultados para el nodo 4:

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

WORKSHEETS

CCGT

Compañía / Company: CCGT PROJECT
 Instalación / Facility:

Página / Page: 17 of 2.

Sesión / Session: (1) 12/03/2018
 Nodo / Node: (4) Desalted water and EDI system / Sistema de agua desalada y sistema EDI
 P&IDs: 70140-00-GA_-MDD- -119-01; 70140-00-GC_-MDD- -118-04; 70140-00-GC_-MDD- -118-08
 Variable: Caudal

Palabra Guía / Guideword	Desviación / Deviation	Causas / Causes	Consecuencias / Consequences	Salvaguardas / Safeguards	C	F	R	Recomendación / Recommendation	Responsable / Responsible	Fecha de Cierre / Close Date	Notas / Notes
Más	Más Caudal	4.1. Los dos ventiladores de degasificación 00GCF41/42AN001 funcionando simultáneamente. 4.2. Las dos bombas de alimentación EDI 00GCF61/62/AP001 funcionando simultáneamente.	4.1.1. Sin consecuencias significativas. 4.2.1. Bajo nivel en el tanque 00GCF40BB001 con posible daño mecánico a las bombas 00GCF61/62/AP001 por cavitación.	1. Alarma de alto caudal en 00GCF80CF001 2. Alarma de bajo nivel en el tanque (00GCF40CL001) con paro forzado de las bombas 00GCF61/62/AP001	2	1	2				
Menos	Menos Caudal	4.3. Bajo nivel en el tanque 00GCF40BB001. Ver nodo #3. 4.4. Fallo de los ventiladores de degasificación 00GCF41/42AN001. 4.5. Fallo de las bombas de alimentación EDI 00GCF61/62/AP001.	4.3.1. Bajo nivel en el tanque 00GCF40BB001 con posible daño mecánico a las bombas 00GCF61/62/AP001 por cavitación. 4.4.1. Aumento del CO ₂ en la corriente de agua hacia el sistema EDI. Posible precipitación de cal en el equipo EDI. Producto fuera de especificación. 4.5.1. Alto nivel en el tanque de agua desalada. Pérdida de agua a través de la línea de reboso. 4.5.2. Posible daño al EDI por bajo caudal (daño a los internos e incrustaciones). 4.5.3. No caudal de agua hacia el tanque de agua desmineralizada. Pérdida de producción. 4.6. Obstrucción de los filtros de cartucho EDI.	1. Alarma de bajo nivel en el tanque (00GCF40CL001) con paro forzado de las bombas 00GCF61/62/AP001 1. Arranque automático del ventilador 00GCF41/42AN001 en espera en caso de fallo 2. Alarma de alta conductividad en 00GCF90CQ001 1. Alarma de alto nivel en el tanque (00GCF40CL001) 1. Disparo del EDI en caso de bajo caudal (activado por baja diferencia de presión entre 00GCF81CP001 y 00GCF81CP002 o por bajo caudal 00GCF90CF001 y 00GCF95CF001) 1. Alarma de bajo caudal en 00GCF80CF001 2. Alarma de bajo caudal en 00GCF90CF001 1. Alarma de alta diferencia de presión en...	2	1	2				En caso de formación de cal, es necesario realizar una limpieza antes de poner en servicio.

Se incluye también como referencia la hoja de trabajo del mismo nodo con la recomendación 4.1

Sesión / Session: (2) 13/03/2018
 Nodo / Node: (4) Desalted water and EDI system / Sistema de agua desalada y sistema EDI
 P&IDs: 70140-00-GA_-MDD- -119-01; 70140-00-GC_-MDD- -118-04; 70140-00-GC_-MDD- -118-08
 Variable: Servicios

Palabra Guía / Guideword	Desviación / Deviation	Causas / Causes	Consecuencias / Consequences	Salvaguardas / Safeguards	C	F	R	Recomendación / Recommendation	Responsable / Responsible	Fecha de Cierre / Close Date	Notas / Notes
Pérdida de	Pérdida de Servicios	4.20. Fallo del suministro de aire de instrumentos. 4.21. Fallo del suministro eléctrico.	4.20.1. La válvula 00GCF90AA081 falla en posición abierta. Esta es la posición segura. Ver parámetros anteriores en este nodo. 4.20.2. Las válvulas 00GCF81/82AA081 fallan en posición abierta. Esta no es la posición segura. Ver parámetros anteriores en este nodo. 4.20.3. Las válvulas 00GCF81/82AA082 fallan en posición abierta. Esta es la posición segura. Ver parámetros anteriores en este nodo. 4.21.1. Paro de los ventiladores de degasificación 00GCF41/42AN001. Ver parámetros anteriores en este nodo. 4.21.2. Paro de las bombas 00GCF61/62/AP001. Ver parámetros anteriores en este nodo. 4.21.3. Paro de los módulos EDI 00GCF81/82AT001. Ver parámetros anteriores en este nodo.					4.1. Cambiar la posición ante fallo de aire de instrumentos de las válvulas 00GCF81/82AA081 a fallo cierra.	TR Procesos		Próxima edición de P&IDs

La ejecución del estudio HAZOP se realizó de acuerdo con el proceso de la siguiente figura.

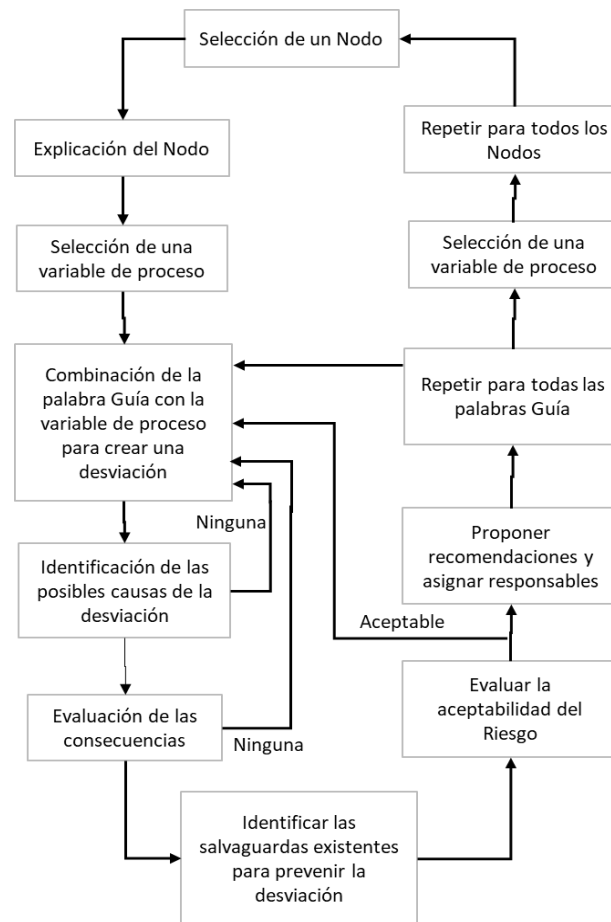


Figura 4.4.- Ejecución del estudio HAZOP. Fuente: Archivo.

Las principales recomendaciones que se encuentran listadas en el Anexo 1 y que se obtuvieron en el estudio, pueden ser incluidas en alguno de los siguientes bloques:

- Asegurar que las condiciones de diseño de las líneas son adecuadas a las de los transitorios.
- Dotar de elementos de alivio de fluidos en tuberías para asegurar malas operaciones.
- Comprobar que las posiciones de fallo de los elementos finales de control responden a los requisitos de fallo seguro de la instalación.
- Incorporar o modificar las lógicas de control en los sistemas de control con objeto de garantizar la protección o disparo de los equipos cuando así sea requerido.
- Implementar alarmas que alerten al operador de condiciones de operación anormales.
- Corregir o modificar errores que se detectan durante la revisión.

El HAZOP realizado no considera la valoración de otros aspectos tales como:

- Capacidad de respuesta del operador ante alarmas y condiciones de operación adversas.
- Seguridad funcional de los lazos evaluados.
- Racionalización de alarmas y respuesta ante emergencias.
- Sistemas de protección incluidos en el diseño así como sus características operativas y funcionales
- Lazos de seguridad existentes y necesidad de incorporación de lazos adicionales.

Los estudios HAZOP por sí mismos no proporcionan respuestas a estos asuntos y debe ser un estudio más completo el que los proporcione. El caso de estudio siguiente precisamente se incluye para incorporar este tipo de detalles. A pesar de que en los últimos años se está extendiendo la realización de estudios HAZOP/SIL, la realidad es que la cultura de las empresas que se involucran en la construcción de centrales eléctricas, todavía tiende a la ley de cumplimiento contractual mínimo que cubra los aspectos relacionados con la seguridad, sin existir el convencimiento a nivel organizativo y empresarial suficiente de que, este estudio, puede resultar determinante en la prevención de accidentes graves y de alcances con consecuencias letales para las personas o el medioambiente. Es conocida su utilidad en la prevención de accidentes, pero no ha calado con la suficiente profundidad la mentalidad enfocada a la seguridad de los procesos. Se tiende a pensar que las salvaguardas y recomendaciones que se realizan en estos estudios vienen a cubrir procedimientos administrativos y de responsabilidades estrictamente normativas, sin que los líderes de los proyectos asuman lo que los especialistas ya tienen asumido a la hora de diseñar con el objetivo prioritario de la seguridad del proceso frente a la reducción de costes del proyecto.

Estudio Caso 5.- HAZOP/SIL

Se ilustra la metodología HAZOP/SIL con un ejemplo de aplicación a un ciclo combinado de última tecnología instalado en Emiratos Árabes. La planta tiene una capacidad nominal de 1.800 MW y está diseñada para quemar gas natural como combustible principal y fuel oil cuando no hay gas disponible. La planta consta de tres bloques de energía idénticos con los siguientes equipos clave:

- Turbinas de gas de última generación, con sistema de combustión seco bajo en NOx y diseñada para funcionar con combustible dual. Para la operación con fueloil se inyectará agua desmineralizada en la cámara de combustión para cumplir con los niveles de emisión aplicables.
- El gas natural será suministrado directamente a la planta por el cliente a través de un solo gasoducto. El punto terminal de la planta está en el límite del sitio.
- La instalación ya cuenta con tanques de almacenamiento de fueloil que se conectarán a la planta por tubería y bombas de transferencia a pie de los tanques existentes.
- Generadores refrigerados por hidrógeno acoplado directamente a la turbina de gas.
- Generador de vapor de recuperación de calor de recalentamiento de triple presión (HRSG) para cada turbina de gas. Cada HRSG está equipada con chimenea principal y de bypass para la operación en ciclo abierto.
- Turbinas de vapor de recalentamiento que operan a triple presión.
- Generador refrigerado por aire acoplado directamente a la turbina de vapor.
- Condensador de enfriamiento directo para condensar el vapor de la turbina de vapor.
- El agua de mar alimentará los sistemas auxiliares y de refrigeración de la planta mediante bombas que se instalan en una obra de toma de entrada existente en la actualidad. El agua de enfriamiento y el agua de drenajes durante el arranque y la operación normal se descargarán al emisario existente después del tratamiento adecuado.

- El agua de refrigeración entrante se clorará en la estación de entrada de agua de mar con hipoclorito de sodio para evitar la contaminación biológica. El hipoclorito de sodio se generará mediante un sistema de electrocloración y se almacenará en un tanque.
- Los productos químicos para mantener el agua del ciclo en la calidad adecuada se introducirán en la línea de condensado, en los calderines de la caldera y en el agua de refrigeración del circuito cerrado para evitar la corrosión de las tuberías.
- Una planta de tratamiento de agua tomará agua de mar y producirá agua de desmineralizada mediante ósmosis inversa de doble paso e intercambiadores de lecho mixto para tratamiento final. El agua desmineralizada se almacenará en tanques y se suministrará a los consumidores y al ciclo agua / vapor a través de bombas de transferencia.
- Habrá sistemas de agua independientes para agua potable (edificios con personal, baños y duchas de seguridad) y para agua contra incendios.

El Estudio de determinación de HAZOP / SIL se llevó a cabo en trece (13) sesiones en las oficinas del contratista principal con una consultora externa que actuó como tercera parte. Las sesiones de HAZOP / SIL se centraron en la identificación de posibles problemas de riesgo y operatividad dentro del proyecto aplicados al ciclo agua vapor y sistemas auxiliares. Los equipos principales y HRSG fueron objeto de un estudio HAZOP/SIL separado que llevo a cabo el tecnólogo con asistencia de especialistas del contratista. Esto fue así debido a los alcances contractuales entre las partes y es una opción habitual cuando se ejecutan proyectos EPC en modalidad consorcial.

El alcance del suministro se dividió en un total de sesenta y cuatro (64) nodos. Estos nodos se marcaron en los P&ID que formaban parte de la documentación necesaria para el desarrollo de las sesiones. Los siguientes sistemas y equipos de paquetes fueron analizados durante el estudio:

- Sistemas de combustible gas y combustible líquido
- Sistemas de agua vapor: Sistema de agua de alimentación, sistema de vapor y bypass, sistema de vapor auxiliar, sistema de condensado
- Sistemas auxiliares de turbina: sistema de drenaje y ventilación de turbina de vapor, sistema de sellos de turbina y sistema de aceite de lubricación de turbinas de vapor y aceite hidráulico
- Sistemas de refrigeración auxiliar: sistema de agua de circulación, sistema de agua de enfriamiento secundario, sistema de agua de refrigeración del circuito cerrado
- Sistemas auxiliares de planta: Sistema de distribución de agua desmineralizada y de servicio, sistema de distribución de agua potable, sistema de drenajes de planta
- Plantas de tratamiento de agua y tratamiento de efluentes
- Sistemas y plantas paquete como sistema de suministro de gases, paquete de compresores de gas, estación de regulación y medida RMS, planta de generación de hidrogeno, planta de electrocloración
- Otros sistemas como sistema de aire comprimido, dosificación química o drenajes de caldera.

La metodología utilizada en el estudio HAZOP/SIL fue la misma a la aplicada en el caso de estudio anterior y es la estándar del HAZOP. Cuando se realiza el estudio SIL a continuación del HAZOP, una vez valorado y categorizado el riesgo (paso 8 descrito arriba), se realizan los siguientes pasos adicionales, tal como se detalla a continuación:

9. En este paso es necesario identificar las IPL (capa de protección independiente). El equipo tiene que identificar las barreras de seguridad o IPL disponibles según IEC 61511-3 [86]. Ver Tabla 4.13.

Una IPL es un tipo especial de protección que cumple con los criterios de “especificidad” (deben estar diseñadas para prevenir o mitigar las consecuencias del evento peligroso), de “independencia” (deben ser independientes unas IPL de otras), de “fiabilidad” (su probabilidad de fallo debe ser menor del 10% y demostrarlo), y finalmente de “auditabilidad” (hay que realizar pruebas de comprobación y un buen mantenimiento, de manera a que mediante auditorias se garantice que se dispone del nivel de reducción de riesgo especificado).

Capa de Protección Independiente IPL (Independent Layer Protection)	RRF	Créditos
Cualquier intervención del operador (procedimiento, procedimiento de operación, inspección visual periódica, acción ...)	10	1
Alarma en DCS con intervención eficiente del operador	10	1
Enclavamiento de proceso en DCS	10	1
Mecánica, intrínsecamente segura (independiente de SIS o DCS)	10 a 100	1 a 2
Válvulas de retención dobles en serie de diferentes tipos (solo para escenarios de flujo inverso). Debe estar diseñado para mitigar el escenario. Además, las válvulas de retención deben ser parte del programa de mantenimiento preventivo de la instalación.	10	1
Válvula de alivio de presión (PRV) en servicio limpio	100	2
Más de una PRV en servicio limpio. Cada PRV debe dimensionarse para mitigar completamente el escenario "	1000	3
Hay más de una PRV disponible, pero se requiere más de una para mitigar la plena carga.	10	1
PRV redundante en servicio de conexión, con conexiones de proceso independientes. Cada PRV debe dimensionarse para mitigar completamente el evento o suceso peligroso	10	1
PRV con disco de ruptura integrado. Se debe instalar un manómetro para medir la presión entre el disco de ruptura y la PRV para detectar pequeñas fugas en el disco. La PRV debe dimensionarse para mitigar completamente el escenario.	10	1
PRV con disco de ruptura integrado con purga. Se debe instalar un manómetro para medir la presión entre el disco de ruptura y la PRV para detectar pequeñas fugas en el disco. La PRV debe dimensionarse para mitigar completamente el escenario "	10	1
Disco de ruptura	1000	3
Disco de ruptura del recipiente en servicio de taponamiento. Debe estar diseñado para mitigar el escenario. La liberación debe evaluarse por riesgo potencial	10	1
Rompedora de vacío	10	1
Orificio restrictivo Además, los orificios de restricción afectados deben ser parte de la prevención del programa de mantenimiento preventivo de la instalación.	100	2
SIF con SIL1	10	1
SIF con SIL2	100	2
SIF con SIL3	1000	3
Pendiente o arqueta de retención, si puede retener el evento inicial; IPL contra consecuencias ambientales	100	2
Detección de incendios con sistema de diluvio de agua	10	1
Monitores de gas con diluvio automatizado	10	1
Apagallamas	10	1

Tabla 4.13.- Capas de Protección Independiente y Créditos de reducción riesgo.

10. Categorizar la Consecuencia: Para cada consecuencia se debe indicar si es una posible causa de daño o no, indicando si es “Peligrosa” o es “No peligrosa”.

NOTAS: Si la consecuencia es “No peligrosa” no es necesario continuar el estudio y se continuará con el análisis de la siguiente consecuencia.

Si la consecuencia es “peligrosa”, pero está cubierta por un diseño inherentemente seguro, por ejemplo, una bomba diseñada para parar, una línea diseñada para manejar dos fases, un recipiente diseñado para vacío total, etc., no es necesario realizar la clasificación del riesgo, porque el propio diseño de la instalación evita la situación de peligro. Esta situación también se registrará en la hoja de trabajo. En este caso se incluirá la categoría (entre paréntesis):

- a. “S” Si la consecuencia implica daños a personas (Seguridad).
- b. “E” Si la consecuencia implica daño al medio ambiente (Ambiental).
- c. “P” Si la consecuencia implica daños en las instalaciones de la planta o pérdida de producción.

NOTAS: Una consecuencia se puede categorizar en a, b o c solamente, o a una combinación de dos, o de todas las categorías. Será una decisión del equipo esta categorización.

11. Clasificación de riesgo. Esto se hace solo en el caso de una consecuencia "peligrosa" o si un enclavamiento se ha definido como salvaguardia. En este último caso el equipo que está estudiando el nivel SIL estudiará y analizará por qué el enclavamiento ya es parte del sistema de seguridad (SIS) cuando no hay consecuencia “Peligrosa” y dejará la conclusión descrita en la hoja de trabajo en la columna “Notas SIL”. El riesgo se determina con los créditos de la IPL, la probabilidad de la causa y la gravedad de las consecuencias.

Las Tablas 4.14 y 4.15 y la Figura 4.5 proporcionan la metodología para la asignación del riesgo en este caso de estudio.

Tipo de causa	Probabilidad (análisis cualitativo)
Múltiples fallos de - Instrumentos o válvulas diferentes. - Múltiples errores humanos en un entorno libre de estrés. - Fallos espontáneos del equipo.	Bajo (L)
Situaciones como - Fallo de dos instrumentos. - Fallo de dos válvulas. - Liberaciones importantes en áreas de carga / descarga.	Medio (M)
Situaciones como: - Fugas de proceso - Fallo de un solo instrumento - Fallo de una sola válvula - Errores humanos, que pueden dar lugar a pequeñas emisiones de sustancias peligrosas.	Alto (H)

Tabla 4.14.- Probabilidad (Likelihood)

Impacto	Clasificación de gravedad
<ul style="list-style-type: none"> • Daños significativos a las instalaciones de la planta (más de 750.000 \$) • Parada de la unidad durante un intervalo de tiempo considerable. • Consecuencias catastróficas para la vida humana (más de una muerte). • Consecuencias catastróficas para el medio ambiente (contaminación significativa fuera del área de la planta) 	Grave (E)
<ul style="list-style-type: none"> • Daños a las instalaciones de la planta (hasta 750.000 \$) • Parada de la unidad por breves intervalos. • Daño significativo a humanos (hasta 1 fatalidad) • Graves daños al medio ambiente (contaminación moderada dentro de la planta área o alguna contaminación fuera del área de la planta) 	Seria (S)
<ul style="list-style-type: none"> • Daños menores al equipo (hasta 75.000 \$) • Daño no permanente a personas • Impacto temporal al medio ambiente 	Menor (M)

Tabla 4.15.-Categorización de las consecuencias. Fuente: Archivo.

Teniendo en cuenta el parámetro de probabilidad y severidad y el número de IPL, la necesidad o no de SIF adicionales y su SIL se asigna utilizando la siguiente matriz:

Numero de IPL		SIL requerido								
		Menor (M)			Seria (S)			Grave(E)		
Probabilidad de la causa	Baja (L)	Media (M)	Alta (H)	Baja (L)	Media (M)	Alta (H)	Baja (L)	Media (M)	Alta (H)	
	3	-	-	-	-	-	-	-	1	1
2	-	-	1	-	1	2	1	2	3	
1	-	1	2	1	2	3	3	3	> 3 (Revisar diseño)	

- Riesgo Aceptable.No se requiere SIS. Sistema no critico
- Riesgo Bajo Requerido SIL 1 como nivel de seguridad para la Función Instrumentada de Seguridad . Si no es posible proporcionar SIL 1, se debe producir una nota de riesgo con la solución propuesta y enviarla para su validación (tolerable si es ALARP).
- Riesgo Moderado. Función Instrumentada de Seguridad SIL2
- Riesgo Alto. Función Instrumentada de Seguridad SIL3, Sistema Critico

Figura 4.5.- Asignación SIL requerido. Fuente: Archivo.

Como resultado de esta matriz, se pueden requerir SIL 1, 2 o 3. Esto significa que se necesita una reducción adicional del riesgo y durante el proceso de trabajo puede ocurrir:

- a. Que se identifique una Función Instrumentada de Seguridad, SIF, en cuyo caso se le asigna el SIL obtenido de la matriz para llegar a la zona de riesgo aceptable.
 - b. Que ningún SIF está identificado como salvaguarda, ni está incluido en P&IDs, pero es necesario reducir el riesgo, porque se ha llegado al SIL 1, 2 o 3, pero el proceso permite la implementación de un nuevo SIF con el SIL que se obtuvo de la matriz. En este caso se debe indicar el iniciador y el elemento final y en las notas se debe incluir que este debe ser implementado.
 - c. Que ningún SIF está identificado como salvaguarda, ni incluido en P&IDs, pero es necesario reducir el riesgo, porque hemos alcanzado SIL 1, 2 o 3 y el proceso no permite identificar e incluir un nuevo SIF, por lo que quedan con un riesgo residual, que debe cerrarse mediante otros procedimientos o buscando otras capas de protección.
12. El líder del HAZOP se asegurará entonces de que el equipo evalúe la aceptabilidad del riesgo, sobre la base de las causas, consecuencias y capas de protección con el SIL complementario requerido. Si el riesgo es aceptable, el equipo continuará con el paso 7 del propio proceso HAZOP.
 13. Si el riesgo está en el área inaceptable o las capas de protección se consideran insuficientes, el equipo recomendará acciones e identificará el SIL requerido de acuerdo con la clasificación de Riesgo. Todas las acciones se asignan a una persona / departamento responsable.
 14. El líder del equipo seleccionará otra palabra guía para combinar con el mismo parámetro y así crear otra serie de desviaciones repitiendo los pasos 6 a 16, hasta que se agoten las palabras guía.
 15. Cuando se han agotado todas las palabras guía, el líder selecciona otra variable y repite los pasos del 7 al 16. Cuando se agotan todas las variables, el equipo selecciona un nuevo nodo y repite los pasos del 4 al 16.
 16. Estos pasos se repiten hasta que se hayan cubierto todos los nodos.

Con objeto de proporcionar un esquema equivalente al mostrado en la Figura 4.4, pero para el estudio HAZOP/SIL, la secuencia del análisis se muestra en la figura siguiente:

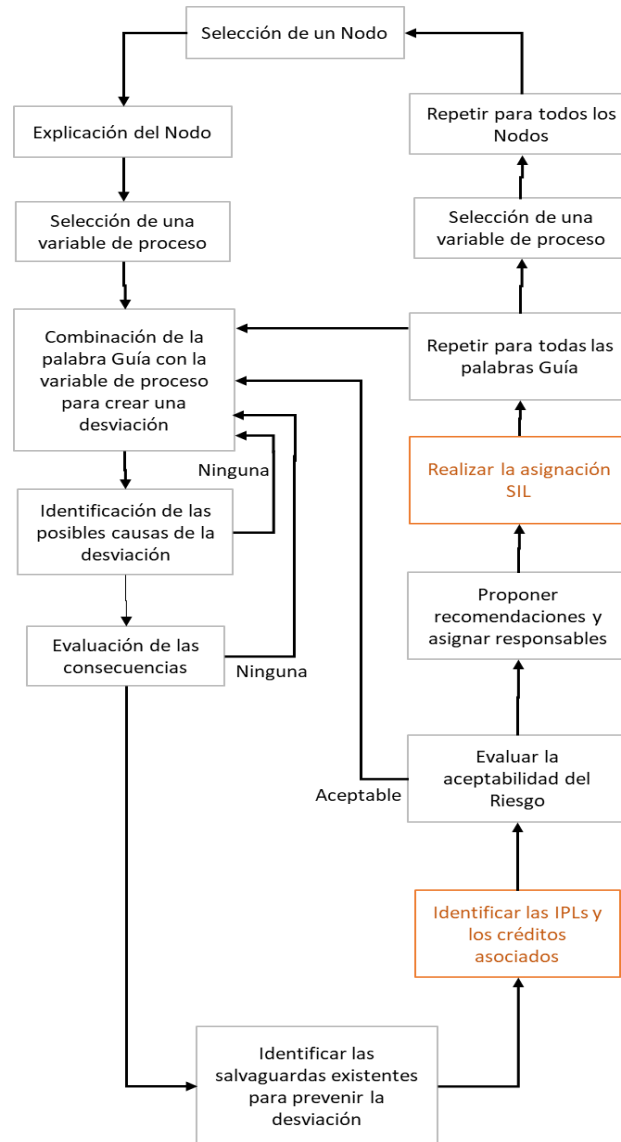


Figura 4.6.- Esquema del proceso HAZOP/SIL.

Con el fin de apreciar las diferencias entre el estudio HAZOP y el estudio HAZOP/SIL, a continuación se proporciona la hoja de trabajo de un nodo del sistema equivalente para esta planta al mostrado en el estudio HAZOP anterior. Se ha elegido un nodo del sistema de agua de condensado donde estudiando la variable nivel se identifican causas de disparo de la Turbina de Vapor y como se establecen la relaciones de la función de seguridad aquí detectada con la referencia al punto H. 6.1., que también se proporciona para poder ver un ejemplo completo de una función SIF con su SIL asignado y el análisis de capa de protección realizado por el equipo. Se trata fundamentalmente de observar las diferencias notables de la extensión del análisis HAZOP cuando junto a este se realiza un análisis para la determinación SIL.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

GW	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDIAS	Categoría	Probabil	Consec.	SIL	Iniciador SIF	SIF	Notas SIL	RECOMENDACIONES	Acción	Fecha	OBSERVACIONES
Más	6.4. Alto Nivel	6.4.1. Fallo en el control de nivel (10MAG10CL001A / B / C) (10GHC32AA081)	6.4.1.1. Alto nivel en el pozo caliente del condensador que provoca la inundación de la Turbina. Pérdida de vacío en el condensador y potencial daño mecánico.	PAH en 10MAG10CP001 A / B / C 2. Enclavamiento o ESD en caso de PAHH en...	Peligroso(H)	Medio(M)	Extenso(E)	SIL-1 (P)	10MAG10CP001A / B / C (PAHH2oo3)	Disparo ST		H-6.1. Estudiar la implementación de una acción que en caso de disparo de la ST y del bypass (LP y HRH), detenga la alimentación de agua demil al condensador ...	Procesos	Incluir en la siguiente edición Control Narrative	
Más (cont.)	6.4. Más alto Nivel (cont.)	6.4.1. Fallo de control de nivel (10MAG10CL001A / B / C) (10GHC32AA081) (cont.) 6.4.2. Fallo en el control de nivel (10MAG10CL001A / B / C) apertura de control de emergencia (10GHC33AA081) 6.4.3. Obstrucción de filtros de condensado (10LCA11 / 12AT001)	6.4.1.1. Alto nivel en el pozo caliente del condensador que provoca la inundación de ST. Pérdida de vacío en el condensador y posible daño mecánico. (cont.) 6.4.2.1. Alto nivel en el pozo caliente del condensador que provoca la inundación de ST. Pérdida de vacío en el condensador y posible daño mecánico. 6.4.3.1. Alto nivel en el pozo caliente del condensador que provoca la inundación de ST. Pérdida de vacío en el	... 10MAG10CP001A / B / C dispara ST 3. Disparo ST (sistema de protección ST) activado por 10MAC10CP003 / 032/033 (PAHH) (IPL-1) 4. Disparo ST (sistema de protección ST) activado por 10MAC10CT003 1 A / B / C (TAHH) (IPL-1) 1. PAH en 10MAG10CP001 A / B / C 2. Enclavamiento o ESD en caso de PAHH en 10MAG10CP001 A / B / C dispara ST 3. Disparo ST (sistema de protección ST) activado por 10MAC10CP003 / 032/033 (PAHH) (IPL-1) 4. Disparo ST (sistema de protección ST) activado por 10MAC10CT003 1 A / B / C (TAHH) (IPL-1) 1. Control de nivel 10MAG10CL001 A / B / C 2. PAH en	Peligroso(P)	Medio(M)	Extenso(E)	SIL-1 (P)	10MAG10CP001A / B / C (PAHH 2oo3) (cont.) 10MAG10CP001A / B / C (PAHH 2oo3) 10MAG10CP001A / B / C (PAHH 2oo3)	Disparo ST (cont.) Disparo ST Disparo ST		... para protegerlo de daños por sobrellenado : consulte H-6.1 : consulte H-6.1		Siguiente edición de Control Narrative (cont.)	

Figura 4.7.- Ejemplo nodo del sistema de condensado de HAZOP/SIL.

Se registraron un total de cincuenta y siete (57) recomendaciones como resultado de este HAZOP (incluida una (1) recomendación general). En el Anexo 1 se incluye la lista de recomendaciones. No se incluyen las hojas de trabajo de las sesiones por su extensión. En caso de ser precisadas podrán ser proporcionadas aparte, como el resto de los estudios que se están analizando en esta tesis. Todos ellos estarán disponibles para consulta en caso de ser requerido o necesitarse para resolver alguna duda o cuestión particular.

Sin embargo, las recomendaciones si se han incluido en el anexo ya que por sí solas proporcionan información relevante. Además en el estudio, se integra la determinación de SIL, así como los SIF identificados y su nivel SIL asignado, la cual también se proporciona por su interés.

Número	Iniciador	Elementos finales	SIL máximo	Comentarios
1	00EKH11 / 12/13 / 14CP002A / B (PALL 2oo2)	Compresor 00EKH11 / 12/13 / 14AN001	SIL-2 (P)	
2	10MAN10CT001A / B / C (TAL 2oo3)	Cierre de 10MAN10AA083	SIL-1 (S)	
3	10MAN20CT001A / B / C (TAH 2oo3)	Cierre de 10MAN30AA084 y viaje de ST	SIL-1 (P)	
4	10MAN30CT001A / B / C (TAH 2oo3)	Disparo ST	SIL-2 (P)	S-3.4. SIL se asigna a SIF recomendado en la recomendación H-3.1 y si se implementa la recomendación H-3.2, SIL se puede reducir a SIL-1
5	10MAN40CT001A / B / C (TAH 2oo3)	Cierre de 10MAN20AA084 y disparo de ST	SIL-1 (P)	
6	Detección de llama en la caldera 00EKT11 / 12AH001	Disparo de la caldera 00EKT11 / 12AH001	SIL-2 (S)	S-15B.2. El sistema BMS está diseñado de acuerdo con EN746 (para proporcionar el mismo nivel de seguridad) El propietario debe aprobar esta desviación de IEC61511
7	LALLL en Calderín LP	Cerrando el bypass de HRSG	SIL-2 (P)	
8	Tl-2001A / B (TAHH 1oo2)	Disparo de ST-3001	SIL-1 (P)	S-48.1. Si se implementa el conmutador recomendado en H-48.1, no hay requisito de SIL para este SIF. De lo contrario, este SIF es G24 necesario para pasar al PLC de seguridad de acuerdo con la recomendación HAZOP H-48.1.

Tabla 4.16.- Funciones Instrumentadas de Seguridad y SIL asignado en el Caso de Estudio 2. Fuente: Archivo.

Del análisis pormenorizado de las recomendaciones del estudio HAZOP de este caso de estudio (ver Anexo I capítulo 6.4), se deduce que las recomendaciones en este caso son muy similares a las realizadas para el caso de estudio 1, cuando el HAZOP no incluye el estudio SIL, como por otra parte no podía ser de otro modo, ya que la técnica busca precisamente esto.

Sin embargo, al incorporar el estudio SIL y obtener los resultados de la tabla 4.16, las funciones de seguridad SIF y los niveles exigidos a cada una para resolver los riesgos identificados, contratista, tecnólogo y cliente entran en un campo que hasta hace poco tiempo no era tratado en el sector de la construcción de plantas de generación eléctrica. Cumplir con la norma IEC-61508 y 61511 no acaba con la mencionada tabla 4.16. Al contrario, los requisitos de la norma empiezan precisamente a partir de la identificación de las funciones SIF, del nivel SIL y de los requisitos exigibles por tanto al Sistema Instrumentado de Seguridad SIS. Aquí deben intervenir otros especialistas diferentes del proceso y de HSE. Deben intervenir los especialistas de Instrumentación y Control para satisfacer los requisitos de la norma, bien sea en cuanto a informes preceptivos, en especificaciones requeridas para el SIS, en cálculos para las funciones de seguridad SIF, etc. En este punto parece que queda mucho trabajo por recorrer. Se puede considerar que el sector está iniciando el camino de adaptación a sus propias particularidades. Se puede asegurar que sectorialmente no se dispone de la metodología y prácticas de ingeniería incorporadas en las organizaciones que permitan asegurar que los estudios y aquello que se requiere a partir de los resultados de dichos estudios, se acomete con la precisión normativa, diligencia y solvencia necesarias, lo que si ocurre en otros sectores como el petroquímico o de Oíl & Gas, donde el conocimiento de estas técnicas y su aplicación está lo suficientemente maduro. Las partes interesadas consideraban hasta hace poco tiempo que con el suministro de un sistema de control específico para cumplir las funciones de seguridad era esencialmente suficiente. Es decir si era necesario suministrar un sistema de seguridades de caldera para el combustible (Burner Management System, BMS) con una certificación, por ejemplo SIL2, y con proporcionar la documentación acreditativa del sistema sería suficiente. Cuán lejos de la realidad para el cumplimiento de la normativa IEC relacionada antes. Se requieren desde cálculos de los “lazos de seguridad”, hasta informes de cumplimiento y de instalación correspondientes, lo que es bien conocido por los especialistas en seguridad funcional de los departamentos implicados.

Conclusión: A pesar de que con la implementación de los estudios SIL mediante análisis de la capa de protección LOPA se obtienen métodos que permiten evaluar de manera más certera el diseño inherentemente más seguro, esto no significa que no quede mucho que hacer. Es necesario mejorar los métodos de trabajo y prácticas de ingeniería para incorporar los resultados de los estudios SIL en la documentación de ingeniería. Establecer divisiones de alcance entre los contratistas, tecnólogos y cliente que permitan acometer los trabajos de cada parte con la solvencia necesaria y estandarizar los métodos de trabajo y documentación editable para homologar la calidad del trabajo en el sector eléctrico igual que en otros sectores más maduros en estas metodologías de trabajo.

Estudio Caso 6 HAZOP Eléctrico

En el Anexo 1 se ha incluido el informe resumido de un estudio HAZOP eléctrico realizado sobre una planta de ciclo combinado en Holanda, hace ya unos años. Las sesiones E-HAZOP se

enfocaron en identificar todas las situaciones potencialmente peligrosas en la planta, y todas fueron registradas. La revisión se llevó a cabo durante 2 días en las oficinas del contratista principal. A la reunión asistieron el Jefe de Proyecto del cliente junto con el responsable eléctrico y los especialistas del contratista principal, así como la ingeniería subcontratada por este para la realización de la ingeniería de detalle. También asistieron los especialistas del tecnólogo que suministró el generador y los sistemas de protección de la planta, protecciones de transformadores y maquinas eléctricas principales.

El estudio Eléctrico HAZOP fue realizado para 5 sistemas eléctricos y se registraron treinta y dos (32) recomendaciones.

El detalle de los sistemas revisados, la documentación empleada, así como el procedimiento se incluyen en el Anexo.

Hay que destacar en este punto que se obtuvieron recomendaciones para el cliente en cuanto a la interconexión de los equipos en la red de Holanda, para el tecnólogo y recomendaciones de aplicación en la fase de ingeniería de detalle.

A continuación se proporciona un ejemplo de hoja de trabajo que resulta significativo a efectos comparativos con el HAZOP de proceso explicado en los otros casos de estudio.

Causes	Consequences	Risk Type	S	Safeguards	L	RR	Recommendation	By	Notes
1. Low SF ₆ pressure in 52G	1. Loss of the capacity for breaking 52G when required. In case of shortcircuit, mechanical damage and electrical risk to personnel.	ECO /SAF	3	1. Low pressure of SF ₆ with alarm allows to open 52G breaker at rated condition	B	18	2. Include in the OMM for this scenario (low pressure of SF ₆) the instructions for reduction of the power and opening 52G by operator or continue operate	T	
				2. Low low pressure of SF ₆ with alarm (52G is not allowed to open by blockage relay)			3. Include in the OMM for this scenario (low low pressure of SF ₆) the instructions for reduction of the power, opening 52L and proceed with normal shutdown by operator		
				3. In case of electrical fault and failure of 52G (low low pressure of SF ₆ , 52G is not allowed to open by blockage relay): 50/62BF in C60 initiate automatically opening 52L and 52A, tripping excitation and turbine			4. Ensure in case of electrical fault and failure of 52G (low low pressure of SF ₆ , 52G is not allowed to open by blockage relay): 50/62BF in C60 initiate automatically opening 52L and 52A, tripping excitation and turbine, no damages are foreseen		
2. Earth switch 57GG connecting generator side to ground	1. Three phase shortcircuit, mechanical damage and electrical risk to personnel.	ECO /SAF	4	1. Mechanical interlock to prevent closing 57GL with 52G line disconnect 89G	B	24	5. Ensure in 52G low low pressure of SF ₆ and electrical failure occurs 50/62BF is generated		
				2. Mechanical and electrical interlock with 52G					

Tabla 4.17.- Ejemplo Hoja de Trabajo HAZOP Eléctrico. Fuente: Archivo.

4.4.2.2 Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC)

Los Estudios de Alcance de Consecuencias se utilizan para cuantificar el impacto de los peligros identificados en los análisis previos realizados. Estos estudios modelan las consecuencias de las emisiones de materiales peligrosos en términos de dispersión de vapor, radiación térmica, sobrepresión de la explosión y toxicidad. Si las consecuencias son inaceptables para el cliente o para el proyecto, se puede requerir un análisis de riesgo cuantitativo QRA. Esto en el caso de los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica no es habitual. Se realizan o uno u otro estudio, no suele ser necesaria la realización primero del estudio EAC y luego del QRA. En términos prácticos, en los proyectos de construcción de centrales térmicas, estos estudios se limitan a los específicos de riesgo de Fuego y Explosión de la Central, los cuales se encuentran bastante estandarizados, siendo lo más habitual el uso de herramientas de software para la evaluación de consecuencias, por lo que si se decide realizar el EAC no se realizará normalmente

el QRA y si por alguna razón reglamentaria se requiere específicamente preparar el QRA, en este se incluirá todo.

Para la realización de estos estudios se parte de un análisis preliminar de peligros, normalmente del HAZID detallado realizado en la etapa de ingeniería básica. Entre los riesgos habituales que se consideran en los escenarios del estudio se encuentran derrames, fugas, incendios o explosiones. Para definir adecuadamente los escenarios de trabajo sobre los que trabajar en el análisis de consecuencias, se requiere además identificar los eventos o sucesos no deseados sobre los que se realizará la evaluación y además identificar aquellos eventos iniciadores del escenario de accidente. Es habitual que para ello se utilicen las técnicas de análisis del árbol de eventos ETA y de análisis de árbol de fallos FTA, como se explicará en el apartado siguiente donde se tratarán los QRA con algo más de detalle.

Para el análisis de alcance de consecuencias en centrales, se utilizan modelos de consecuencias para calcular el tipo y extensión de los daños a la salud (efectos letales), equipos y estructuras resultantes de cada posible accidente final producido por los eventos iniciales. En el caso de edificios y salas, como la sala de control o salas electrónicas, es habitual recurrir a métodos de evaluación cualitativos.

Las herramientas de cálculo de la extensión o alcance de las consecuencias de un escenario son de diversos tipos. Hay desarrollos de agencias estatales, como puede ser ALOHA desarrollado por EPA, por operadores como SHELL con FRED o CIRRUS de BP, aunque lo más habitual es utilizar software comercial como el desarrollado por la consultora DNV, PHAST, SCRI u otros disponibles en el mercado. para calcular los efectos físicos derivados de los accidentes. En [178] se proporciona una visión general de software comercial que aunque es de hace unos años, da una idea del volumen de firmas comerciales existentes en el mercado. En general el software empleado incluye los siguientes modelos que se utilizan en la estimación de consecuencias pudiendo simular escenarios de afectación bajo diferentes condiciones de fugas, derrames o emisiones continuas, incluso en diversos escenarios meteorológicos pudiendo también efectuar estudios de impacto ambiental, diseño de plantas e instalaciones industriales:

- Emisiones Continuas Puntuales (Chimeneas) y de Áreas.
- Derrames con evaporación a nivel del suelo (Continuos y finitos)
- Emisión instantánea de una fuente de área (Instantáneos)
- Derrame de líquidos (Continuos, finitos e instantáneos)
- Nubes Explosivas
- Modelo de fuego por llamarada (“Flash Fire”) de emisiones por evaporación de un derrame, de emisiones de chorro horizontal, de chorro vertical y de emisiones instantáneas o de corta duración.
- Modelo de radiación térmica por bola de fuego por explosión de vapor en expansión de líquido en ebullición (“BLEVE”).
- Modelo de radiación térmica por fuego en derrames (“Pool Fire”)
- Modelo de radiación térmica por chorro de fuego (“Jet Fire”)

- Modelo de equivalencia de TNT para simular cálculos de sobrepresión de explosiones de nubes de vapor (gas natural, hidracina, etc.)

Los modelos se basan en metodologías publicadas en organismos internacionales y contener bases de datos con miles de productos con cálculos de propiedades que dependen de la temperatura, incluyendo datos de materiales inflamables y combustibles de las sustancias más comunes como gasolina, diésel, petróleo crudo, etc.

En los estudios EAC los especialistas deben proporcionar los datos de entrada al software para el modelo adecuado del escenario del accidente seleccionado. Para ello es habitual realizar algunas hipótesis de trabajo:

- En relación con las fugas es normal asumir que la localización de la fuga o escape será única en el equipo o tubería. También es habitual considerar que en el caso de fugas de tanques, se considere el tanque completamente lleno de líquido, o que la dirección de la fuga será en dirección al viento dominante, asumiendo el peor escenario del accidente.
- El tiempo de respuesta también es un dato muy importante a fijar para el modelado del accidente y la estimación adecuada del alcance de consecuencias. En los proyectos de centrales es común el uso como referencia de los datos proporcionados en [179] y en [180], donde se establecen tiempos de respuesta muy diferentes en función de cómo se realice la acción de bloqueo o detención de la fuga o escape. Así se tendrán valores como los indicados en la Tabla 4.18 donde se distingue si el bloqueo es mediante una acción automática o manual, y, en este último caso si es una operación realizada en modo remoto o en modo local.

Sistema de bloqueo	Release duration
Automático	2 min
Controlado remotamente	10 min
Operado manualmente	30 min

Tabla 4.18.- Duración del escape a efectos de estimación de consecuencias. Fuente: Archivo.

- Los caudales de fuga también deben establecerse ya que los caudales máximos de diseño de una bomba o un compresor de gas no siempre son coincidentes con el valor de fuga, dependiendo de la rotura.
- Se deben establecer criterios para la evaporación de fugas de líquidos

Una vez que se conoce el caudal de liberación o evaporación del gas, y considerando la meteorología, el modelo de dispersión estima la distancia a la que ocurrirá una concentración particular de la sustancia liberada. Aquí también deben realizarse determinadas hipótesis de trabajo para que el software proporcione resultados creíbles. Por ejemplo se debe fijar un tiempo medio de dispersión o la longitud al área circundante (suele ser 1m del vallado exterior de la central).

Los resultados del modelo de dispersión se utilizan como datos de entrada para otros modelos, como pueden ser:

- La distancia a la que se alcanza el límite inferior de inflamabilidad (LFL), que se utilizará en el modelado de consecuencias de incendios repentinos.
- La cantidad de sustancia inflamable presente en la nube dentro de los límites de inflamabilidad y la ubicación del centro de la nube, que se utilizará en el modelado de consecuencias de las explosiones de nubes de vapor (VCE).

En relación con la radiación, los efectos producidos por los incendios se estudian utilizando los modelos correspondientes incluidos en el software que se utilice, PHAST o SCRI ya citados como ejemplo. A menos que un edificio esté directamente involucrado en un incendio, el riesgo de incendio para la estructura no suele ser considerado a menos que dicha estructura se vea directamente afectada por la llama. Para fuegos consecuencia de derrames, chorros y bolas de fuego, se calculan distancias conservadoras utilizando niveles de radiación obtenidos de la bibliografía especializada y que se encuentra cargada en el software que se utiliza para el modelado.

Respecto del modelado de ondas de presión, los modelos para su cálculo predicen dónde podrá producirse la sobrepresión, considerando las propiedades de la sustancia involucrada, su cantidad y aquellos parámetros meteorológicos relevantes de la zona donde se estudia el escenario.

La VCE es una deflagración al aire libre (no confinada), que resulta de la ignición de una nube inflamable que se forma después de la liberación de una gran cantidad de producto inflamable (gas o líquido vaporizado). Sin embargo, es necesario que concurren otras condiciones para que se produzca una nube VCE con una onda de presión dañina, entre las que se encuentran que el producto que es liberado a la atmósfera sea inflamable y que se encuentre en condiciones adecuadas de presión o temperatura. Para que se produzca una VCE, la nube debe formarse antes de la ignición, es decir, debe haber una fase previa de dispersión entre la liberación y la ignición. En el apartado siguiente se proporciona un ejemplo de evaluación de alcance de consecuencias para un ciclo combinado (Figura 4.11).

4.4.2.3 Evaluación Cuantitativa de Riesgos QRA

Los análisis cuantitativos de riesgos proporcionan una predicción matemática del riesgo de accidente y proporcionan medios para minimizarlo. En los estudios y evaluaciones QRA se obtienen las probabilidades de ocurrencia de accidentes, normalmente de alto impacto que pueden derivar en la pérdida de vidas y daños a los equipos y al medio ambiente. Con los valores obtenidos se proporcionan al mismo tiempo medidas de mitigación con objeto de reducir el riesgo a niveles y valores aceptables.

Los estudios QRA proporcionan los peligros, frecuencias de ocurrencia y consecuencias de los escenarios de trabajo que resultan creíbles en términos de derrames, fuego, explosión, nubes tóxicas y otros accidentes que pueden resultar graves, no solo para la propia planta, sino también para su entorno. En la mayor parte de los casos, los escenarios de trabajo de los estudios EAC son coincidentes con los escenarios de estudios que en su acepción general se designan como QRA,

por lo que en los proyectos de construcción de centrales térmicas, si se realiza el estudio QRA es poco habitual llevar a cabo un estudio EAC, y viceversa, aunque existen casos en los que se realizan ambos. Téngase en cuenta que las técnicas, valores de referencia, lecciones aprendidas de accidentes históricos, así como el software comercial utilizado en ambos estudios, son a menudo coincidentes, por lo que es poco habitual encontrar proyectos en los que se realicen separadamente ambos estudios.

Existen dos metodologías para la realización de un QRA, metodologías basadas en escenarios específicos o QRA basadas en escenarios genéricos (secciones aislables). La primera utiliza escenarios específicos identificados en los estudios previos como HAZID o HAZOP, mientras que en el segundo tipo se divide la planta en secciones aisladas y se parte de frecuencias de fugas históricas. Este segundo caso es una metodología mucho más estructurada que persigue la replicabilidad de los estudios, aunque la metodología que se puede considerar tradicional es la primera. Ambas tienen ventajas e inconvenientes, si bien cuando se pretende evaluar el cumplimiento de la instalación fuera de la planta, con objeto de evaluar su cumplimiento normativo tipo Seveso, se usan los basados en escenarios genéricos que proporcionan una curva final de riesgos que comprende todos los escenarios y fenómenos. El QRA basado en escenarios específicos proporciona información más detallada en relación con el nivel SIL, las probabilidades de fallo de un lazo determinado y proporciona alternativas de diseño frente a un escenario concreto permitiendo evaluar de forma directa y cuantitativa, el impacto de las barreras o salvaguardas, para la reducción del riesgo. Es habitual que en función del proyecto las metodologías puedan ser mezcladas y se implementen ambas según los intereses específicos a evaluar.

Ya se explicó en el capítulo 2.3.4.4 la metodología usual de estos estudios y en la Figura 2.15 se proporcionó el proceso de trabajo básico para la realización de la evaluación cuantitativa de riesgos que, aunque obtenida de CCPS [92], es el proceso habitual usado en un QRA.

Las etapas principales de un QRA son:

- **Identificación de peligros.** Es la base de la elaboración de los escenarios de accidentes sobre los que realizar la evaluación. Como ya se ha visto, la identificación de peligros determina todos los posibles escenarios de incendios y explosiones importantes que pueden ocurrir en el proyecto y provocar daños a las personas (trabajadores), la propiedad (edificios y equipos) y en el caso de los proyectos energéticos dar continuidad del suministro de energía a los consumidores como uno de los objetivos prioritarios. Entre los peligros habituales que se consideran en los escenarios del estudio se encuentran derrames o fugas, incendios o explosiones. Los escenarios que se utilizan normalmente en este estudio proceden de los peligros que se identificaron en el estudio HAZID de la etapa de ingeniería básica, es decir preferentemente se utilizarán los resultados del estudio HAZID detallado. No en todos los proyectos se realiza un estudio HAZID, por lo que para esos casos, es habitual utilizar otras fuentes de escenarios, como pueden ser los cálculos realizados para el dimensionamiento de los sistemas contraincendios o los escenarios que se consideraron en el Estudio de Impacto Ambiental, incluso las consideraciones que se realizan en el HAZOP de la planta, el cual si se encuentra entre los estudios que en los últimos años se realizan de manera estándar en todos los proyectos. Entre los peligros habituales considerados para el QRA, se encuentran:

- Liberación e ignición de productos inflamables y combustibles. Limitado normalmente en las plantas térmicas a gas natural, H₂ (ya sea en botellas, planta de generación de H₂ o en el suministro al generador), Fueloil y Gasoil como combustibles alternativos.
 - Chorros de Fuego. Habitualmente relacionados con las áreas de descarga y suministro de combustibles líquidos (FO y GO) así como de los sistemas de lubricación por aceite de las Turbinas (de Gas o Vapor).
 - Incendios en arquetas o piscinas de recogida de derrames o fugas mayores de combustibles líquidos, aceite de lubricación e incluso arquetas de recogida de condensados de gas.
 - Incendios en transformadores o en arquetas de recogida de aceite de refrigeración.
 - Formación de atmosferas explosivas en parques de manejo de combustibles sólidos, zonas de transferencia como cintas transportadoras o en sistemas de pulverizadores de carbón, etc.
 - Silos de almacenamiento. Riesgos de incendio y explosión tanto en los propios silos de almacenamiento como en las maniobras de carga y descarga.
 - Calderas. Riesgos de explosión e implosión debidos a la operación o a la acumulación de vapores de combustibles en las áreas de ignición. También deben ser considerados los equipamientos auxiliares de dichas calderas, como son Precipitadores Electrostáticos, conductos de gases de escape, Calentadores Regenerativos, Filtros de Mangas, sistemas de Desulfuración de Gases, etc.
 - Atmósfera explosiva de gas natural en el interior de equipos como turbinas de gas y calderas, así como en el sistema de enfriamiento de hidrógeno de los generadores de GT (durante las operaciones de purga / carga), o en áreas de químicos de la planta de tratamiento o sistemas de dosificación al ciclo, como puede ser el tanque de hipoclorito de sodio o la sala de baterías en las principales salas eléctricas.
 - Incendios en edificios y salas específicas (salas eléctricas, salas de baterías).
 - Otros que puedan ser considerados relevantes por las especificidades de la instalación estudiada
- Estimación de la frecuencia. La frecuencia se estima de manera cuantitativa utilizando los datos estadísticos de frecuencia de fallos obtenidos de bibliografía especializada, así como mediante el uso de las herramientas del árbol de fallos (FTA) y el análisis de árbol de eventos (ETA). Como se vio en el capítulo 2, una estimación cuantitativa o semicuantitativa depende de la asignación numérica. El método de análisis es el mismo en ambos casos.

En el caso particular de explosiones en turbinas de gas y calderas, no existe información detallada para calcular la probabilidad de formación de una atmósfera explosiva utilizando un árbol de fallas. Es habitual asignar categorías de probabilidad considerando las medidas de seguridad típicas para estos equipos los cuales proceden de datos proporcionados por los fabricantes y OEM.
- Estimación de consecuencias. Para escenarios de incendio y explosión asociados a productos inflamables y combustibles, se utilizan también métodos cuantitativos. En este caso se definen umbrales de daño para incendios y umbrales de sobrepresión para explosiones.

Para calcular las distancias a las que se alcanzan los umbrales de daño anteriores para cada escenario de riesgo identificado, se utiliza software comercial como el mencionado antes. Las distancias se representan gráficamente y se analiza el daño potencial a las personas y bienes (edificios y equipos) para asignar una categoría resultado de la consecuencia.

Para incendios en edificios y salas específicas, como pueden ser salas de control o salas eléctricas o electrónicas, se utiliza normalmente métodos cualitativos. La asignación de la categoría de consecuencia se suele realizar teniendo en cuenta si el equipo forma parte de un sistema crítico y de la probabilidad de que haya personal presente.

- Evaluación de riesgo. Las categorías de probabilidad y consecuencia se combinan utilizando una matriz de riesgo para obtener el nivel de riesgo asociado a cada escenario de incendio y explosión. La matriz de riesgo empleada suele ser la que se viene empleando en el proyecto o aquella que fije la autoridad competente en cada caso. Esta matriz de riesgo proporciona información que permite evaluar si las instalaciones del proyecto son un lugar seguro con un nivel de riesgo aceptable. Los niveles de riesgo resultantes deben compararse con los criterios de aceptación, que se hayan definido.

En este punto del diseño, si todo se ha realizado de la manera esperada, lo normal es que los estudios QRA corroboren que los niveles de riesgo de incendio y explosión se encuentran en niveles aceptables para todos los escenarios que se evalúan. No es muy habitual que en el momento de desarrollo en el que se realizan estos estudios se encuentren escenarios con niveles de riesgo más allá de ALARP, ya que la implementación de las medidas de mitigación puede resultar muy costosa, no solo en términos de coste de los equipos, si no de plazo por su suministro así como de su instalación en obra.

Profundizando algo más en el proceso de identificación de peligros para realizar el QRA, una vez que se han identificado todos los posibles puntos de fallo, el proceso continua con la selección de aquellos que se consideran más representativos. El objetivo de esta selección es limitar el número total de escenarios a estudiar a un tamaño razonable, sin perder resolución del estudio ni escenarios posibles de accidentes. Algunos puntos de fallo se seleccionan como representativos, considerando aquellos que conducen a las peores consecuencias. Las consecuencias dependen principalmente de los siguientes parámetros:

- Características de las sustancias en cuanto a su peligrosidad, el estado físico en el que se encuentran, así como sus propiedades fisicoquímicas. Estas características definen el tipo de accidente final que es esperable después de la liberación (por ejemplo incendio por chorro, incendio por derrames o fugas o incendio repentino).
- La cantidad de sustancia liberada, que depende del diámetro de la línea o de las dimensiones del equipo, las condiciones de operación (presión, temperatura, caudal) y el sistema de detección y control existente para detener la liberación.

En base a estos parámetros, los puntos de fallo se agrupan en grupos con características peligrosas similares y cantidades liberadas similares y, por lo tanto, con consecuencias potenciales similares.

Después, las consecuencias para los escenarios seleccionados se evalúan y agrupan en cada punto de fallo.

Como se ha indicado antes, los eventos iniciadores que se utilizan normalmente en la evaluación del riesgo de incendio y explosión son sucesos de pérdida de contención en los equipos, los cuales pueden provocar un accidente de incendio o una explosión de gran alcance. Para tener una amplia gama de eventos iniciales, se consideran en los proyectos térmicos, dos tipos de suceso inicial:

- Rotura total y catastrófica del almacenamiento completo, sin posibilidad de detenerlo. Este es el escenario representativo de fugas masivas y de modelos de “peor escenario”.
- Fuga o rotura parcial con posibilidad de detener el escape, el cual es representativo de fugas menores y escenarios de casos más creíbles.

Se consideran eventos iniciales para los diferentes equipos, habitualmente escenarios de la bibliografía [179], [180] como pueden ser los siguientes:

- Tuberías:
 - Rotura total.
 - Fuga con un diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, con un máximo de 50 mm.
- Tanques de almacenamiento o recipientes de proceso de pared simple:
 - Rotura catastrófica. Liberación instantánea del contenido completo.
 - Liberación continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm.
- Tanques de almacenamiento o recipientes de proceso de doble pared:
 - Rotura catastrófica. Liberación instantánea del almacenamiento completo.
 - Zonas de carga / descarga de camiones:
- Intercambiadores de calor, para intercambiadores de calor de carcasa y tubos con la sustancia peligrosa fuera de las tuberías e intercambiadores de calor de placas con la sustancia peligrosa entre las placas:
 - Rotura catastrófica. Liberación instantánea del inventario completo.
 - Liberación continua de un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm.
- Bombas o compresores:
 - Rotura total de la tubería de conexión más grande.
 - Fuga con un diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería de conexión más grande, con un máximo de 50 mm.
- Tanques de gas:
 - Rotura catastrófica. Liberación instantánea del contenido completo.

Para algunos equipos, solo se considera la rotura catastrófica porque las fugas o bien no se consideran creíbles (por ejemplo el caso de tanques de doble pared) o las consecuencias de la fuga son insignificantes.

Los fallos en recipientes de proceso como calderines de calderas se asimilan a fallos en la tubería de conexión y los modos de fallo para equipos con un contenido insignificante como bombas están representados por el fallo en las tuberías de entrada o salida.

Además, se identifican eventos iniciales específicos que pueden causar un accidente mayor en base a la experiencia previa de otros análisis de riesgo en instalaciones similares.

Este es un asunto que no ha sido tratado hasta aquí, pero que en estos estudios los especialistas que los realizan para Centrales Térmicas los tienen en muy alta consideración. Utilizan las bases de datos de accidentes, algunas mencionadas en el capítulo 2. Así, por ejemplo, es muy usual acudir a MARS o MHIDAS. Algunos ejemplos de accidentes que son usados como origen de datos en los proyectos de generación de energía eléctrica, se encuentran relacionados en el Anexo 1, los cuales han sido obtenidos de la experiencia de empresas especializadas en estudios EAC y QRA.

La identificación de accidentes finales es habitual realizarla mediante la aplicación de la técnica ETA de árboles de eventos. Esto es así porque los eventos iniciales pueden conducir a los eventos accidentales finales con consecuencias muy diferentes dependiendo de muy diversos factores, como son las características de las sustancias liberadas, su inflamabilidad o toxicidad, si existe ignición o no, si esta ignición es inmediata o retardada, si hay suficiente turbulencia en la nube para que ocurra una explosión en lugar de un incendio repentino, entre otras.

Se considera la aplicación de árboles de eventos genéricos de la bibliografía [179] o [180], como pueden ser los incluidos en la Figura 4.8.

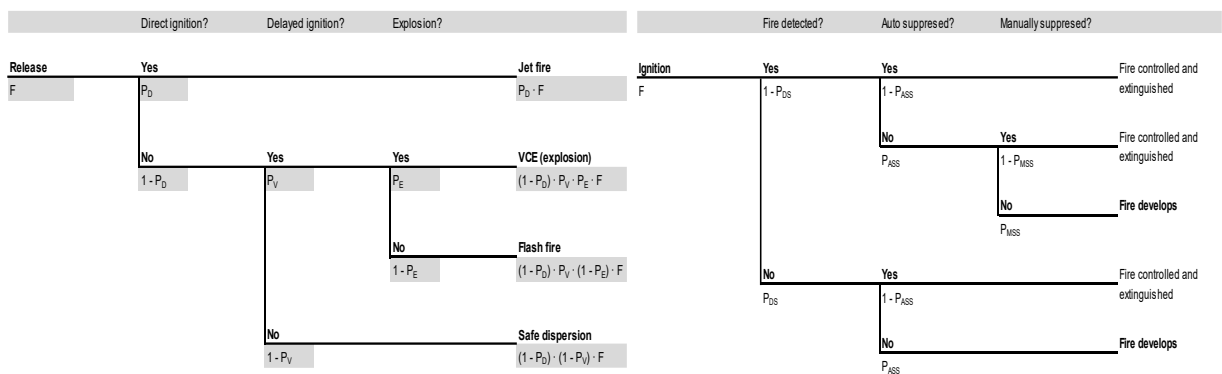


Figura 4.8.- Árboles de eventos para fuga de líquido o gas (izq.) o para escenario mayor de fuego (dcha.). Fuente: Archivo.

Como se muestra en los árboles de eventos anteriores, la probabilidad de los accidentes finales es una combinación de la probabilidad del evento inicial (F) y la probabilidad de ignición directa (PD), la probabilidad de ignición retardada (PV) y la probabilidad de explosión (PE)

Continuando con el proceso QRA, una vez que se han identificado los peligros y los escenarios a evaluar, se procede con la estimación de las frecuencias.

En los proyectos de construcción de centrales térmicas, es habitual proceder en dos etapas para la estimación de las frecuencias:

- Estimación de la frecuencia de los eventos iniciadores, utilizando datos de frecuencia de fallos de bibliografía especializada y análisis de árbol de fallas.
- Estimación de la frecuencia de los accidentes finales, mediante análisis de árbol de eventos

Así, en el primer caso se aplican los datos de referencias bibliográficas ya mencionadas [179], [180] y se tienen tablas como las incluidas en la Tabla 4.19.

Equipo		Frecuencia (y ⁻¹)	
		Catastrófica o ruptura paso total	Fuga
Tubería aérea:	diámetro < 75 mm	1·10 ⁻⁶ · L (m)	5·10 ⁻⁶ · L (m)
	75 mm ≤ diámetro ≤ 150 mm	3·10 ⁻⁷ · L (m)	2·10 ⁻⁶ · L (m)
	diámetro > 150 mm	1·10 ⁻⁷ · L (m)	5·10 ⁻⁷ · L (m)
Tubería enterrada		7·10 ⁻⁹ · L (m)	6,3·10 ⁻⁸ · L (m)
Tanque Atmosférico:	pared simple	5·10 ⁻⁶	10 ⁻⁴
	Doble pared	1,25·10 ⁻⁸	-
Recipiente a Presión		5·10 ⁻⁷	10 ⁻⁵
Reactor proceso / reactor tipo vasija		5·10 ⁻⁶	10 ⁻⁴
Carga / Descarga:	Manguera	4·10 ⁻⁶ h ⁻¹	-
	Brazo	3·10 ⁻⁸ h ⁻¹	-
Cambiador de Calor Tuberías con sustancias peligrosas exteriores		5·10 ⁻⁵	10 ⁻³
Bomba / Compresor		5·10 ⁻⁵	2,5·10 ⁻⁴
Cilindro Gas		10 ⁻⁶ 9·10 ⁻⁷ (explosión)	-
Edificio / Sala	Frecuencia Fuego (y ⁻¹)	Comentarios	
Edificios (Áreas general)	5·10 ⁻⁶ · A (m ²)	Basado en frecuencias de ignición de diferentes edificios en Finlandia [181], China y Japón [182].	
Sala baterías	2·10 ⁻⁴	Basado en frecuencias de ignición en Plantas nucleares[183]	
Sala de Control Sala Electrónica	5·10 ⁻³	Basado en frecuencias de ignición en Plantas nucleares[183] Salas electrónicas asimiladas a Salas de Control.	
Bomba / Compresor	10 ⁻³	Basado en frecuencias de fuego de bombas [59]	
Transformador	10 ⁻³	Based on ignition frequencies of high voltage transformers [184] [185]	

Tabla 4.19.- Frecuencias de eventos iniciales, de eventos genéricos y de fuegos. Fuente: Archivo. Después de estimar la frecuencia de los eventos iniciadores, es necesario predecir cómo podrían evolucionar estos eventos para determinar las diferentes frecuencias de cada posible accidente final. Para ello se utiliza la técnica de análisis ETA mencionada antes, pero asignando datos al análisis del árbol de eventos. Los dos casos incluidos en la Figura 4.8, se han particularizado (ver Figura 4.9), para un caso de ejemplo para un ciclo combinado reciente, el cual se usará como Caso de estudio para ilustrar la descripción de la aplicación de QRA al sector de la construcción de centrales eléctricas.

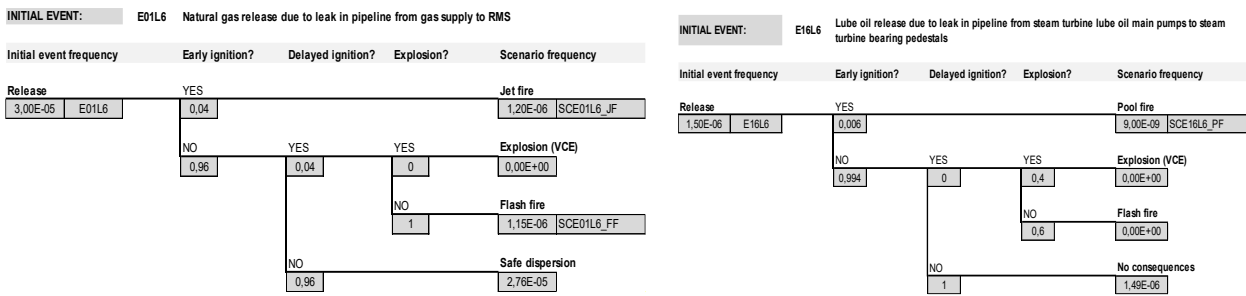


Figura 4.9.- Ejemplos estimación frecuencias accidentes según sucesos iniciadores. Fuente: Archivo.

La siguiente tabla muestra los valores de probabilidad para ignición directa (PD) e ignición retardada (PV)

Categoría de la sustancia (*)	Fuente continua	Probabilidad de ignición directa PD	Probabilidad de ignición retardada PV
Grupo 0, Media/alta reactividad	< 10 kg/s	0,2	0,06
	10-100 kg/s	0,5	0,2
	> 100 kg/s	0,7	0,7
Grupo 0, baja reactividad	< 10 kg/s	0,02	0,02
	10-100 kg/s	0,04	0,04
	> 100 kg/s	0,09	0,1
Grupo 1	Todos los caudales	0,065	0,07
Grupo 2	Todos los caudales	0,02	0
Grupo 3	Todos los caudales	0,006	0

(*) Classification of flammable substances:
 Group 0: Products which are in a gaseous state. The product is above the atmospheric boiling point or the atmospheric boiling point is lower or equal to -25 °C.
 Group 1: Products which are at or above their flash point, but below the atmospheric boiling point.
 Group 2: Products which are at a temperature lower than 35 °C below the flash point.
 Group 3: Products which are at a temperature which is 35 °C or more below the flash point.

Tabla 4.20.- Probabilidad de ignición usado en Arboles de Eventos [186]

Los datos que aparecen en la Figura 4.8 proceden de la Tabla 4.20. Por ejemplo, la asignación de valores de PD=0,04 para el caso de ignición de gas en el escenario de fuga de gas a la RMS y de PD=0,06 en el caso de fuga de aceite considerando los caudales de fuga de cada uno y el grupo de clasificación.

En las estimaciones de probabilidad de explosión para proyectos de centrales térmicas, en general, se considera que una vez que se produce la ignición, la llamarada se puede desarrollar con una frecuencia de 0,6; siendo la fracción que se modela como explosión igual a 0,4 (PE) de acuerdo con la bibliografía anterior [179] o [180], lo que también se puede ver en el ejemplo de los dos escenarios de la Figura 4.8.

Para incendios en edificios, salas específicas (por ejemplo, sala de control, sala eléctrica, sala de baterías) y transformadores, se consideran diferentes árboles de eventos para la estimación de frecuencias, tal como se indicó antes. También se proporcionan datos específicos para estos edificios y salas, obtenido de [187], como se muestra en la Figura 4.10.

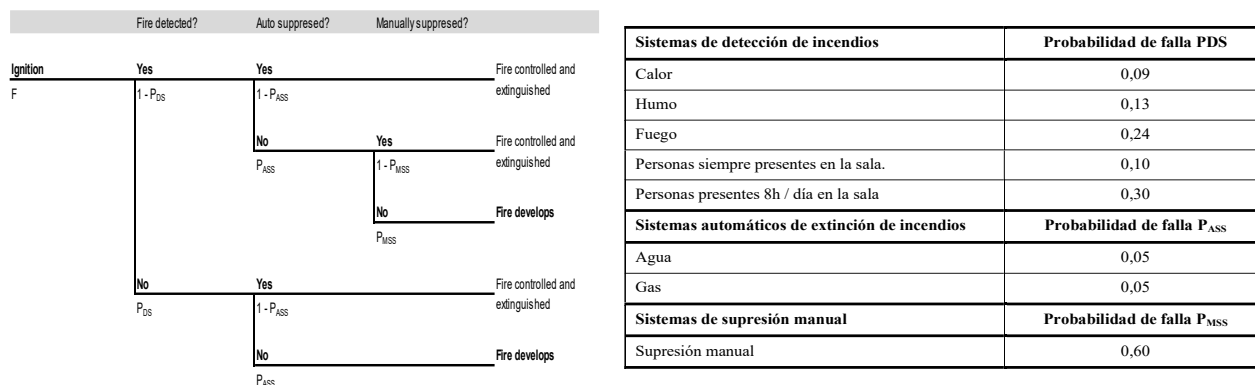


Figura 4.10.- Estimación frecuencias y árboles eventos edificios y salas [187].

Para completar todos los datos del escenario que se ha considerado en las Figuras 4.9 y 4.10, solo queda identificar en el árbol de eventos los valores de las frecuencias de los eventos iniciadores.

Las unidades básicas de frecuencia se dan en veces por año. Hay eventos iniciales que solo ocurren cuando se realiza la operación. En estos casos se toma en cuenta un factor de uso, estimando la fracción de tiempo durante el año en que ocurren esas operaciones. Cuando hay varias unidades de algún equipo, las horas de trabajo se dividen entre las diferentes unidades. A continuación se muestran (Tabla 4.21), algunos ejemplos de cálculo para la estimación de la frecuencia de eventos iniciadores, se puede ver, como ejemplo el cálculo del evento inicial de fuga de gas en la tubería de alimentación a la ERM, mencionada antes.

Evento inicial		Frecuencia básica	Factor de uso	Unidades	Frecuencia de evento inicial (y-1)
E01L3	Liberación de gas natural debido a la rotura total de la tubería del suministro de gas a la ERM	1,00E-07	1	60	6,00E-06
E01L6	Liberación de gas natural debido a una fuga en la tubería desde el suministro de gas a la ERM	5,00E-07	1	60	3,00E-05
E01.02V1	Liberación de gas natural debido a la rotura catastrófica de los filtros de la ERM	5,00E-06	0,5 ¹	2	5,00E-06
E01.02V2	Liberación de gas natural por fuga en filtros de ERM	1,00E-04	0,5	2	1,00E-04
E01.04E1	Liberación de gas natural debido al colapso de calentadores ERM	5,00E-05	0,5	2	5,00E-05

Tabla 4.21.- Ejemplo resultado frecuencias estimadas de eventos iniciales. Fuente: Archivo.

La frecuencia de eventos iniciales específicos, como explosiones en equipos, se estima mediante un análisis de árbol de fallas (FTA) específico. La frecuencia de los eventos básicos considerados en los árboles de fallas se muestra en la Tabla 4.22, la cual es habitual su uso en centrales térmicas y procede de la bibliografía mencionada.

Suceso	Frecuencia / Probabilidad	Fuente
Fallo de un ventilador	$9,09 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$	[188]
Fallo de un detector de gases	$3,5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$	[59]
Fallo de un interruptor de caudal	$4 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$	[188]

Disparo eléctrico de un ventilador (Interruptor de velocidad)	$4,7 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$	[188]
Error humano: El operador no lo detecta	$1 \cdot 10^{-2}$	[189]
El Operador no actúa	$1 \cdot 10^{-3}$	

Tabla 4.22.- Frecuencias de sucesos básicos usados en árboles de fallos aplicados a centrales térmicas. Fuente: Archivo.

Así, por ejemplo para la sala de baterías de la central de ciclo combinado anterior, el árbol de eventos que se puede considerar es el indicado en la Figura 4.11.

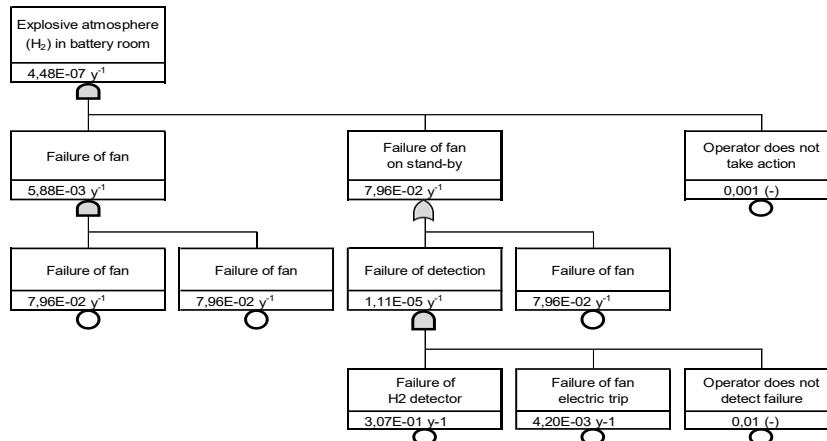


Figura 4.11.- Árbol de eventos para la atmósfera explosiva de una sala de baterías de un ciclo combinado. Fuente: Archivo.

De este modo se obtienen para todos los escenarios los resultados de frecuencias de fuego y explosión para el proyecto en estudio. Siguiendo con el ejemplo mencionado antes se tendrá una tabla similar a la de la Tabla 4.23, la cual muestra el resultado de algunos escenarios para el ciclo combinado que se ha elegido como ejemplo, se han seleccionado eventos iniciales que causan diferentes escenarios.

Evento inicial	Fuego de piscina PF	Jet fire JF	Bola de fuego FB	Explosión VCE	Fuego repentino FF	Explosión CVE	Fuego (no controlado)
E01L3 Liberación de gas natural debido a la rotura total de la tubería del suministro de gas a la ERM	-	5,40E-07	-	0	5,46E-07	-	-
E01L6 Liberación de gas natural debido a una fuga en la tubería desde el suministro de gas a la ERM	-	1,20E-06	-	0	1,15E-06	-	-
E07.21L4 Liberación de condensados de gas natural debido a una fuga en la tubería desde el tanque de drenaje de condensado de gas hasta el camión	6,18E-12	-	-	0	6,23E-12	-	-
E15T1 Liberación de aceite lubricación debido a una rotura catastrófica del tanque del sistema de aceite lubricante de la turbina de vapor	9,00E-08	-	-	0	0	-	2,86E-09
E15T2 Liberación de aceite lubricación debido a una fuga en el tanque del sistema de aceite lubricante de la turbina de vapor	1,80E-06	-	-	0	0	-	5,72E-08
E23 Fuego en transformador elevador Turbina de Gas (GT)	-	-	-	-	-	-	9,54E-05
E23.56 Fuego en transformador elevador Turbina de Vapor	-	-	-	-	-	-	9,54E-05

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Evento inicial	Fuego de piscina PF	Jet fire JF	Bola de fuego FB	Explosión VCE	Fuego repentino FF	Explosión CVE	Fuego (no controlado)
E29B1	Atmósfera explosiva en el sistema de enfriamiento de hidrógeno del generador GT (operaciones de purga / carga)	-	-	-	-	3,42E-07	-
E30B1	Atmósfera explosiva en las baterías principales de la sala electrónica	-	-	-	-	1,35E-06	-
E32T1	Liberación de diésel debido a la rotura catastrófica del tanque de almacenamiento para el suministro de combustible a la bomba de agua contra incendios diésel	2,50E-10	-	-	0	0	-
E32.75T1	Liberación de diésel debido a la rotura catastrófica del tanque de almacenamiento para el suministro de combustible al generador diésel de arranque negro	2,00E-09	-	-	0	0	-

Tabla 4.23.- Frecuencias de Fuego y Explosión para escenarios del ejemplo. Fuente: Archivo.

Una vez que se han estimado las frecuencias de fuego y explosión se evalúan las consecuencias. Esto se realiza mediante el uso de software comercial, como el ya mencionado PHAST software. Siguiendo con el ejemplo anterior, para el que se ha utilizado como evento inicial la fuga de gas que alimenta la ERM E01L6, el resultado obtenido es el mostrado en la Figura 4.12.

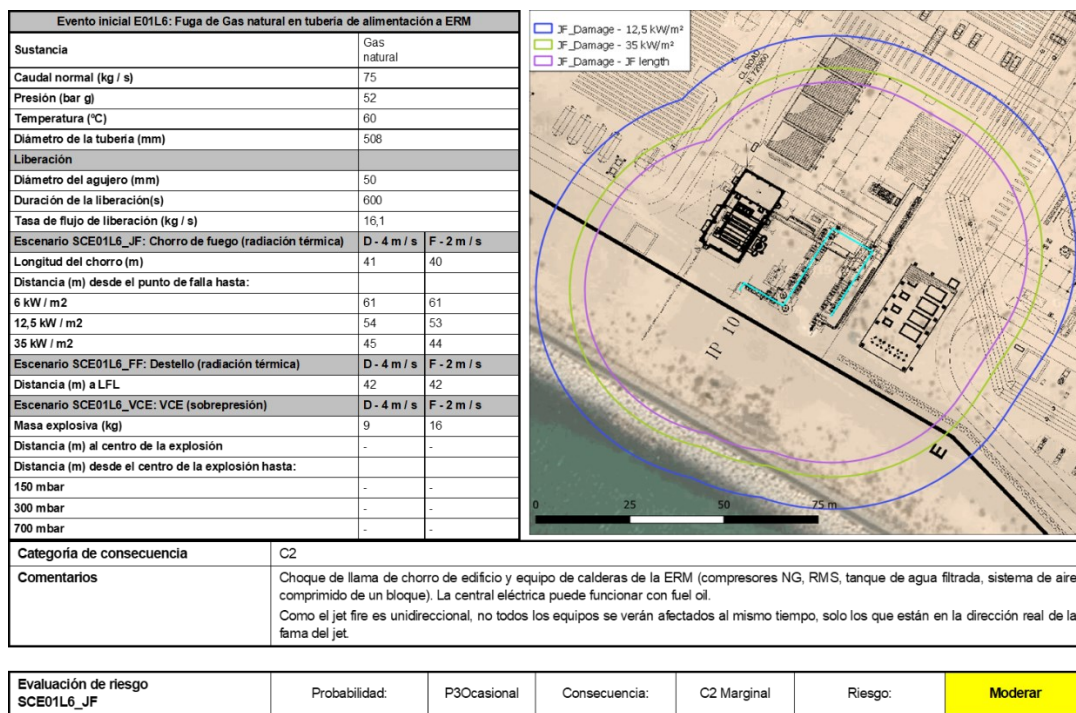


Figura 4.12.- Evaluación de riesgo para el evento iniciador E01L6. Fuente: Archivo.

La Tabla 4.24 proporciona un ejemplo resumen de los cálculos realizados para algunos escenarios de las consecuencias del ejemplo de ciclo combinado utilizado.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Initial event	Meteo conditions	Pool fire			Jet fire			Fire ball			Explosion				Flash fire				
		Pool area (m ²)	Dist. to (m) 6 kW/m ²	Dist. to (m) 12,5 kW/m ²	Dist. to (m) 35 kW/m ²	Jet length (m)	Dist. to (m) 6 kW/m ²	Dist. to (m) 12,5 kW/m ²	Dist. to (m) 35 kW/m ²	Fire ball radio (m)	Dist. to (m) 6 kW/m ²	Dist. to (m) 12,5 kW/m ²	Dist. to (m) 35 kW/m ²	Explosive mass (kg)	Center of explosion	Dist. to (m) 150 mbar	Dist. to (m) 300 mbar	Dist. to (m) 700 mbar	Dist. to (m) LFL
E01L3 Natural gas release due to full bore rupture of pipeline from gas supply to RMS	D4	-	-	-	-	92	153	128	100	-	-	-	-	508	-	-	-	-	127
	F2	-	-	-	-	89	152	125	96	-	-	-	-	690	-	-	-	-	108
E01L6 Natural gas release due to leak in pipeline from gas supply to RMS	D4	-	-	-	-	41	61	54	45	-	-	-	-	9	-	-	-	-	42
	F2	-	-	-	-	40	61	53	44	-	-	-	-	16	-	-	-	-	42
E02L3 Natural gas release due to full bore rupture of pipeline from RMS to blocks (common section)	D4	-	-	-	-	94 (*)	153 (*)	129 (*)	102 (*)	-	-	-	-	356	-	-	-	-	104
	F2	-	-	-	-	91 (*)	152 (*)	127 (*)	99 (*)	-	-	-	-	478	-	-	-	-	89
E02L6 Natural gas release due to leak in pipeline from RMS to blocks (common section)	D4	-	-	-	-	34	50	44	38	-	-	-	-	3	-	-	-	-	29
	F2	-	-	-	-	34	50	44	38	-	-	-	-	6	-	-	-	-	29
E03P2 Natural gas release due to catastrophic rupture of natural gas compressor	D4	-	-	-	-	59	91	79	66	-	-	-	-	44	-	-	-	-	64
	F2	-	-	-	-	57	91	78	64	-	-	-	-	74	-	-	-	-	56
E03P5 Natural gas release due to leak in natural gas compressor	D4	-	-	-	-	19	25	22	20	-	-	-	-	< 1	-	-	-	-	11
	F2	-	-	-	-	19	25	23	20	-	-	-	-	< 1	-	-	-	-	12
E04L3 Natural gas release due to full bore rupture of pipeline from fuel gas performance heater to gas turbine	D4	-	-	-	-	58	90	78	38	-	-	-	-	36	-	-	-	-	55
	F2	-	-	-	-	56	90	77	64	-	-	-	-	58	-	-	-	-	47
E04L6 Natural gas release due to leak in pipeline from fuel gas performance heater to gas turbine	D4	-	-	-	-	20	26	24	21	-	-	-	-	< 1	-	-	-	-	11
	F2	-	-	-	-	20	27	24	21	-	-	-	-	< 1	-	-	-	-	12
E06B1 Explosive atmosphere in heating boiler (RMS package)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,17	0	26	-	-	-
E07H1 Natural gas condensate release due to full bore rupture of hose connected to truck	D4	216	25	14	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2	216	23	13	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E08L3 Fuel oil release due to full bore rupture of pipeline from fuel oil existing tanks	D4	1500	26	12	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2	1500	24	11	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E08L6 Fuel oil release due to leak in pipeline from fuel oil existing tanks	D4	1500	26	12	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2	1500	24	11	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E09P2 Fuel oil release due to catastrophic rupture of fuel oil transfer pump	D4	1500	26	12	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2	1500	24	11	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.24.- Ejemplo resultados de la estimación de consecuencias de un ciclo combinado. Fuente: Archivo.

Con los datos obtenidos para las consecuencias, cada uno de los escenarios es categorizado de modo que los resultados se conviertan en las categorías habituales de trabajo en la matriz de riesgo. La Tabla

Respecto de la matriz de riesgo empleada para la evaluación suele ser la empleada en el proyecto con la categorización de la probabilidad, las consecuencias y el criterio de categorización de riesgo como se muestra en la Figura 4.13.

Categorías Probabilidad	P5 Frecuente ($P > 10^{-1}$)				
	P4 Probable ($10^{-1} \geq P > 10^{-3}$)				
	P3 Ocasional ($10^{-3} \geq P > 10^{-6}$)				
	P2 Remoto ($P \leq 10^{-6}$)				
	P1 Improbable (aprox. Cero)				
		C1 Despreciable	C2 Marginal	C3 Crítico	C4 Catastrófico
		Categorías Severidad			
		Riesgo Bajo	Riesgo Moderado	Alto Riesgo	

Figura 4.13.- Matriz de Riesgos para un estudio EAC de un ciclo combinado. Fuente: Archivo.

En el resultado que se ha mostrado en la Figura 4.11 para el escenario de Fuga de gas, evento E01L6, se ha usado precisamente la matriz de riesgos de la Figura 4.12.

4.4.2.4 Evaluación de Riesgos en Edificios (Building Risk Assessment BRA)

En los proyectos de centrales eléctricas es muy habitual que este estudio forme parte bien del estudio QRA o del estudio EAC.

Igual que ocurre para los QRA, para los BRA existen metodologías diferentes, pero al realizarse de manera conjunta ambas deben ser coincidentes. En las practicas recomendadas de API 752 [190], se recogen las dos principales, una basada en consecuencias absolutas de escenarios creíbles y la segunda en valores de riesgos, ya sea calculando valores de riesgo en su interior para los operadores o fijando criterios de diseño para las sobrepresiones.

En el apartado anterior se han revisado las consideraciones habituales para estos estudios, los cuales son una herramienta utilizada para demostrar que las personas que ocupan edificios en los sitios de proceso están adecuadamente protegidas de peligros tales como explosiones, incendios, reacciones químicas y liberaciones tóxicas y que pueden escapar con seguridad de esos edificios.

El principal objetivo del estudio de riesgos en edificios es valorar si un edificio, que se haya declarado en el proyecto como ocupado, puede ser considerado como una protección contra explosiones, fuego o fugas de materiales tóxicos.

Además, el estudio de riesgos BRA debe ser usado para determinar las cargas explosivas que debe soportar el edificio aunque este no esté ocupado si se considera crítico para los equipos que contiene, por ejemplo sistemas de control o equipos eléctricos de la planta.

4.4.2.5 Clasificación de Áreas Peligrosas

Cuando surge la liberación de una sustancia inflamable y ésta se mezcla con el aire puede producirse o no una nube explosiva en función de la concentración de la sustancia. Si esta se encuentra entre el Límite de Inflamabilidad Superior (UFL) y el Límite de Inflamabilidad Inferior (LFL), se formará una nube explosiva. Por el contrario, si la concentración de la sustancia es inferior a su LFL, entonces la atmósfera no será explosiva. Por lo tanto, las dimensiones de la nube explosiva quedan delimitadas en función de las propiedades del material, de la cantidad de liberación y su dispersión en el aire.

Aquellas áreas en las que hay certeza de que hay una atmósfera explosiva y en aquellas que es esperable que lo haya deben precauciones especiales para la construcción, instalación y uso de aparatos de manera que se proteja la seguridad y la salud de los trabajadores. Estas áreas se denominan “áreas peligrosas”. Las otras áreas en las que no se espera que exista una atmósfera explosiva se denominan “áreas no peligrosas” y no requieren de medidas especiales.

Existen diversas estrategias de protección contra explosiones debidas a la ignición en áreas en la que pueden existir cantidades suficientes de material peligroso. La primera es la más obvia, que consiste en localizar el equipo eléctrico susceptible de provocar una chispa y por tanto provocar la ignición de la sustancia inflamable, fuera del área peligrosa. Otra medida, también muy habitual, es instalar una ventilación adecuada que garantice que no se alcanzan las concentraciones o mezclas necesarias para la ignición. Si la implantación de los equipos en el área peligrosa no puede ser evitada existen dos formas principales de protección, la que se refiere a la contención de la deflagración en el propio equipo, confinando su propagación al exterior, la conocida como protección Ex, o la que se realiza en equipos eléctricos que trabajan a valores de tensión bajos que permiten reducirla todavía más a umbrales que impiden la formación de la ignición, denominada seguridad intrínseca. Sea cual sea el medio de protección elegido, para saber si es o no necesario se necesita realizar la clasificación de áreas peligrosas.

Existen dos sistemas principales de clasificación de áreas peligrosas, NFPA/NEC utilizado principalmente en EEUU y ATEX/IEC que se puede considerar más universal que el primero. El código NFPA 70 National Electric Code, NEC [71] define la clasificación de áreas y los principios

de instalación de los equipos en dichas localizaciones. NEC 500 establece la clasificación de acuerdo con NEC, mientras que los artículos 505 y 506 establecen las equivalencias con IEC. IEC 60079 [191] define el sistema de clasificación así como la categorización y requisitos para los equipos instalados en dichas áreas. Para comparación de ambos sistemas consultar [192] publicado en IEEE.

La Clasificación de Áreas Peligrosas consta de dos documentos básicos fundamentales, el estudio de clasificación de áreas peligrosas y los planos de clasificación de áreas. En el apartado 4.4.1.2 se proporcionó la información inicial requerida para la elaboración de los documentos básicos para la realización del Estudio de Clasificación de Áreas Peligrosas, el cual es la base para la emisión de los planos de clasificación de áreas. Para la elaboración del estudio de clasificación de áreas peligrosas es necesario disponer de:

- Lista de sustancias peligrosa
- Lista de fuentes de escape
- Lista de aperturas y características de los lugares ventilados
- Datos y características proporcionados por los tecnólogos, suministradores de equipos y suministradores de plantas paquete
- Otros datos y escenarios de operación en base a los cuales se realizarán los cálculos para la definición de las áreas peligrosas

Para la determinación de las áreas peligrosas el primer paso es la identificación de las sustancias, a continuación se establecen las fuentes de emisión o fuentes de escape en condiciones normales de funcionamiento. No se consideran para estos estudios fallos mayores como puede ser la rotura de la tubería o el recipiente donde se almacenan.

A continuación para cada fuente de emisión se determina el grado de liberación. Se consideran tres grados básicos de liberación, según la frecuencia y la probabilidad de que esté presente la atmósfera explosiva:

- Continua. Es una descarga que es continua o se espera que ocurra con frecuencia o por períodos prolongados.
- Grado primario. Es una liberación que se puede esperar que ocurra ocasionalmente durante el funcionamiento normal.
- Grado secundario. Es una liberación que no se espera que ocurra en el funcionamiento normal y, si ocurre, es probable que ocurra solo con poca frecuencia y por períodos cortos

También es necesario determinar la tasa de liberación, la cual es la cantidad de gas, vapor o neblina inflamable emitida por unidad de tiempo desde la fuente de liberación. La tasa de liberación depende de los siguientes parámetros:

- a) En caso de que la fuga de gas se produzca en un tanque o en una tubería a presión, la tasa de liberación depende de:
 - Presión dentro del equipo;
 - Geometría de la fuente de liberación;

- Concentración de vapor o gas dentro del tanque o tubería.
 - Temperatura.
- b) En caso de que la fuga se deba a un líquido volátil de un tanque o tubería presurizada:
- Presión de líquido;
 - Geometría de fuente de liberación;
 - Volatilidad líquida;
 - Tamaño de la superficie del líquido;
 - Temperatura del líquido.
- c) Evaporación de una superficie líquida. Ocurre cuando un líquido no ocupa todo un tanque o su superficie está en contacto con la atmósfera. Este es el caso de los tanques de almacenamiento. El líquido se evapora y el material pasa a la atmósfera interior del tanque y a la atmósfera exterior a través del respiradero, dando como resultado, si el vapor es inflamable, una atmósfera potencialmente explosiva.

En la mayoría de los casos, la temperatura del líquido está por debajo de su punto de ebullición y la cantidad de vapor dependerá principalmente de:

- Temperatura;
- Presión de vapor y temperatura de la superficie del líquido;
- Dimensión de la superficie del líquido.

En este caso, la tasa de fuga es la tasa de flujo evaporado.

- d) Otras características de la fuente de escape que podrían afectar al desplazamiento de la atmósfera de gas explosivo son las siguientes:
- Velocidad y dirección de la sustancia inflamable en el punto de liberación;
 - Volatilidad de la sustancia;
 - Diferencia de densidad entre el gas inflamable y el aire;
 - Obstáculos cerca de la fuente de liberación;
 - Características de la ventilación.
 - Condiciones climáticas
 - Topografía

Las aberturas de ubicaciones o habitaciones (por ejemplo, puertas) o armarios que contienen o pueden contener atmósferas explosivas de gas se consideran como posibles fuentes de emisión. El grado de liberación dependerá del nivel de peligro del lugar que contiene la atmósfera explosiva, las características de apertura (frecuencia y duración de los períodos durante los cuales la apertura está abierta), su sistema de cierre, su estanqueidad al gas (eficiencia de los sellos y juntas), y la diferencia de presión entre ambos lados de la abertura.

La ventilación, ya sea por el viento del exterior de los edificios, ya sea natural o forzada en una habitación, produce la renovación del aire y su movimiento. Tiene un efecto triple ya que gracias a la renovación del aire, la concentración de sustancia explosiva en la habitación es limitada, evitando la formación de atmósferas explosivas. Debido a este movimiento de aire, se incrementa

la difusión de la sustancia explosiva en el medio ambiente por lo que se reduce el tamaño y el tiempo de residencia de la atmósfera con una concentración superior al LFL.

El grado de dilución mide la capacidad de la ventilación o las condiciones atmosféricas para diluir una liberación a un nivel seguro. Por lo tanto, una liberación mayor se corresponde con un grado más bajo de dilución para un conjunto dado de condiciones atmosféricas / de ventilación, y una tasa de ventilación más baja se corresponde con un grado menor de dilución para un tamaño de liberación dado.

La norma IEC 60079-10-1 [191] clasifica la dilución en tres niveles:

- Dilución alta. La concentración cerca de la fuente de liberación se reduce rápida y prácticamente no habrá persistencia después de que se detenga la liberación.
- Dilución media. La concentración se controla dando como resultado un límite de zona estable, mientras la liberación está en curso y la atmósfera de gas explosivo no persiste indebidamente después de que la liberación ha cesado.
- Baja dilución. Hay una concentración significativa mientras la liberación está en curso y / o persistencia significativa de una atmósfera inflamable después de que la liberación ha cesado.

Como criterio general en áreas no cerradas, el grado de dilución se considera medio, excepto en el interior de sumideros y en lugares donde existan obstáculos adyacentes en los que el grado de dilución sea bajo. En la práctica, solo se puede proporcionar una alta dilución en caso de ventilación artificial local alrededor de pequeñas fuentes de liberación.

Finalmente, la disponibilidad de ventilación indica la posibilidad de que el sistema de ventilación esté en condiciones de actuar en la habitación en cualquier momento. La norma IEC 60079-10-1 define tres niveles de disponibilidad de ventilación:

- Bueno. La ventilación está presente de forma prácticamente continua.
- Regular. Se espera que haya ventilación durante el funcionamiento normal. Se permiten discontinuidades siempre que ocurran con poca frecuencia y por períodos cortos.
- Deficiente. Ventilación que no cumple con el estándar de regular o bueno, pero no se espera que ocurran discontinuidades por períodos prolongados.

Cuando se calculan las áreas peligrosas de acuerdo con IEC, las áreas peligrosas se clasifican en zonas según la probabilidad de que se produzca una atmósfera explosiva. Estas zonas se definen de la siguiente manera:

- a) **Zona 0.** Un área en la que una atmósfera de gas explosivo está presente de manera continua o por períodos prolongados o con frecuencia.
El límite de tiempo típico en esta zona es > 1000 horas / año (> 10% del tiempo).
- b) **Zona 1.** Un área en la que es probable que se produzca periódica u ocasionalmente una atmósfera de gas explosivo durante el funcionamiento normal.
El límite de tiempo típico en esta zona es > 10 horas / año, pero <1000 horas / año (0,1 - 10% del tiempo).
- c) **Zona 2.** Un área en la que no es probable que se produzca una atmósfera de gas explosivo durante el funcionamiento normal, pero, si ocurre, existirá solo por un período breve.

El límite de tiempo típico en esta zona es > 1 hora / año < 10 horas / año (0,01 - 0,1% del tiempo).

Para determinar el tipo de zona en función del grado de liberación y la efectividad y disponibilidad de la ventilación, se aplica la Tabla 4.25 (tomada de la norma IEC 600791-10-1).

Grade of release	Effectiveness of Ventilation						
	High Dilution			Medium Dilution			Low Dilution
	Availability of ventilation						
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor	Good, fair or poor
Continuous	Non-hazardous (Zone 0 NE) ^a	Zone 2 (Zone 0 NE) ^a	Zone 1 (Zone 0 NE) ^a	Zone 0	Zone 0 + Zone 2	Zone 0 + Zone 1	Zone 0
Primary	Non-hazardous (Zone 1 NE) ^a	Zone 2 (Zone 1 NE) ^a	Zone 2 (Zone 1 NE) ^a	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 or zone 0 ^c
Secondary ^b	Non-hazardous (Zone 2 NE) ^a	Non-hazardous (Zone 2 NE) ^a	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 and even Zone 0 ^c

^a Zone 0 NE, 1 NE or 2 NE indicates a theoretical zone which would be of negligible extent under normal conditions.

^b The zone 2 area created by a secondary grade of release may exceed that attributable to a primary or continuous grade of release; in this case, the greater distance should be taken.

^c Will be zone 0 if the ventilation is so weak and the release is such that in practice an explosive gas atmosphere exists virtually continuously (i.e. approaching a 'no ventilation' condition).

'+' signifies 'surrounded by'.

Availability of ventilation in naturally ventilated enclosed spaces shall never be considered as good.

Tabla 4.25.- Clasificación de áreas peligrosas [191]

A continuación, la Tabla 4.26 proporciona un ejemplo de un ciclo combinado donde se clasifica la zona de botellas de H2 del generador de una Turbina de Gas

Rev	Area: General														Notes		
	Area		Source of Release			Flammable material			Ventilation			Hazardous Area					
	Identification	Nº	Description	Location	Grade of release ¹⁾	Substance ²⁾	Operating temperature and pressure		State ³⁾	Type ⁴⁾	Degree of Dilution	Availability	Zone Type	Zone extent (m)		Reference	Remarks
						°C	Barg					0-1-2-NC	Vertical	Horizontal			
1. GAS TURBINE GENERATORS AREA: H2 SYSTEM																	
0	H2 bottle storage _10UM_	1.16	H2 Bottles hose connections	H2 Bottles	S	Hydrogen	<96	165,5	G	N	Medium	Fair	2	R=4,57	R=4,57	NFPA 497 figure 5.11.15 IEC 60079-10	4,57 m around bottles and hose connections. Outdoor area, below shelter, located at the south of the power plant

Tabla 4.26.- Clasificación de áreas peligrosas para la zona de botellas de H2 de una Turbina de gas para una central de ciclo combinado. Fuente: Archivo.

A continuación se representan las zonas con sus radios y áreas de influencia en planos de clasificación de áreas peligrosas completando la documentación de este apartado. Se muestra el ejemplo correspondiente a la tabla 4.26 anterior.

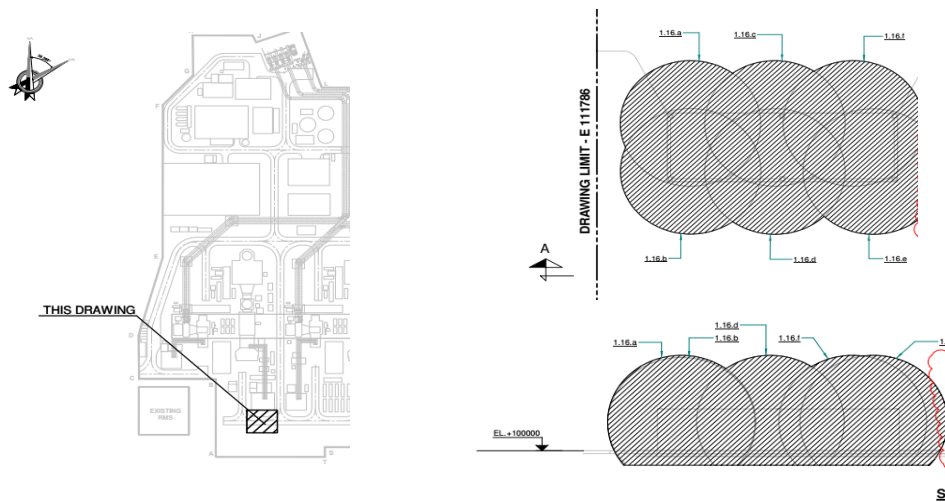


Figura 4.14.- Plano de clasificación de áreas peligrosas para la zona de botellas de H2 de la GT de un ciclo combinado. Fuente. Archivo.

4.4.2.6 Otros Estudios en la etapa de ingeniería de detalle

Estudios RAM, relacionados con la confiabilidad, disponibilidad y mantenimiento de los equipos. Se suelen realizar en base a la metodología FMEA para identificar los equipos críticos en términos de riesgo relacionados con la producción de la planta. Se suelen utilizar herramientas software en base a análisis de Monte Carlo para simular la operación de la planta y evaluar la confiabilidad y disponibilidad en los distintos escenarios. Los análisis no se llevan a cabo en relación con la seguridad, aunque algunas de sus conclusiones pueden ser aplicables en determinados escenarios. Se pueden encontrar ejemplos de estudios para centrales térmicas o sus equipos en [132], [142] o [144], entre otros.

Estudios Bow-Tie o de análisis de pajarita descritos en el capítulo 2, en ocasiones se realizan en las plantas de generación eléctrica en situaciones particulares donde se pretende analizar de modo específico un determinado escenario o evento, véase como ejemplo el trabajo de Daneshvar [193].

4.5 Análisis de riesgos en la fase de Construcción

G. Carter asegura que la construcción es uno de los sectores más peligrosos [194]. Realiza un trabajo comparativo de tres proyectos de construcción en UK (ferrocarril, nuclear y construcción en general), donde constató que una gran cantidad de peligros no fue identificada, lo que, como se sabe, aumenta tanto la probabilidad de ocurrencia como las consecuencias al no poder implementar medidas de mitigación. En el estudio se identificaron dos tipos de barreras para la identificación de peligros, barreras relacionadas con el conocimiento y barreras relacionadas con la falta de procedimientos. Entre las que se encuentran en el primer tipo identificó la falta de intercambio de información entre proyectos, la falta de recursos y procesos de identificación de peligros y evaluación de riesgos subjetivos. En el segundo tipo, principalmente se identificó la falta de estandarización y de estructuración de tareas, entre otras.

Actualmente esto ha cambiado. La industria eléctrica ha incorporado procesos internos y de control a terceros que permiten asegurar que, lo que antes era algo excepcional, ahora se ha convertido en algo relativamente normal, lo que no significa que no sea susceptible de mejora, ya que la identificación de peligros y evaluación de riesgos en la construcción de plantas térmicas está sometido a un proceso de mejora continua, tal como ocurre con otros sectores industriales. Tal como se reconoce en [195], la evaluación de riesgos es la base para una gestión activa de la seguridad y la salud en el trabajo. De hecho, en la legislación europea y, por tanto, española se establece como una obligación del empresario tanto la planificación de acciones preventivas a partir de una evaluación inicial de riesgos, como evaluar los riesgos a la hora de elegir los equipos de trabajo, sustancias químicas y acondicionamiento de los lugares de trabajo.

Como se ha visto en capítulos precedentes, los requisitos relacionados con la evaluación de riesgos para la construcción y los necesarios para la seguridad y salud en el trabajo aplicables al proyecto, se definen en el plan de HSE para la construcción. En este plan se establecen las bases sobre las que se sustentará todo el proceso de identificación de peligros y evaluación de riesgos de la etapa de construcción. El plan de HSE para la obra, habitualmente incluye lo siguiente:

- La definición del alcance de los trabajos, los requisitos legales y la normativa local de aplicación en el lugar de las obras.
- El sistema de evaluación de riesgos corporativo de la compañía que actuará como contratista principal del proyecto, el cual servirá de referencia para el proyecto integrando los de los participantes en los trabajos. La integración de los sistemas en España se realiza por dos vías, la integración documental y la integración operativa [196]. La integración documental se realiza en cuatro niveles: Manual de Gestión, procedimientos de las actuaciones preventivas, las instrucciones de trabajo (Work Procedures WP) y los registros de actividad. Para la integración operativa es necesaria la definición de la política empresarial en materia de Seguridad y Salud y Medioambiente (SSMA), así como establecer un modo de actuación, es decir, de estructurar, organizar el sistema de gestión integrado en la empresa.
- Los sistemas de evaluación de riesgos de los tecnólogos (OEM) y de los subcontratistas que ejecutarán las obras.

- Los sistemas de identificación de peligros y evaluación de riesgos del cliente, si los hay. Es muy recomendable encontrar el acuerdo del cliente en todo lo relacionado con la seguridad en el emplazamiento durante la fase de construcción.
- Las lecciones aprendidas de proyectos similares ejecutados con anterioridad.
- Procesos de observación preventiva y otros mecanismos para las observaciones de los trabajadores con objeto de mantener un control efectivo de los riesgos identificados y evaluados[197].
- Los estudios HAZID, HAZCON y estudios de constructabilidad que se hayan realizado durante la etapa de ingeniería conjuntamente con el equipo de construcción.
- Los resultados de investigaciones de accidentes de que se disponga.
- Las “Exposiciones o Declaraciones de Métodos” (conocidos como Method Statement de su acepción original), así como los procedimientos de construcción y pruebas y puesta en servicio de la planta proporcionados por los contratistas, cuando los hay.
- Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto
- Metodologías de Evaluación de Riesgos que serán de aplicación.

El proceso de evaluación de riesgos en la etapa de construcción es similar al que se realiza en cualquier proceso de evaluación de riesgos, el cual ya ha sido discutido previamente. En él se distinguen las etapas habituales: Identificación del peligro, estimación del riesgo, evaluación del riesgo y control del riesgo.

Como siempre, en primer lugar, se debe proceder con la identificación de peligros, para ello el responsable de realizar la actividad debe:

- Desarrollar una lista de peligros que suelen estar presentes en obras de características similares.
- Coordinar con el cliente la lista preliminar.
- Consultar e incorporar las lecciones aprendidas para incorporar los peligros ya identificados. Consultar la base de datos de incidentes/accidentes ocurridos con anterioridad.
- Revisar la documentación de fabricantes prestando especial atención a los avisos y peligros identificados por ellos.

Respecto a la estimación del riesgo, en el proceso de evaluación de los riesgos de construcción es habitual utilizar métodos cualitativos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias. El riesgo como siempre será función de ambos parámetros. La matriz de riesgos propuesta en [195] es muy utilizada por contratistas españoles en sus proyectos internacionales y se ilustra en la Figura 4.15. En [198], también se propone un método simplificado semicuantitativo que también es utilizado habitualmente.

Niveles de riesgo

		Consecuencias		
		Ligeramente Dañino LD	Dañino D	Extremadamente Dañino ED
Probabilidad	Baja B	Riesgo trivial T	Riesgo tolerable TO	Riesgo moderado MO
	Media M	Riesgo tolerable TO	Riesgo moderado MO	Riesgo importante I
	Alta A	Riesgo moderado MO	Riesgo importante I	Riesgo intolerable IN

Figura 4.15.- Método simplificado para la evaluación de riesgos [195]

A continuación se proporcionan algunos ejemplos típicos de obra para la determinación de las consecuencias:

- Ligeramente dañino:
 - Daños superficiales, pequeños cortes y magulladuras, irritación de los ojos por polvo.
 - Molestias e irritación, por ejemplo: dolor de cabeza o incomodidad.
- Dañino:
 - Laceraciones, quemaduras, conmociones, torceduras importantes, fracturas menores.
 - Sordera, dermatitis, asma o trastornos musculoesqueléticos.
- Extremadamente dañino
 - Amputaciones, fracturas mayores, intoxicaciones, lesiones múltiples, lesiones fatales.
 - Cáncer y otras enfermedades crónicas que acorten severamente la vida.

Para la determinación de la probabilidad de ocurrencia, se atiende a un criterio simplificado:

- Probabilidad baja: El daño ocurrirá raras veces
- Probabilidad media: El daño ocurrirá en ocasiones
- Probabilidad alta: El daño ocurrirá siempre o casi siempre

También se considerará para la estimación de la probabilidad, la frecuencia de exposición al peligro, los fallos en el servicio de suministro eléctrico o de agua, el fallo de componentes y maquinas, así como el posible fallo de los dispositivos de protección (EPIs o actos inseguros de las personas, intencionados o no intencionados), entre otros.

Los niveles de riesgos indicados en el cuadro de la figura anterior forman la base para decidir si se requiere mejorar los controles existentes o incrementarlos mediante la inclusión de unos nuevos. De los valores obtenidos en la Figura 4-14 se tomarán las medidas necesarias de mitigación, en caso de ser requeridas. La Tabla 4.27, proporciona el criterio ampliamente usado como punto de partida para la toma de decisión. En esta tabla también se indican los esfuerzos necesarios para el control de los riesgos y la urgencia con la que deben adoptarse las medidas de control y mitigación, las cuales, por otra parte siempre deben ser proporcionales al riesgo.

Riesgo	Acción y temporización
Trivial (T)	No se requiere acción específica
Tolerable (TO)	No se necesita mejorar la acción preventiva. Sin embargo se deben considerar soluciones más rentables o mejoras que no supongan una carga económica importante. Se requieren comprobaciones periódicas para asegurar que se mantiene la eficacia de las medidas de control.
Moderado (M)	Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, determinando las inversiones precisas. Las medidas para reducir el riesgo deben implantarse en un periodo determinado. Cuando el riesgo moderado esta asociado con consecuencias extremadamente dañinas, se precisará una acción posterior para establecer, con más precisión, la probabilidad de daño como base para determinar la necesidad de mejora de las medidas de control.
Importante (I)	No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Puede que se precisen recursos considerables para controlar el riesgo. Cuando el riesgo corresponda a un trabajo que se está realizando, debe remediarse el problema en un tiempo inferior al de los riesgos moderados.
Intolerable (IN)	No debe comenzar ni continuar el trabajo hasta que se reduzca el riesgo. Si no es posible reducir el riesgo, incluso con recursos ilimitados, debe prohibirse el trabajo.

Tabla 4.27.- Valoración del riesgo [195]

Una vez que se han identificado todos los peligros y los riesgos han sido estimados y evaluados, se identificarán las acciones correctivas. La evaluación de riesgos debe ser, en general, un proceso continuo. Por lo tanto, la adecuación de las medidas de control debe estar sujeta a una revisión continua y modificarse si es preciso. De igual forma, si cambian las condiciones de trabajo, y con ello varían los peligros y los riesgos, habrá de revisarse la evaluación realizada.

La seguridad en la etapa de construcción se encuentra en permanente evolución en los grandes proyectos, sirva como referencia el anexo del PMI recientemente incorporado al PMBOK en su revisión del año 2016 [199], donde se incorporan en su apéndice 3 referencias de causas comunes de riesgos en la etapa de construcción para su uso por los equipos de gestión de proyectos. Otros autores [200], proporcionan guías para la eliminación de peligros relacionados con la seguridad y la salud laboral. En el caso mencionado, en relación con el cumplimiento con OSHA y en concreto proporcionando las posibles vías para la identificación de peligros en obra, para a continuación abordar las técnicas de prevención de accidentes. Se seguirá este enfoque mostrando algunos ejemplos en paralelo de cómo se realizan las actividades propuestas en la construcción de plantas térmicas. Esta ha sido la forma más practica de proporcionar una visión lo más amplia posible de un tema que por sí solo tiene amplitud suficiente para ser el motivo principal de la investigación.

4.5.1 Antes del inicio de los trabajos

En primer lugar se establece de manera inequívoca la organización en obra de modo que queden perfectamente identificadas las funciones y responsabilidades en materia de seguridad y salud en el emplazamiento para cada rol. Esta organización obviamente se define en función del tipo de

contrato, de las características de las compañías intervinientes y del tamaño de la obra. La organización debe incluir a todos los participantes en la construcción, al cliente al contratista principal, a los tecnólogos, a los subcontratistas y a todos los vendedores y suministradores de equipos y/o servicios. Para ello será preciso establecer un plan de homologaciones de terceros para su participación en obra. Así antes del inicio de los trabajos en obra, cada compañía interviniente debe disponer del Plan de Seguridad, Salud y Medio Ambiente (SSMA) propio, el cual incluye normalmente al menos lo siguiente:

- Políticas.
- Organización y Responsabilidades.
- Procedimientos de comunicación.
- Introducción y programa de formación.
- Procedimientos de gestión de riesgo.
- Evaluación de riesgos para las actividades específicas de construcción y montaje.
- Prácticas de trabajo seguro.
- Procedimientos de emergencia.
- Procedimientos de primeros auxilios.
- Medidas de protección medioambiental.
- Programa de motivación.

Obviamente los planes de seguridad de todas las compañías que intervienen en las actividades de obra deben ser compatibles.

Es muy recomendable que antes del inicio de los trabajos realizar una Pre-conferencia de Construcción [200], donde se alinean alcances, documentos y se identifican los principales peligros relacionados con las actividades a realizar. Es lo que habitualmente se conoce como la reunión de lanzamiento en obra de los trabajos de cada subcontratista, lo que se realiza de manera habitual en los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica. Aquí se establecen de manera particular las necesidades de adaptación de los planes de SSMA de cada compañía al proyecto. De este modo, todos los subcontratistas y participantes en obra dispondrán antes del inicio de los trabajos de los siguientes planes, programas y procedimientos:

- Plan SSMA para la Construcción.
- Plan de Gestión Medioambiental para la Construcción.
- Plan de Identificación de Peligros.
- Plan de respuesta de emergencia.
- Otros planes como plan de formación, de motivación, de tráfico u otros en función de los alcances y tipología de los trabajos.

Todos los subcontratistas dispondrán, por tanto de un Plan de Identificación de Peligros acorde con el alcance de los trabajos a realizar en obra.

Además de lo anterior, también se requerirá disponer de un programa de comunicación, el cual es fundamental para asegurar que los equipos de trabajo en obra realizan sus tareas de manera segura, así como de un procedimiento de gestión de operaciones simultáneas (SIMOP), que permita gobernar correctamente tareas que se realizan a la vez en un frente de trabajo o tajo.

4.5.2 Reuniones de Seguridad

Las reuniones de seguridad en obra garantizan que todos los implicados están alineados con las actividades y tareas de construcción y montaje que van a ser realizadas.

Además de la reunión inicial de lanzamiento del proyecto, donde se tratan los asuntos generales relativos a la seguridad y salud en la obra, se realizan habitualmente reuniones de seguridad diarias y semanales.

La reunión diaria de seguridad de construcción en obra es una reunión que alinea los trabajos a realizar en el día poniendo en conocimiento de las partes implicadas los riesgos y peligros identificados. La identificación de peligros en el sitio es fundamental para identificar las posibles particularidades o especificidades que pueden aparecer incrementando los niveles de riesgo considerados en los planes generales. Para ello se realizan inspecciones diarias de seguridad que identifican los peligros nuevos y las áreas de interés que requieren una atención mayor. Téngase en cuenta que las actividades de construcción por su propia naturaleza provocan alteraciones continuas en el lugar de las obras (tajos), ya que es muy dinámica y cambiante, por ejemplo, equipos temporales que ocupan una ubicación inicialmente no prevista, trabajos en altura modificados por el propio avance de los trabajos de montaje, etc.

Es conveniente que una vez a la semana la reunión diaria adquiera un mayor nivel con la participación de los máximos responsables de seguridad en obra de todos los implicados para revisar conjuntamente aspectos tales como resultados de las inspecciones y revisiones de seguridad diarias, condiciones peligrosas y acciones inseguras nuevas o no previstas que deben ser abordadas para reducir sus niveles de riesgo, necesidades de EPIs, seguimiento de medidas correctivas, revisión de procedimientos y análisis de riesgos y específicamente dos asuntos relevantes como son las charlas a pie de obra y la investigación de accidentes/incidentes.

Respecto de las charlas a pie de obra, son reuniones previas al trabajo realizadas para informar a los empleados involucrados en las tareas, sobre los riesgos a los que están expuestos y las medidas proporcionadas para asegurar un lugar de trabajo seguro. El objetivo final de estas sesiones de información o charlas es prevenir y controlar acciones y condiciones inseguras, anticipar los riesgos profesionales manteniendo la vigilancia y concienciación de los trabajadores de manera que se mejore la gestión de riesgo y la eficacia de las medidas preventivas. Estas charlas también proporcionan un medio para comunicar y acordar las medidas establecidas en el permiso de trabajo para realizar la actividad.

En las charlas a pie de obra se comunica cuáles son las tareas a realizar, cuáles son los pasos o el procedimiento para completar la tarea, así como qué herramientas y equipo son necesarios para su realización. También es habitual poner de manifiesto que puede salir mal y que tipo de lesiones se pueden producir, así como los medios necesarios para evitar, precisamente, esos daños y lesiones.

Estas charlas deben cubrir temas prácticos y deben ser participativas. Deben realizarse en el idioma nativo de los trabajadores para asegurarse del buen entendimiento por todos. Es habitual

que existan charlas diarias y semanales donde se anticipen los trabajos y situaciones de peligro o requisitos de seguridad.

El uso del Análisis de Accidentes/Incidentes es una técnica que también se utiliza para la identificación de peligros. Procede del sector minero e incorpora medidas de mitigación a partir de causas previamente identificadas en otros accidentes previos conocidos. En el plan de HSE para la construcción debe incorporarse un procedimiento de gestión de accidentes en obra y la obligatoriedad de su investigación y reporte, manteniendo un registro activo durante la fase de ejecución, de tal modo que se reporte periódicamente a la compañía para formar parte de las lecciones aprendidas para instalaciones futuras.

4.5.3 Análisis de Seguridad del Trabajo (JSA) y Exposición de Métodos (Method Statement)

Todas las actividades de construcción tienen riesgos inherentes, los cuales no siempre se pueden eliminar, en cuyo caso habrá que reducirlos a una condición de riesgo aceptable.

La técnica más habitual usada en la identificación de peligros en la construcción es el Análisis de Seguridad en el Trabajo, que se conoce como JSA de sus siglas en inglés Job Safety Analysis.

Para realizar la identificación de peligros en las actividades de construcción es necesario en primer lugar dividir el alcance del proyecto en fases, las cuales serán a su vez subdivididas en tareas y actividades, de manera que dichas tareas y actividades se evaluarán separadamente.

El nivel de riesgo de las actividades y tareas permitirá establecer los permisos de trabajo necesarios para cada una de tales actividades y tareas. También se identificarán las medidas de mitigación necesarias para que el nivel de riesgo sea al menos reducido a un nivel de riesgo aceptable.

La técnica del HAZCON [201], [202], también es utilizada específicamente para el tratamiento de los riesgos de construcción. Se suele realizar en la etapa de ingeniería con objeto de que sus resultados se apliquen a los diseños y de este modo se puedan reducir los riesgos en etapas previas a la construcción. Suele constar de dos etapas, una primera más general donde, mediante listas de verificación, el equipo de construcción identifica los riesgos mayores del proyecto que se pueden presentar no solo en relación con el emplazamiento si no aquellos exteriores a los límites del mismo. Por ejemplo, se consideran riesgos relacionados con la contaminación del suelo, las rutas de acceso, las condiciones climáticas durante la construcción (lluvias torrenciales, climas muy fríos, tropicales, etc.), factores culturales o disposición de residuos durante la construcción, etc. En una segunda etapa se proporciona una evaluación detallada de los riesgos de construcción cuando la ingeniería se encuentra muy avanzada o casi finalizada. Temas relacionados en este segundo HAZCON son habitualmente, la revisión del primer informe HAZCON, la revisión del plan de HSE para la construcción o la revisión de las Exposiciones de Métodos y de los requisitos de seguridad de los subcontratistas, entre otros. También se suele revisar el programa de construcción, las limitaciones en las actividades de construcción, la ubicación de equipos pesados, análisis de constructabilidad, etc.

Dado que el HAZCON utiliza listas de verificación, es probable encontrar procedimientos corporativos que no se designen específicamente con este nombre pero cuya función sea la misma. Nótese que en ocasiones puede incluirse como parte de los estudios HAZID, incluso HAZOP, durante las etapas previas o en la etapa de ingeniería.

Volviendo a la Exposiciones de Métodos (MS), su objetivo principal es describir las precauciones de seguridad que se deben implementar para controlar los riesgos identificados en la evaluación. En el MS se detallan los equipos de control y de protección necesarios para la seguridad de las tareas y de los trabajadores durante su ejecución.

Cada actividad y tarea en la que se descomponen las fases del alcance, se dividen a su vez en pasos, de modo que se evalúan los peligros de cada paso antes de describir exactamente cómo controlar los peligros y mitigar los riesgos. El MS también debe incluir los peligros asociados con los subproductos de las tareas y actividades. Por ejemplo, si se produce algún efluente, el MS debe incluir cómo proceder para el tratamiento de dichos efluentes de manera segura.

También incluye normalmente información general, como el número de horas requeridas para la realización de una determinada tarea, la secuencia de trabajo así como la gestión, responsabilidades y los procedimientos de emergencia aplicables.

A diferencia de las evaluaciones de riesgos, en el MS se detallan como, cuando y porque deben ser implementadas las medidas de control identificadas en la evaluación de riesgos. Por tanto, el MS debe ser realizado después de la evaluación de riesgos de las tareas y actividades en las que se han descompuesto las fases de los trabajos de construcción, no antes.

En base a la Exposición de Métodos (MS) se realiza el Análisis de Seguridad en el Trabajo (JSA), el cual incluye la evaluación de riesgos de cada paso de cada tarea o actividad, de modo que además de incluir los peligros se indiquen las medidas de mitigación para la reducción del riesgo identificado.

Los peligros que habitualmente se encuentran involucrados en las actividades de construcción son entre otros los siguientes:

- Caídas al mismo nivel.
- Caídas a diferente nivel.
- Caída de materiales y herramientas.
- Golpes, cortes o abrasiones derivados de herramientas, equipos o manejo de materiales.
- Lesiones por elementos afilados.
- Proyección de partículas y salpicaduras de líquidos.
- Contactos eléctricos accidentales.
- Lesiones por atrapamientos de equipos con partes móviles.
- Accidentes, colisiones, caídas de vehículos equipados con ruedas y vehículos en general.
- Enterramientos o estructuras perforadas.
- Fuego y explosiones.
- Ruido y Vibraciones.
- Estrés por calor y agotamiento por calor.

- Cargas suspendidas.
- Mantenimiento de herramientas defectuosos/insuficiente (manuales y eléctricas)
- Mantenimiento de equipos defectuosos/insuficiente
- Operaciones desautorizadas de equipos pesados.

En el Anexo 1 se han incluido algunos ejemplos de Evaluaciones de Riesgos y Exposición de Métodos (RAMS de sus siglas en inglés), para actividades de construcción en una central térmica donde se pueden distinguir algunos de los conceptos anteriores.

Activity Assessed : Pipework Systems Fabrication, Erection and assembly		Reference :	Rev : 0
Site / Location :		Assessment Date :	
Area / Plant / Unit : Boiler		Review Date : N/A	
Assessor :		Assessor's Signature :	
Assisted By :		Others (Specify) :	
Those Affected A Employees C Adjacent Workers E Contractors B Members of the Public D Children / Young Persons F Visitors		G Client H	

HAZARD	NO	YES	THOSE AFFECTED	HAZARD	NO	YES	THOSE AFFECTED	HAZARD	NO	YES	THOSE AFFECTED
Access / Egress	✓	ACEG	Machinery	✓	ACEG	Ionising Radiation	✓				
Multiple Working	✓	ACEG	Mobile or Fixed Plant	✓	ACEG	Radioactive Contamination	✓				
Fall of Person(s)	✓	ACEG	Adjacent Live Plant or Equipment	✓	ACEG						
Fall of Object(s)	✓	ACEG	Hand or Power Tools	✓	ACEG	Repetitive Work	✓				
Slips / Trips	✓	ACEG	Hot Process - Welding / Grinding / Machining	✓	ACEG	Lone Working	✓				
Confined Space(s)	✓	ACEG	Environmental	✓	ACEG	Interfaces with Third Parties / Contractors	✓	ACEG			
Restricted means of escape / rescue	✓	ACEG	Weather	✓	ACEG	OTHERS (state below) ...					
Contact with Process	✓	ACEG	Temperature (High or Low)	✓	ACEG	Other - 1 - Failure of Lifting Points	✓	ACEG			
Electricity	✓	ACEG	Lighting	✓	ACEG	Other - 2					
Fire - Explosion	✓	ACEG	Noise	✓	ACEG	Other - 3					
Vibration	✓	ACEG	Hazardous Substances	✓	ACEG	Other - 4					
Lifting Operations / LRT Plan	✓	ACEG	Asbestos	✓	ACEG	Other - 5					
Vehicles	✓	ACEG	Dust / Fume	✓	ACEG	Other - 6					
Manual Handling	✓	AE	Water / Drowning	✓	ACEG	Other - 7					
						Other - 8					

WORK AT HEIGHT RESCUE PLAN - Radio Ch. 3, Site Controller:	
Introduction: This Plan was created with Reference to the _____ and the _____ Procedure for working at height.	
This document is intended to provide guidance on emergency planning and the provision of resources for a work at height incident involving either self-evacuation of an individual without additional assistance or rescue of an incapacitated person by others (Site ERT and Emergency Services).	
<ul style="list-style-type: none"> • Work at height rescues can be technically challenging due to the locations in which they occur. • Work at height rescues are often restrictive, preventing easy access by rescuers. • They may be poorly lit, so sufficient light must be available for the rescuers. 	
WORK AT HEIGHT RESCUE PLAN (to be completed by the Team)	
Name of the Company carrying out the Working at Height (Wah) task:	IPSA No. 0018
Brief Description of Working at Height Task: Installation etc.	Install of Boiler Pressure Parts
Will there be more than one access point to the Working at Height area:	Yes
Can entry be made by walking into the Wah:	No
Will a scaffold be used in the Working at Height and is it checked:	Yes - Brand will carry out inspection and relag.
Will the Working at Height Task involve Hot Work:	Yes - Monitored with gas monitor and local ventilation
Will fuelled generators be used in or near the Wah:	No
Will the Working at Height Task work party have a Gas Monitor present:	Not required
Will the Working at Height Task involve lone working:	No
Will a standby man be present:	No
How will the standby man communicate with the Working at Height work party:	N/A
In the event of an emergency how will the standby man make contact with the Supervisor/Rescue team, and is everyone involved aware of this procedure:	Verbal, radio. Contact control room and to raise the alarm by radio on Channel 3
Will the Working at Height work party be required to wear rescue type harnesses:	No, personnel will be made aware of work location and undertake a drill.
Will the Working at Height work be closely monitored by the supervisor:	Yes
Has everyone involved in the Working at Height been instructed/trained in Wah Hazard Awareness:	Yes
Have the MEWP operators been trained/familiarised with their machines and their emergency procedures:	Yes
Have the MEWP operators undertaken an emergency drill:	Yes

Figura 4.16.- Ejemplo RAMS de trabajos en altura para una central térmica. Fuente: Archivo

4.5.4 Registros y procedimientos de seguridad para control del riesgo

Lo anterior (RAMS), dará como resultado salidas o registros que deben estar permanentemente actualizados para una gestión eficaz de los riesgos en obra. Así es habitual disponer de:

- Registro de evaluación de riesgos de seguridad y salud ocupacional del sitio.
- Registro HAZID.
- Registros de HAZCON, Constructabilidad y / u otros Estudios de Construcción.
- Análisis de seguridad laboral (JSA).
- Registro del Riesgos del proyecto.
- Plan de Prevención de Riesgos Laborales.
- Medidas de control para eliminar o reducir los peligros y riesgos.

Para una gestión adecuada del riesgo es preciso además, disponer de los elementos necesarios de control que aseguren que las medidas de mitigación son adecuadas y siempre se encuentran activas. Así, también es habitual disponer en obra de:

- Un sistema de Gestión del cambio (Management Of Change MOC). Debe estar claramente identificado el proceso de gestión de cambios, aprobaciones y disciplinas afectadas. Es conveniente que en el proceso de gestión de cambios se incorpore el proceso de evaluación de riesgos ya sean nuevos o modifiquen a la evaluación precedente sin la aplicación del cambio.
- Un sistema de permisos de trabajo (Work Permit Sheets WPS) que formalmente establezca exactamente qué trabajo se debe hacer, dónde y cuándo. Es necesario que un responsable

evalúe el trabajo y verifique la seguridad en cada etapa de las que consta el trabajo. Las personas que realizarán el trabajo deben firmar el WPS con objeto de demostrar que entienden los riesgos y que se tomarán las precauciones requeridas para su realización.

- Un sistema o procedimiento de ejecución de bloqueo y etiquetado, LOTO (LockOut-TagOut), donde se establecen los requisitos que aseguren el aislamiento de fuentes peligrosas como eléctricas, químicas, térmicas, hidráulicas o neumáticas que durante la manipulación de equipos o componentes puedan poner en riesgo la seguridad de las personas.
- Todos los procedimientos de seguridad necesarios para la realización de las tareas propias de construcción. Se tendrán secciones dedicadas para cada una de ellas, siendo habitual disponer de las siguientes, las cuales se mantendrán en todo momento actualizadas en función de las particularidades del sitio:
 - Reglas, normas y procedimientos genéricos de seguridad
 - Medios de protección colectivos
 - Equipos de Protección Individual (EPIs o PPE)
 - Soportación temporal de equipos componentes y tuberías
 - Protección anticaídas
 - Señales y barricadas
 - Excavaciones y Rellenos
 - Montaje de estructura metálica
 - Grúas y equipo pesado
 - Limpieza abrasiva
 - Almacenamiento de materiales, ya sea en almacén o en campa.
 - Manejo de químicos
 - Soldadura y corte
 - Espacios confinados
 - Trabajos de radiografiado
 - Seguridad en oficinas, movilidad en obra y otros requisitos y protocolos de actuación de seguridad

Como muchas de estas actividades son subcontratadas a subcontratistas externos, es habitual exigir en los subcontratos, la inclusión de obligaciones y requisitos para la inclusión de dichos procedimientos de seguridad.

Finalmente, las instalaciones de obra deben disponer de aquellos procedimientos de emergencia que respondan a situaciones como las siguientes:

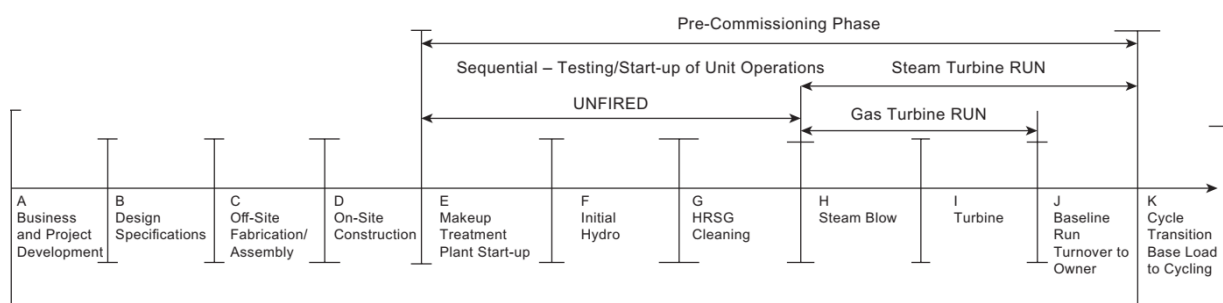
- Fuego y explosiones
- Lesiones e incidentes con vehículos y equipo pesado
- Derrames y fugas imprevistas de materiales peligrosos
- Otras situaciones de emergencia externas al propio emplazamiento de la obra

4.6 Análisis de riesgos en la fase de Comisionado, Pruebas y puesta en servicio

En los capítulos precedentes no se ha necesitado aclarar cuál es el alcance de la ingeniería o de la etapa de construcción. Sin embargo, en el caso de la fase de comisionado y pruebas y puesta en servicio es conveniente establecer adecuadamente que se entiende por esta fase y cuando se puede considerar que se inicia, ya que existen interpretaciones y opiniones diversas al respecto en la bibliografía. El grupo de Ciclos Combinados de ASME [203] considera que la etapa de precomisionado se extiende desde la finalización de la construcción, arranque de la planta de tratamiento de agua, hasta que el grupo Turbina-Generador está conectado a la red en carga base, ver Figura 4.16. A los efectos de este trabajo, se seguirán las definiciones de CCPS [204], donde se divide la puesta en servicio de la planta en tres categorías, precomisionado, comisionado y puesta en servicio, tal como se ha descrito en el capítulo 3.3.2. Adicionalmente es posible establecer dos fases diferentes en la etapa de puesta en servicio, la denominada “puesta en marcha en seco” y la “puesta en marcha en húmedo”, aunque estos términos son más habituales en el sector de refino y petroquímico, que en el sector eléctrico.

Lo que si se encuentra generalizado en la bibliografía es el hecho de que la etapa más peligrosa en la construcción de una planta es la que se realiza durante su puesta en servicio. Lamentablemente, además de los peligros que se identifican en esta fase en cada una de las actividades, se suman de manera recurrente los retrasos acumulados en las fases previas del proyecto que incrementan el nivel de peligrosidad al sumar al peligro de las propias actividades de las pruebas y puesta en marcha, el nivel de estrés de los equipos del proyecto y la necesidad de “aligerar” los procesos de verificación que en algún caso se pueden considerar redundantes o con menos contenido y fácilmente prescindibles. Nada más alejado de la realidad. Es precisamente en esos momentos en los que la dirección de las pruebas debe ser más exigente en el cumplimiento de los protocolos y verificaciones requeridas para la ejecución de las actividades de esta etapa. Los operadores y técnicos encargados de la ejecución de las pruebas y puesta en marcha deben ser conscientes de este hecho y poner en práctica todos sus recursos para, precisamente, garantizar que todos los pasos requeridos en los protocolos de pruebas se realizan tal como es requerido.

Como ejemplo de hasta qué punto puede resultar atractivo reducir operaciones de pruebas para ganar tiempo de retraso de fases previas, se muestra el cronograma de ejecución de un ciclo combinado, con estimación de tiempos medios en cada fase en la Figura 4.17, obtenido de [203].



Notas:

- A) El desarrollo del plan de negocio puede variar de 6 meses a 2 años para establecer contratos y obtener permisos.
- B) El desarrollo de especificaciones de diseño comienza durante el segmento A.
- C / D) La construcción puede empezar como pronto a los 6 meses de B). Se requieren alrededor de 18 a 24 meses total para este segmento.
- E) Como mínimo se requiere 1 semana y se puede iniciar simultáneamente la instalación de temporalidades.
- F) La limpieza inicial del tren de agua de alimentación y las pruebas de agua y la puesta en marcha requieren de 4 días a 1 semana.
- G) La limpieza de tuberías (flushing) y la limpieza química del generador de vapor (HRSG) requieren como mínimo 1 semana; sin embargo, se puede emplear hasta 30 días según el tipo y condiciones de las líneas después del montaje.
- H) El soplado de vapor como mínimo requiere mínimo 2-3 días, pero suele emplear hasta 3 semanas
- I) Arranque de la turbina. El tiempo, que incluye el desmantelamiento de la tuberías temporales del soplado y el reacondicionamiento de la turbina de vapor (ST) para aceptar vapor más el ajuste de los controles del sistema de control de la turbina, variará y puede llevar de 5 a 6 semanas.
- J) Las pruebas de funcionamiento / rendimiento de referencia requerirán 100 horas de funcionamiento continuo normalmente. El tiempo total variará.
- K) Operación comercial, garantías de funcionamiento. Por lo general, se requieren aproximadamente de 1 a 2 años para completar todos los problemas pendientes.

Figura 4.17.- Cronograma de ejecución de un proyecto de ciclo combinado [203]

Es decir, dejando a un lado la definición que se hace de precomisionado, se puede observar que el tiempo de pruebas y puesta en marcha requerido para un ciclo combinado llevara hasta la operación comercial no menos de 10-12 semanas si todo va bien sobre un proyecto “fast-track” de 24-26 meses, es decir en torno al 10% del tiempo total. La realidad es que el periodo de pruebas y puesta en marcha de una planta de ciclo combinado difícilmente baja de 16 semanas, es decir unos 4 meses. Valores totalmente diferentes son los que se refieren a la puesta en servicio de una central térmica de carbón con caldera supercrítica o de lecho fluidizado, las cuales además disponen de sistemas de limpieza de gases que hacen más compleja su puesta en servicio, cuyo tiempo de arranque es mucho mayor.

Conviene mencionar también el proceso mediante el cual se transfieren los equipos desde la organización de construcción a la organización de pruebas y puesta en servicio. Como se realiza esta transferencia es importante, en tanto en cuanto las condiciones de los equipos pueden influir en la seguridad de las operaciones posteriores.

Normalmente, en los proyectos de construcción de centrales térmicas, la planta se divide en sistemas mecánicos y eléctricos que cumplen una función determinada en la planta. Así, se dispone de sistemas de agua, sistemas de vapor, sistemas de media tensión, etc. Referirse al capítulo 3 para una revisión de los sistemas y equipos de una planta de generación eléctrica. Es decir, la estructura de trabajo en la planta se basa en el establecimiento de sistemas mecánicos, eléctricos y de I&C. Los sistemas se pueden construir completos o en subsistemas o “paquetes”, de manera que una vez finalizada la construcción, el departamento de ingeniería en obra elabora un dossier, donde se incluye toda la documentación del sistema según ha sido construido y probado desde la fase de construcción. Por ejemplo, el sistema de transferencia de agua desmineralizada desde la planta de tratamiento de agua hasta el condensador incluye un sistema de bombeo, un sistema de tuberías, unos centros de control de motores y parte del sistema de

control distribuido DCS, entre otros. En la etapa de construcción se realizaron pruebas hidrostáticas de las tuberías, pruebas de continuidad de cableado y otras pruebas necesarias en el alcance del equipo de construcción. En el dossier de transferencia del sistema se incorporará toda la documentación de que se dispone hasta la fecha relativa al paquete de trabajo considerado, incluyendo, por supuesto, los resultados de las pruebas mencionadas, así como los planos marcados según se ha construido (red-lines para As-built). Este dossier se denomina Paquete de Transferencia o ToP de sus siglas en inglés (“Turn Over Package”).

En la planificación del proyecto es usual definir además de los hitos que definen el camino crítico, por ejemplo el hito de finalización del montaje mecánico (Mechanical Completion), otros hitos como los hitos de transferencia de ToPs desde la organización de construcción a la organización de pruebas. También es muy habitual que el proceso de transferencia de ToPs incluya una revisión del estado de los equipos, componentes y materiales según se encuentran instalados mediante una inspección conjunta entre los responsables del montaje y los responsables de pruebas en el emplazamiento. Esta inspección normalmente se realiza a través de un paseo de inspección, conocido por su nombre en inglés walk-down, al que normalmente se realiza con la presencia del cliente. El resultado de esta revisión in situ es un documento de aceptación del sistema que incluye la lista de documentos y una lista de pendientes (también conocida por su nombre en inglés, punch-list), de la transferencia del sistema desde la construcción a pruebas. Desde un punto de vista teórico la transferencia se debe realizar una vez se encuentra finalizada la construcción, pero en la práctica, no hay un solo proyecto en el que esto es así, se trata de que la lista de pendientes sea la menor posible, o que dichos pendientes carezcan de importancia para la realización de las actividades de comisionado, lo cual normalmente tampoco es así, por ello se hace necesario disponer de herramientas en la obra que permitan controlar en todo momento el estado diario del avance en la liberación de dichos pendientes en obra. Será necesario también realizar una priorización adecuada de la liberación de pendientes, ya que, es muy habitual, que los equipos de pruebas comiencen a realizar actividades propias del comisionado, como puede ser el llenado de líneas o energización de equipos, mientras el equipo de construcción finaliza los trabajos de montaje de la lista de pendientes que surgió en la revisión, confluyendo en el mismo área de trabajo operarios de construcción y técnicos y operarios del equipo de comisionado. Los procedimientos de operaciones simultáneas (SIMultaneous OPerationS, SIMOPS), son en estos casos determinantes.

Realizar con el rigor requerido las actividades de precomisionado es garantía de éxito en la fase de comisionado y puesta en marcha, ya que gran parte de los potenciales errores pueden ser detectados con mayor facilidad en esta etapa garantizando las operaciones seguras en las fases posteriores. Normalmente las actividades de precomisionado incluyen pruebas a nivel de equipo y componente, lo que hace más sencilla la identificación de los errores posibles cometidos en la construcción y el montaje, aislando con mayor eficacia los potenciales fallos de funcionamiento de dichos equipos y componentes en la operación posterior en el sistema.

En las plantas de generación eléctrica es habitual que las siguientes actividades formen parte de la fase de precomisionado:

- Prueba de presión del sistema, hidrostática y neumática. Es habitual que estas actividades formen parte del alcance de construcción como garantía del montaje correcto de las tuberías. En la bibliografía también se puede encontrar incluido como parte de las actividades de precomisionado.
- Lavado y limpieza química de tuberías y sistemas. Para el lavado (flushing) es habitual utilizar los equipos de planta instalando temporalidades, mientras que para la limpieza química de los circuitos de agua y vapor de caldera se utilizan normalmente instalaciones temporales, las cuales se tratarán con detalle en el capítulo 5.
- Soplado de los circuitos neumáticos con aire comprimido
- Soplado de las líneas de vapor con aire o con vapor de la propia caldera, mediante la instalación de sistemas temporales de tubería que permiten la limpieza de los diferentes circuitos de vapor.
- Comprobaciones y calibración de la instrumentación de campo
- Comprobaciones del sistema de control y su cableado desde campo (loop check)
- Pruebas funcionales y de validación de los sistemas de seguridad
- Comprobaciones de continuidad eléctrica, las cuales como ocurre con las pruebas de presión en tuberías, suelen formar parte del alcance de construcción.
- Pruebas de rodaje de motores y pruebas de sentido de giro.
- Prueba de fugas en tuberías y equipos.
- Pruebas de equipos en vacío y desenergizados.
- Protección y alineación en frío de equipos rotativos.
- Lubricación de equipos.
- Rodaje inicial de equipos sin carga.
- Verificaciones y ajustes en la soportación de tuberías para identificar posibles pandeos y otros daños antes de su operación en condiciones normales.
- Seguimiento de la Lista de pendientes y no conformidades a medida que se van liberando los ToPs al equipo de pruebas
- Medidas de conservación hasta la puesta en servicio final del equipo.

Como se ha indicado, el termino finalización mecánica es menos usado en la terminología contractual de los proyectos de construcción de plantas de generación eléctrica, el cual si es un hito determinante en la planificación en otros sectores como el de refino o petroquímico. No es tan viable la emisión de un certificado de finalización mecánica como si lo es en otros sectores industriales, quizás debido a la metodología usada para la construcción en base a unidades de proceso y áreas operativas. En el sector eléctrico esto es más complejo por las interrelaciones de unos sistemas con otros lo que hace que las “entregas” se produzcan en base a ToPs como ya se ha indicado.

No es habitual por tanto entender que el comisionado (incluyendo las actividades de precomisionado), comienza con la finalización del montaje mecánico, si no que una vez que las actividades de precomisionado enumeradas antes de manera general, pero aplicadas a cada ToP, se completan puede iniciarse el comisionado de los equipos o sistemas. El comisionado se realiza

mediante el arranque de los diferentes equipos y sistemas en los que se descompone la planta con fluidos, en general, fríos, o mejor que operan a condiciones diferentes de las de su operación normal.

La transición entre la etapa de construcción determinada por la finalización mecánica al comisionado no se puede establecer con claridad. Durante unas semanas, variables con la complejidad, tamaño y tecnología del proyecto térmico, coexisten el comisionado y la finalización de la construcción, lo que la hace la etapa más peligrosa en el sitio. Esta variable no siempre se atiende con la suficiente diligencia, ni se tiene en cuenta en los planes de HSE en obra, por lo que la atención a la señalización, barricadas y definición de áreas peligrosas por los responsables de seguridad en obra y los trabajadores se hace mucho más importante para evitar accidentes, sobre todo porque en esta fase las actividades incluyen el manejo de la energía en sus diferentes formas (eléctrica, térmica, etc.).

En la Tabla 4.28 se indican los peligros más comunes de las actividades de pruebas, comisionado y precomisionado con los controles habituales que se establecen para su reducción y mitigación.

ACTIVIDAD	PELIGROS	CONTROLES
Pruebas hidráulicas de tuberías y equipos	El equipo o el material puede fallar, lo que puede causar lesiones debido a la repentina liberación de energía y escombros	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS)
Limpieza química de líneas y equipos	Los productos químicos pueden gotear debido a fallos del equipo o pueden derramarse debido a una mala manipulación o fallo de los accesorios, causando quemaduras al entrar en contacto con la piel, ojos o contaminación del medioambiente. En caso de ingestión de agua químicamente tratada puede originar la muerte.	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE) MSDS Hoja de Datos de Seguridad (Safety Data Sheet SDS)
Pruebas neumáticas de líneas y equipos	El equipo o el material puede fallar, lo que puede causar lesiones debido a la repentina liberación de energía y desechos o restos de construcción	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE)
Soplado de líneas	Después de las pruebas hidráulicas es necesario secar adecuadamente la línea para evitar que quede agua en la línea y pueda causar "golpes" en las líneas que afecten a su soportación y provoquen su apertura causando lesiones. También se pueden encontrar material particulado que es expulsado a la atmósfera y puede causar lesiones en ojos y piel. Existen altos niveles de ruido en estas operaciones.	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE)

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Soplado de tuberías con vapor	Las tuberías calientes pueden provocar quemaduras durante estas operaciones. También existen altos niveles de ruido	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE) Planes de respuesta de emergencia
Apertura de tuberías/bridas para sustituir pernos/juntas, girar discos ciegos, etc	Si la línea está con presión con fluido en su interior, durante la maniobra puede fugarse resultando dañino causando nubes de gas/vapores inflamables causando lesiones serias como quemaduras, intoxicación por inhalación u otras en piel y ojos.	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Procedimiento LOTO Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE) Planes de respuesta de emergencia
Arranque de motores, equipos rotativos y otras pruebas eléctricas	Peligro de descarga eléctrica. Las partes móviles desprotegidas pueden causar diferentes lesiones. Posibilidad de fallo en el equipo durante su puesta en marcha	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Procedimiento LOTO Equipo de Protección Personal (PPE) Planes de respuesta de emergencia
Pruebas hidráulicas y neumáticas de sistemas de instrumentación	Fallos en equipos, componentes o accesorios/tubing que pueden producir lesiones oculares, contaminación por fugas de aceite hidráulico, fallos en la despresurización al desconectar los equipos de prueba de circuito	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Procedimiento LOTO Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPerationS SIMOPS) Equipo de Protección Personal (PPE) Planes de respuesta de emergencia
Manipulación y carga de productos químicos	Los productos químicos pueden producir derrames por una incorrecta manipulación, dañando ojos y piel o por inhalación accidental producir daños en las vías respiratorias causando intoxicación. También producen daño medioambiental	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Equipo de Protección Personal (PPE) MSDS Hoja de Datos de Seguridad (Safety Data Sheet SDS) Plan de respuesta de emergencia
Limpieza con agua a alta presión	Contacto del cuerpo con energía a presión peligrosa, resbalones, caídas. Afección sobre áreas de trabajo adyacentes.	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Equipo de Protección Personal (PPE)
Apriete de pernos/Calibración/Tensión de resortes	Posturas inseguras, dolor de espalda, lesiones en manos, daños en la cara por juntas/bridas	Especificaciones de valores de torque Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Equipo de Protección Personal (PPE) MSDS Hoja de Datos de Seguridad (Safety Data Sheet SDS) Plan de respuesta de emergencia

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Operación de sistemas de tuberías y recipientes	Carga descontrolada de productos químicos, presurización descontrolada, elevación de temperatura, tiempos de llenado insuficientes, procedimientos inadecuados que conducen a fugas, explosiones, lesiones, contaminaciones y otros resultados inesperados	Procedimientos de comisionado y precomisionado HAZOP Gestión del cambio Procedimientos operativos de arranque
Entrada en espacios confinados/Inspección de recipientes	Falta de oxígeno, atmosferas explosivas, sustancias tóxicas, accesos/salidas restringidas, atrapamientos, dificultades de rescate	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Evaluación de riesgos/JSA Señalización, barricada y acordonamiento, Aislamiento de espacios confinados Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Procedimiento LOTO Procedimiento de entrada en espacios confinados Equipo de Protección Personal (PPE) Planes de respuesta de emergencia
Uso de nitrógeno para purga o inertización	Exposición a atmosferas deficientes en oxígeno, presiones más altas de lo normal	Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS), Señalización, barricada y acordonamiento, Identificación de Tuberías Procedimiento de permiso de trabajo (WP) Operaciones Simultáneas (SIMultaneous OPERationS SIMOPS)
Limpieza mecánica	Lesiones en manos, caídas irritación de ojos por polvo o materia diversa	Evaluación de riesgos/JSA Equipo de Protección Personal (PPE)

Tabla 4.28 Peligros y controles de actividades en la fase de comisionado.

Además de lo indicado se incrementan los peligros por circunstancias específicas que requieren una consideración especial, algunas de las cuales pueden ser las siguientes:

- Muchas personas de diferentes contratistas realizando tareas en la misma zona, normalmente también con poco espacio simultáneamente.
- Personas con posibles intereses en conflicto trabajando en el mismo equipo/actividad.
- Demasiada presión para finalizar el trabajo en plazo, lo que conduce a “la toma de atajos” lo que puede conducir a su vez a ignorar o pasar por alto aspectos y medidas de seguridad.
- Personal incorrectamente formado o no familiarizado con los nuevos peligros asociados a las sustancias y materiales empleados en esta fase.
- Trabajar sin los permisos requeridos, como son trabajos en caliente, espacios confinados, LOTO, entre otros.
- Ignorar los requisitos de los permisos o trabajar sin haber realizado las evaluaciones de riesgo adecuadas, tales como JSA o RAMS.
- Incumplimiento de los procedimientos de trabajo en altura o andamiaje.
- Incorrecta señalización, barricadas, señales de precaución o control de acceso a zonas restringidas. Normalmente debido a la situación cambiante del área de riesgo.
- Falta de la adecuada supervisión, coordinación o control de trabajos y tareas.
- Falta de planificación, preparación de materiales, accesorios y equipos adecuados.
- Trabajos nocturnos con falta de iluminación.
- Falta de orden y limpieza en el sitio.

Adicionalmente se deberá prestar atención especial a la adecuada elaboración de los necesarios procedimientos y protocolos que resultan determinantes en la seguridad en esta etapa:

1. Cuidado, custodia y control de etiquetado de sistemas y equipos. Se debe disponer de los medios necesarios para la identificación de responsabilidades respecto al cuidado, custodia y control de sistemas y equipos para colocar las protecciones contra operaciones inadecuadas o no autorizadas que puedan provocar situaciones peligrosas.
2. Etiquetado específico para la etapa de comisionado. Se identificarán los equipos ya transferidos al equipo de pruebas desde el equipo de construcción.
3. Manipulación adecuada de sustancias peligrosas y productos químicos teniendo en consideración y actualizadas las hojas de información de seguridad del material (MSDS).
4. Disponer de los procedimientos de prueba para todas las actividades que se realicen en esta etapa.
5. Disponer de un protocolo de comunicación que informe a la planta desde el equipo de comisionado de las actividades que van a ser realizadas para que todos los trabajadores se encuentren perfectamente informados de las mismas.
6. Disponer del adecuado sistema de señalización, barricadas y acordonamientos de seguridad.
7. Disponer del sistema de bloqueo y etiquetado LOTO (Lock-Out/Tag-Out) adecuado.
8. Establecer un sistema de permisos de trabajo adecuado y disponer de la evaluación de riesgos, JSA/RAMS y formación, los cuales son fundamentales, también en esta etapa, para disponer de la adecuada identificación de peligros y control de riesgos.

Como se ha visto las técnicas de análisis de riesgos más extendidas en la fase de comisionado, pruebas y puesta en marcha para la identificación de peligros y evaluación de riesgos, son esencialmente las siguientes:

- Procedimientos de comisionado, pruebas y puesta en marcha, incluyendo el precomisionado.
- Procedimientos de arranque.
- Descripciones/Exposiciones de métodos de trabajo (MS),
- Evaluación de riesgos/JSA.
- Señalización, barricada y acordonamiento.
- Aislamiento de espacios confinados.
- Procedimiento de permiso de trabajo (WP).
- Procedimiento LOTO.
- Procedimiento de entrada en espacios confinados.
- Equipo de Protección Personal (PPE).
- Planes de respuesta de emergencia.
- Gestión del cambio.

En los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica no es usual encontrar estudios HAZOP para las actividades de comisionado y puesta en servicio. Lo habitual es que para los sistemas y equipos que componen la instalación se disponga de procedimientos de prueba y puesta en marcha emitidos por el cliente, los tecnólogos, fabricantes de equipos, OEMs y por la ingeniería. Los procedimientos de prueba constituyen el sistema de trabajo que garantiza un

trabajo seguro. Se debe disponer de los procedimientos de prueba con suficiente antelación para que los equipos de pruebas conozcan al detalle todas las actividades que se realizarán y puedan evaluar las medidas de mitigación adicionales que se puedan requerir como consecuencia de las especificidades del emplazamiento y avance de los trabajos.

Los procedimientos de pruebas se discuten en el capítulo siguiente.

El sistema de permisos de trabajo que se haya establecido en el emplazamiento debe ayudar a tomar las precauciones necesarias para la realización de las pruebas, de manera que todas las actividades de pruebas deben disponer de su correspondiente permiso de trabajo debidamente autorizado con las firmas de los responsables necesarias para cada uno. Junto con el WP es habitual entregar la documentación asociada a la prueba que se va a realizar, identificando las necesidades de señalización y barricadas del áreas de trabajo afectada.

Igual que en la etapa de construcción, en la etapa de comisionado se realizan diferentes reuniones de los equipos de pruebas, las cuales son determinantes en esta etapa y se hacen se hacen indispensables para la consecución exitosa y segura de las actividades. Es habitual realizar reuniones diarias de comisionado en planta, a las que habitualmente asiste además del equipo de pruebas, los representantes del equipo de pruebas del cliente y los supervisores involucrados de tecnólogos y suministradores de equipo. Se realizan tantas reuniones como las actividades de prueba requieran reevaluando de manera continua el resultado de los test obtenidos. Además de las reuniones diarias, es habitual realizar reuniones de coordinación con el equipo de construcción para estar permanentemente alineados con los peligros y actividades que se realizarán diariamente.

Es muy habitual también, realizar charlas a pie de obra antes del inicio de la prueba para el conocimiento de los participantes en la prueba realizándolas de una manera muy similar a lo descrito en el capítulo de construcción.

Antes del inicio de la prueba debe realizarse una inspección de la zona donde va a ser realizada, de modo que puedan identificarse peligros adicionales a los propios de la misma.

Al finalizar la prueba este hecho debe ser también anunciado reponiendo las temporalidades que hayan sido necesarias implementar.

Particularmente para las pruebas de equipos eléctricos y subestaciones se dispondrá de un protocolo específico, tanto en lo que se refiere a control de accesos a salas eléctricas, como a cierre de interruptores, etiquetado de cabinas eléctricas y sistemas LOTO. Es muy habitual en centrales eléctricas el uso de candados para el bloqueo de equipos y cuadros eléctricos. También es habitual el uso de estos bloqueos en válvulas y equipos mecánicos, cuando se requiere.

Para las pruebas de sistemas eléctricos y sistemas de control específicamente se dispone de canales separados en los equipos de comunicación de modo que no interfieren con otro tipo de pruebas. Se debe asimismo disponer de un protocolo de energización de equipos y pruebas de sistemas eléctricos y de control.

4.6.1 Procedimientos de prueba y puesta en marcha

Los procedimientos de pruebas y puesta en marcha son los documentos básicos para la ejecución de las distintas tareas, pruebas y verificaciones necesarias de esta etapa del proyecto. No es posible realizar las tareas requeridas sin esta documentación con un nivel de seguridad aceptable.

Los procedimientos de prueba y puesta en marcha proporcionan el nivel de detalle y los requisitos necesarios para llevar a cabo las distintas actividades que son necesarias para la realización de las pruebas de los equipos, componentes y sistemas que conforman la instalación. Incluyen en diferentes secciones los requisitos y necesidades, tanto de recursos humanos como de equipos de prueba, materiales y herramientas para realizar con garantías la puesta en marcha de los equipos y sistemas que componen la instalación. Incluyen un desglose claro y detallado del alcance y normalmente son preparados por personal experimentado en la realización de pruebas con la asistencia y participación de los técnicos que han desarrollado el diseño en la fase de ingeniería y proyecto. Para elaborar adecuadamente un procedimiento de pruebas y puesta en marcha, suele ser necesario disponer de los manuales de operación, pruebas, puesta en marcha y mantenimiento de los suministradores de los equipos. Ambos procedimientos se integran en el procedimiento de pruebas del sistema de manera que, conjuntamente, se tengan en consideración todas las precauciones e interrelaciones de unos componentes y equipos con otros, garantizando de manera eficiente en el proyecto todas las medidas de seguridad de acuerdo con los requisitos del proyecto para la puesta en servicio. Es habitual por tanto, que los procedimientos de pruebas y puesta en servicio se detallen a nivel de sistema, incluyendo las interrelaciones con otros sistemas soporte (aire, energía, combustible, etc.), las temporalidades que son necesarias para su correcta ejecución y aquellas interfases con otros sistemas y equipos.

En los proyectos de construcción de centrales térmicas, normalmente los procedimientos de prueba y puesta en servicio se organizan en paquetes diferenciados entre sistemas mecánicos y de proceso, sistemas eléctricos y sistemas de instrumentación y control. En cada uno de estos bloques se dispone a la vez de procedimientos de prueba, puesta en marcha y ajuste de componentes y equipos genéricos y de procedimientos de prueba de sistemas. Los primeros suelen ser generales, como es el caso de bombas centrifugas, equipos rotativos, instrumentos, relés de protección, etc., mientras que los segundos incluyen los requisitos específicos del sistema y de los componentes y equipos que los constituyen, referenciando o recurriendo a los genéricos en aquellos casos en que se considere necesario.

Los procedimientos de pruebas y puesta en servicio incluyen habitualmente, como mínimo, lo siguiente:

- La división de responsabilidades de las partes involucradas en las actividades.
- Describen, con suficiente detalle, las tareas paso a paso.
- Indican la secuencia en la que se deben realizar las tareas.
- Deben incorporar los procedimientos y requisitos del suministrador del equipo cuando así se considere.

- Proporcionan una indicación clara de los límites del sistema y las interfaces con otros sistemas.
- Describen los elementos individuales de la disciplina y los requisitos generales del sistema.
- Indican con claridad y sin lugar a duda dónde se realizarán los trabajos.
- Indicar, asimismo, las condiciones en las que se llevarán a cabo dichos trabajos.
- Se incluirán los materiales requeridos para la ejecución de los trabajos.

Es muy habitual dividir los procedimientos de prueba en diferentes etapas:

- Comprobaciones y revisiones previas
- Verificaciones a realizar en los equipos y componentes antes de la realización de las pruebas
- Procedimientos de pruebas propiamente dichos incluyendo los resultados obtenidos
- Revisiones y atención a parámetros específicos durante la prueba
- Otras consideraciones relevantes que deben ser consideradas antes, durante y después de la prueba, como puede ser retirada de equipamiento temporal, disposición de residuos y efluentes, etc.

Para la correcta ejecución de las distintas tareas que se proponen en cada fase, es habitual que los procedimientos de pruebas incorporen listas de verificación que requieran la atención del operador y le obliguen a realizar determinadas comprobaciones antes de realizar las tareas y actividades que los componen. Dichas comprobaciones, verificaciones o puntos de atención también requieren de la firma de la persona que las realiza y en ocasiones del responsable del equipo de pruebas. En la Figura 4.18, se ha incluido un ejemplo de lista de verificación de un procedimiento de pruebas y puesta en servicio de un embarrado de baja tensión el cual está constituido por diversas cabinas e interruptores que reciben por un lado tensión desde un embarrado superior y alimentan consumidores en baja tensión.

Como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4.19, existen varios apartados, los cuales normalmente se corresponden con las etapas que se incluyen en el procedimiento de pruebas y puesta en servicio. Se realizan comprobaciones y verificaciones previas a la energización que ponen el foco no solo en aspectos relevantes de seguridad para la propia energización del cuadro, si no que revisan que la instalación se haya realizado adecuadamente y que los mecanismos y salvaguardas de seguridad se encuentran operativos antes de la puesta en servicio.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

HOJA DE CONTROL PARA RESULTADOS DE PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA CABINAS DE BAJA TENSIÓN					
VERIFICACIONES GENERALES ANTES DE LA ENERGIZACIÓN					
INTERRUPTOR : CUBICULO ____ (Cumplimentar una hoja por cada Interruptor/fusible)	REVISADO	FECHA	INTERRUPTOR : CUBICULO ____ (Cumplimentar una hoja por cada Interruptor/fusible)	REVISADO	FECHA
VERIFICACIONES GENERALES					
Limpieza del cubículo (interna y externa) Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos mecánicos internos Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
El cableado se ha realizado de acuerdo con la última revisión aprobada de los esquemas del suministrador y de la ingeniería Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos por llave Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Rating plate values according to last approved revision of supplier drawings Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Etiquetado de la cabina Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Operaciones de apertura y cierre Local eléctrica y mecánica (si aplica) Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos por llave Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Señalizaciones Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos por llave Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Operación manual del interruptor Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos por llave Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
VERIFICACIONES DE ELEMENTOS AUXILIARES					
Verificación de componentes de acuerdo con documentación suministrador Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Verificación de la sección y número de acometida/ cables de salida de acuerdo con esquemas desarrollados Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Transformadores de corriente conectados o en cortocircuito Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Transformadores de tensión conectados o en cortocircuito Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Indicadores locales con ajuste de cero realizado (Amperim y voltímetros) Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Verificación de las resistencias de caldeo Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
OTRAS VERIFICACIONES ANTES DE LA ENERGIZACIÓN					
Instalación de acuerdo con las instrucciones del fabricante Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Fijación de la cabina al suelo (falso suelo) Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Red de tierras del cuadro de baja con la red de la sala eléctrica Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Operación de puertas y enclavamientos y cierres Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Estado de la pintura Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Apriete de tornillos y fijación Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Ausencia de humedad en el interior de la cabina Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Fusibles en trafo de tensión instalados Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Colores y etiquetado de conductores de acuerdo con esquemas desarrollados Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Verificación de instalación de terminales y bornes Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
ENERGIZACIÓN DE LOS CUADROS ELECTRICOS					
Puertas y paneles traseros instalados y cerrados Realizado <input checked="" type="checkbox"/>			Alimentaciones auxiliares para control y protección (220 Vcc and 400/230 Vca) en servicio Realizado <input checked="" type="checkbox"/>		
Cierre interruptor alimentación a cabina/cuadro eléctrico Realizado <input checked="" type="checkbox"/>			Cierre interruptor alimentaciones auxiliares control y protección Realizado <input checked="" type="checkbox"/>		
Cierre interruptor alimentaciones auxiliares medida Realizado <input checked="" type="checkbox"/>			Verificación de las alimentaciones de medida, control y protección en cabina a energizar Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Enclavamiento puerta de la cabina del interruptor operativo Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Enclavamientos y bloqueos cableados en el interruptor Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Reles de protección ajustados y operativos Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Valores de intensidad y tensión según espec. En alimentaciones al cuadro Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Verificar alarmas y anomalías en cuadros de alimentación A a la cabina Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Verificar alarmas y anomalías en cuadros de alimentación B a la cabina Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Cierre interruptor Realizado <input checked="" type="checkbox"/>			Verificar nivel de tensión a la salida del cuadro según especificaciones Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		
Verificar alarmas Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>			Verificar valores en cabina de medida de acuerdo con especificaciones Correcto <input checked="" type="checkbox"/> Incorrecto <input type="checkbox"/>		

Figura 4.19.- Lista de verificación para la energización de una cabina de baja tensión.

Es necesario además realizar una reevaluación continua de las condiciones y circunstancias que involucran la prueba, teniendo en cuenta aspectos tales como:

- Donde se realizará,
- Que equipo y sistema está implicado,
- Qué actividad de prueba se va a realizar,

- Los pasos en que se divide la prueba y los peligros y medidas de control de cada paso y
- Quien realizará el trabajo.

Como se indicó antes, el sistema de permisos de trabajo establecido ayuda a despejar algunas de las consideraciones anteriores y permite tomar las precauciones necesarias adicionales para la realización de las pruebas.

4.6.2 Revisiones de seguridad previas al arranque (PSSR)

En ocasiones, aunque poco habituales en el sector eléctrico, algunos clientes requieren el uso de revisiones de seguridad antes del arranque (Pre Start Safety Review, PSSR), utilizando formatos y protocolos que, en términos generales proceden de otros sectores industriales [47] o [205], cuyos formatos y especificaciones se adaptan para su uso en plantas de generación. Algunos ejemplos pueden encontrarse en la web de diferentes compañías especializadas en este tipo de revisiones [206].

Las bases de diseño de este tipo de análisis se encuentran reguladas en la normativa de seguridad y salud laboral estadounidense OSHA [39],[40]. También se desarrolla con mucho detalle por el centro de seguridad de los procesos químicos CCPS [47].

El término “Revisión de seguridad previa al arranque”, tiene dos vertientes con significados diferentes según su uso. Cuando se aplica de manera general como parte del programa de gestión de la seguridad del proceso en una instalación, la regulación OSHA antes mencionada, implica un subsistema de gestión dentro de ese programa, de modo que mediante su aplicación se asegura que el proceso en evaluación ya sea nuevo o después de alguna modificación relevante, está preparado para su arranque o re arranque, según el caso. En OSHA, las PSSR se incluyen en la posición 12 del programa de un total de 14 elementos de seguridad. Si se aplica PSSR en su definición más simple, es decir, fuera del programa de gestión de OSHA, esto supone que antes del arranque de un equipo se realiza una revisión previa que garantice que las maniobras se realizan de manera segura. Por tanto, la implementación de PSSR se puede estudiar atendiendo a un requisito del sistema de gestión de la seguridad o atendiendo a la implementación de una buena práctica de protección contra el riesgo.

Cuando la PSSR se implementa como parte del programa de gestión, ésta consta de ocho pasos básicos:

1. Capacitar a los trabajadores en el uso de PSSR
2. Identificar los sucesos iniciadores y determinar si es aplicable la PSSR
3. Determinar el tipo de PSSR a realizar mediante la aplicación de los formularios simples/cortos o complejos/largos
4. Conformar el equipo que llevará a cabo la PSSR
5. Realizar la PSSR
6. Cumplimentar la documentación de la PSSR

7. Llevar a cabo el seguimiento de las acciones resultantes de la PSSR

8. Implementar un sistema de mejora continua en base a las lecciones aprendidas de las PRSS

Al evaluar el evento o suceso iniciador se evalúa también si se precisa la aplicación de PSSR y el tipo de esta revisión de seguridad antes del arranque que se aplicará. Se distinguen dos tipos principales de revisiones de seguridad, la denominada de formato corto o simple y la denominada de formato extendido o largo. Al analizar el evento inicial del accidente o escenario sobre el que se está trabajando, según el resultado de la matriz de riesgos sea alto o medio se utilizará el formato extendido, mientras que si el resultado de la matriz de riesgos es bajo, se utilizará el modelo corto o simplificado.

En cualquiera de las dos versiones, extendida o simplificada, se evalúan los siguientes cuatro aspectos principales:

- La construcción y el montaje de los equipos y sistemas se ha realizado de acuerdo con las especificaciones de diseño.
- Son adecuadas y se encuentran en su lugar los procedimientos de respuesta de emergencia, los procedimientos de operación y las prácticas de trabajo seguro.
- Se ha realizado (si ha sido así especificado), el análisis de peligros de proceso (PHA) y sus recomendaciones se han implementado y se han resuelto no quedando pendientes que incrementen el nivel de riesgo en las operaciones a realizar.
- Los empleados y operadores que realizarán las tareas disponen de la capacitación necesaria para su realización.

Cuando se realiza una PSSR extendida el grado de detalle de la evaluación es mayor. Se revisan además de los aspectos generales de la instalación otros detalles como los sistemas eléctricos y de control o aquellos relacionados con la instalación y condiciones de trabajo de las tuberías.

En la Figura 4.20 se incluye un ejemplo de PSSR en formato extendido para un sistema de tuberías y electricidad.

Entre los aspectos generales se evalúa habitualmente la ubicación y operatividad de los sistemas de detección, extinción, rutas de escape, señalizaciones y barricadas de seguridad, entre otros.

Entre los aspectos relacionados con la funcionalidad de los sistemas eléctricos (normales y de emergencia) así como los sistemas de control y protección disponibles en la planta, se comprueba que los sistemas temporales se han desinstalado adecuadamente y los sistemas de alimentación normal están operativos. La energización del equipo eléctrico en condiciones de seguridad es algo que en todas las instalaciones es requerido. Se incluyen revisiones en planta de aquellos aspectos más relevantes que suelen ser causa de accidentes. Desde la verificación de los sistemas de señalización en los cuadros eléctricos, hasta la comprobación de que la documentación disponible in situ es la final y se dispone de ella para aquellas comprobaciones necesarias. Los sistemas de ajuste de las protecciones y la revisión de la correcta operación de la red de tierras también forman parte de estas comprobaciones.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Fecha	xxxxxxx	PSSR (PreStartup Safety Review)		Logo de Compañía	
Equipo PSSR	xxxxxxx	Formato complejo. Lista de Verificación Proyecto			
Instalación/Proceso	N/A	Cod. Equipo revisado		Doc. adjunta	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Tuberías					
Descripción		Si	No	N/A	Notas
¿Las líneas están purgadas, secas, libres de oxígeno?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Se han eliminado todas las tuberías temporales?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Se han eliminado todos los soportes temporales de tuberías?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Todos los drenajes y respiraderos están cerrados y conectados?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Todas las válvulas, válvulas de venteo y aislamiento son accesibles y estan operativas?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Se han instalado o eliminado los discos ciegos para la puesta en marcha?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Los discos ciegos temporales estan disponibles e instalados en su caso?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
¿Los soportes de tuberías/dispositivos de expansión están configurados para la puesta en marcha?		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se han minimizado los nipples de extensión y se han eliminado las bifurcaciones en voladizo		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Todas las tuberías están codificadas con su color y están debidamente identificadas		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se ha revisado línea a línea para garantizar que la tubería se instale según lo especificado		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los accesos y operatividad y capacidad para mantenimiento son correctos		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La rotación de las válvulas y la orientación es correcta para su operación y mantenimiento		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Todas las válvulas y sus actuadores están correctamente engrasada/os y lubricada/os		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comentarios:					
Notas:					
Equipos y sistemas eléctricos					
Descripción		Si	No	N/A	Notas
El edificio está presurizado (si es necesario) y se ha comprobado el funcionamiento del sistema HVAC		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los equipos de protección personal para los operadores estan disponibles (Botas, guantes, pertigas,..)		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los accesos a los cuadros y cabinas electricas son seguros, limpios y correctamente señalizados		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los diagramas electricos (unifilares, cableados y desarrollados) estan impresos en los armarios		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Las entradas de cables estan selladas y los prensaestopas instalados en los cuadros		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Todas las alimentaciones electricas estan identificadas y probadas		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los sistemas de calentamiento (resistencias de calefacción) estan operativos		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La iluminación de las salas electricas y la interior de cuadros y cabinas esta operativa		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
El sistema de puesta a tierra esta probado y operativo		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los ajustes de protecciones principales se encuentran en servicio		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se han realizado las pruebas previas a la energización de los equipos (FAT y pruebas en vacio)		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los sistemas de emergencia se encuentran operativos		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
El sistema de permisos de trabajo y LOTO esta implantado y las autorizaciones en regla		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
La señalización de peligro electrico, equipos en tensión, esta instalada		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se ha comprobado en las areas clasificadas que los niveles de protección son adecuados		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Se dispone de los protocolos y procedimientos de energización de los equipos electricos aprobados		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Los sistemas de drenaje y recogida de aceites estan operativos		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comentarios:					
Notas:					
Equipo de PSSR					
	Nombre / Puesto	Firma	Fecha		

Figura 4.20.- Ejemplo de lista de verificación para un PSSR complejo de tuberías y eléctrico.

En la lista de verificación de tuberías se revisan aspectos de detalle relativos a la instalación y precomisionado de las líneas para conocer su estado antes de la introducción de fluidos en su

interior. De la misma forma, el soportado de las tuberías también es un elemento fundamental para que se opere en las mejores condiciones de seguridad en todos los modos de operación. En ocasiones las presiones y temperaturas de trabajo requieren ajustes diferentes para la operación en frío y para la operación en caliente.

Es muy importante verificar que los accesos a los equipos y las condiciones de trabajo al final de la etapa de construcción son las adecuadas para que se realicen las maniobras de pruebas y puesta en marcha de la manera más adecuada y en condiciones seguras.

Como se ha indicado previamente, la PSSR es una metodología muy poco extendida en los proyectos de generación eléctrica, al contrario de lo que ocurre en el sector del refino y petroquímico, donde es una técnica muy extendida.

4.6.3 Evaluación de Riesgos de Última Hora (LMRA)

La evaluación de riesgos de última hora o de último minuto, LMRA, de sus siglas en inglés, se puede utilizar en cualquier tipo de instalación. Es un análisis que se realiza en base a listas de verificación que se aplican inmediatamente antes de realizar las maniobras de construcción o de puesta en marcha, de tal modo que, de una manera rápida, se proporciona un elevado índice de seguridad antes de llevar a cabo la prueba [207].

El LMRA parte de la hipótesis de que, aunque se hayan realizado múltiples estudios y análisis de riesgos para mejorar la seguridad de las tareas específicas que se van a llevar a cabo, se pueden producir peligros no identificados previamente que pueden provocar accidentes inesperados. Propone inmediatamente antes de llevar a cabo la tarea realizar dos pasos sencillos:

1. Justo antes de empezar con el trabajo, detenerse y pensar en los posibles riesgos existentes precisamente en ese momento
2. Preguntarse si todo es correcto. Realizar una verificación rápida y concienzuda de los elementos de seguridad de que se dispone para controlar y mitigar los riesgos y peligros que se pueden encontrar en ese momento.

Algunas compañías lo incorporan en sus estándares de calidad y seguridad incorporándolo como parte de su sistema de gestión de seguridad incluyendo a los diferentes contratistas para su uso [208]. Se pretende que el personal se involucre en la seguridad mediante la adopción de unas sencillas normas de comportamiento precisamente antes de llevar a cabo cualquier actividad potencialmente peligrosa. Preguntarse en el primer paso algunas cuestiones que por elementales no dejan de resultar determinantes en la mayor parte de los accidentes:

¡Parar antes de empezar!

¡Analizad los peligros y riesgos!

- a) ¿Qué cree que puede salir mal y qué peligros puede ver? ¡Piénselo!
- b) ¿Cuáles son las causas? ¡Tome acción!
- c) ¿Qué haría para prevenir el peligro? ¡Pida ayuda si la necesita!
- d) En caso de duda, no empiece. Consulte a su jefe.

¿Todo está bien?

¡Controlad!

- a) Medidas de protección personal presentes: casco, gafas, protección auditiva, calzado de seguridad, guantes, etcétera.
- b) ¿Conoce y es accesible una ruta de escape segura?
- c) ¿Tiene licencia de trabajo? ¿Ha consultado con su superior? ¿Procedimiento correcto?
- d) ¿Verificó personalmente si la instalación dispone de las medidas de seguridad adecuadas?
- e) ¿Se están utilizando las herramientas adecuadas?
- f) ¿Ha detectado una situación insegura? Deje de trabajar y advierta a sus colegas.
- g) ¿Está el ambiente suficientemente protegido contra chispas y llamas?
- h) ¿Tiene los elementos de seguridad y en orden para trabajos en altura?
- i) ¡Respete las reglas de tráfico y los pasillos seguros!
- j) ¿Está el lugar de trabajo ordenado?

En la Figura 4.21, se proporciona un ejemplo sencillo de Lista de Verificación de una revisión de última hora que puede resultar útil para cualquier situación, el cual está basado precisamente en los aspectos mencionados arriba.

Esta metodología tampoco es habitual encontrarla en los proyectos de generación de energía objeto de este trabajo, solo se ha encontrado una referencia que hacía uso de ella en un cliente cuyo sector de procedencia era precisamente el sector del refino y la planta en cuestión se construyó precisamente como cogeneración de la refinería y de las instalaciones auxiliares a la misma.

No es una técnica habitual en el sector eléctrico, pero se menciona igual que PSSR por su capacidad para detectar peligros y riesgos no evaluados o no detectados con las técnicas más habituales.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

Fecha	xxxxxxx	LMRA (Last Minute Risk Assesment)		Logo de Compañía	
Equipo / Tarea	xxxxxxx	Lista de Verificación Proyecto			
Instalación/Proceso	xxxxxxx	Cod. Equipo afectado		Doc. adjunta	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Antes del inicio de los trabajos					
Descripción		Si	No	Notas	
¿Tiene suficiente información sobre el trabajo que va a realizar?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Considera seguro el método de trabajo acordado?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Ha leído y entendido el permiso de trabajo?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Se cumplen todos los términos y condiciones del permiso de trabajo?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Está todo el equipo necesario debidamente disponible y en buen estado de funcionamiento?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Todos los trabajadores disponen de los equipos de protección individual EPI adecuados?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Esta la zona de trabajo limpia y segura?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Esta la zona adecuadamente señalizada y con las barricadas adecuadas?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Existen peligros adicionales?					
En caso afirmativo, especifíquelos en la lista que se proporciona a continuación y analice si se requieren medidas adicionales. Si por el contrario cree que el riesgo es aceptable, indíquelo poniendo "Aceptar". Si este no es el caso, escriba 'No' y pídale consejo a su responsable de equipo.					
¿Existen peligros adicionales?					
Descripción		Si	No	Notas	
¿Peligro de caída o tropiezo?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Riesgo de lesiones por impacto?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Peligro de ser golpeado por piezas móviles o transporte interno?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Peligro de atrapamiento?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Peligro de caída de objetos?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Iluminación suficiente?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Exposición a altas o bajas temperaturas?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Contacto con corriente eléctrica?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Contacto con productos peligrosos?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Formación de polvo?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Ruido o vibraciones?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Peligro de incendio o explosión?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Hay otras personas trabajando simultáneamente en las cercanías del lugar de construcción (tajo)?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Existe riesgo de contaminación ambiental?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Los residuos y efluentes se eliminan mediante métodos adecuados?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
¿Todos saben qué hacer en caso de accidente, incendio o evacuación?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Otros peligros identificados		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comentarios adicionales:					
Notas:					
Equipo que realizará los trabajos					
Jefe de Equipo / Responsables					
Nombre / Puesto		Firma		Fecha	
Operarios					
Nombre / Puesto		Firma		Fecha	

Figura 4.21.- Lista de Verificación para evaluación de riesgos de última hora, LMRA (de [208])

4.7 Conclusión

Después de la revisión exhaustiva llevada a cabo en los capítulos precedentes, se dispone de datos suficientes como para evaluar el estado en el que se encuentra la industria de construcción de centrales eléctricas respecto de otras industrias, que se consideran punteras en este campo, como es el sector del refino, petroquímico o de gas.

En primer lugar conviene retomar el enfoque dado en 4.2 de [44] y [42] el cual se sustenta en los cuatro pilares básicos ya mencionados, cuyo cumplimiento se puede ahora evaluar, a saber:

- Compromiso con la seguridad del proceso: *El Plan de HSE para el Proyecto y los estándares de ingeniería demuestran este compromiso.* El Plan de HSE cumple este primer compromiso.
- Comprensión de los peligros y los riesgos. *El diseño de las nuevas instalaciones requiere conocimiento del proceso, identificación de peligros y análisis de riesgos.* En general se atiende la comprensión de los peligros y los riesgos.
- Gestionar los riesgos. *Las nuevas instalaciones requieren integridad, operabilidad y mantenibilidad por personal competente.* Los proyectos de construcción de centrales atienden a la gestión continua de los riesgos.
- Aprender de la experiencia. *Las lecciones aprendidas de instalaciones similares deben incorporarse a las nuevas instalaciones.* Existen en las organizaciones sistemas de lecciones aprendidas que sirven a este fin, al menos se tiene la intención de aprender de la experiencia.

Pilar RBPS	Elemento RBPS	Actividades del proyecto relacionadas con el elemento RBPS	Cumplimiento
Compromiso con la seguridad de los procesos	Cultura de seguridad de procesos	Presente en todas las actividades del proyecto	SI
	Cumplimiento de normas	Utilizar estándares y RAGAGEP (Buenas practicas de ingeniería)	SI
	Competencia en seguridad de procesos	Involucrar a empleados y contratistas competentes	SI
	Participación de la fuerza laboral	Responsabilidades de seguridad en el diseño, construcción y operaciones para empleados y contratistas.	SI
	Alcance de las partes interesadas	Consultar e informar sobre los riesgos potenciales durante la planificación y ejecución del proyecto	SI
Comprender los peligros y los riesgos	Gestión del conocimiento de procesos	Incorporar conocimientos sobre materiales, tecnología y equipos.	SI
	Identificación de peligros y análisis de riesgos	Identificar peligros y evaluar riesgos asociados Identificar medidas para la reducción de riesgos	SI parcial
Gestionar el riesgo	Procedimientos operativos	Desarrollar procedimientos para la puesta en servicio y las operaciones.	SI
	Practicas seguras de trabajo	Desarrollar procedimientos para las actividades de construcción	SI
		Planificar y realizar la instalación y la puesta en servicio previa	SI
	Integridad y confiabilidad de activos	Asegurar la mantenibilidad y confiabilidad, especialmente SCE	SI
		Garantizar la calidad del diseño, la adquisición y la construcción	SI
	Gestión de contratistas	Precalificar a las empresas contratadas candidatas	SI
		Garantizar que los servicios contratados cumplan los objetivos de seguridad	SI
	Garantía de formación y rendimiento	Capacitar a empleados y contratistas Certificaciones para ingenieros, inspectores y técnicos	SI
	Gestión del cambio	Evaluar los cambios de diseño posteriores a HAZOP	SI
		Evaluar los cambios de campo	SI (parcial)
Disponibilidad operacional	Confirmar que los activos como instalados cumplen con las especificaciones de diseño	SI	
	Confirmar que no hay acciones y / o documentación pendientes	SI	
Realización de operaciones	Todas las actividades del proyecto	SI	
	Abordar rápidamente las actividades / condiciones inseguras	SI (parcial)	
Manejo de Emergencias	Desarrollar planes ERP para construcción y operaciones	SI	
Aprenda de la experiencia	Investigación del incidente	Incorporar lecciones aprendidas de instalaciones similares	SI
		Investigar incidentes con prontitud	SI
	Medición y métricas	Recopilar, analizar y archivar datos	SI
	Revisión de cuentas	Llevar a cabo revisiones técnicas independientes / de puertas de escenario	SI
Revisión de la gestión y mejora continua	Evaluar si todos los elementos de RBPS funcionan según lo previsto y producen los resultados deseados	SI	

RBPS : Risk Based Process Safety.- Sistema de gestión de seguridad basado en riesgos

Tabla 4.29.- Cumplimiento RBPS en los proyectos de construcción de centrales eléctricas.

Capítulo 4.- Análisis de riesgos en la construcción de plantas de generación de energía

En general puede entenderse que la industria de construcción de centrales eléctricas viene incorporando en su sistema de gestión un sistema basado en riesgos incorporado en las etapas del ciclo de vida del proyecto. Sin embargo, si se consideran además de los pilares básicos anteriores, los estudios y análisis de riesgos que se realizan en cada etapa del proyecto y se comparan con los que se vienen realizando históricamente en otros sectores industriales, el resultado ya no es tan claro y determinante. En la Tabla 4.30 se comparan dichos estudios entre sectores diferentes.

Estudios Analisis de Riesgos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de construcción de una central de generación electrica frente a la industria Petroquimica o de refino

Categoría Estudios de Riesgo	Industria	Fase del ciclo de vida del proyecto					
		Etapa de viabilidad		Etapa de Ingeniería		Construcción	Comisionado y Arranque de planta
		Estudios previos		Ingeniería Básica	Ingeniería Detalle		
		FEL-1 (Ident. Oportunidad)	FEL-2 (Fase Conceptual)	FEL-3 (FEED)			
Plan HSE para el Proyecto	En todas las Industrias del comparativo	Se actualizan continuamente a lo largo del ciclo de vida del proyecto					
Registro de Riesgos							
Lista de seguimiento de acciones							
Identificación de Peligros	Generación Eléctrica	HAZID conceptual		HAZID Detallado	HAZOP	RA/MS JSA	JSA Check list
	Refino / Petroquímica / O&G *	HAZID preliminar	HAZID	Prelim HAZOP /What If /CheckList	HAZOP Final / What If /CheckList Actualiz Estudios Seguridad	JSA ORR*	Change mangmt temporarily piping JSA ORR*
Evaluación de consecuencias	Generación Eléctrica						
	Refino/Petroquímica/O&G		FSS/FEA preliminar FHA preliminar	FSS/FEA FHA SGIA / SIP	FSS/FEA ** FHA ** SGIA / SIP**		
Evaluación de la Seguridad	Generación Eléctrica			DHM preliminar HAC preliminar EER	DHM HAC RAM (ocasional) EER	Auditorias e Inspecciones	SIMOPS (ocasional)
	Refino/Petroquímica/O&G	ISD preliminar	rev ISD preliminar DHM preliminar DB/PR/Flare preliminar SVA preliminar	ISD DHM HFA DB/PR/Flare RAM HAC preliminar SCE EER SVA SIMOPS preliminar Diseño "Casos de Seguridad" (Case for Safety) preliminar	ISD ** DHM ** HFA** DB/PR/Flare** RAM** HAC** SCE** EER** SVA** SIMOPS Diseño "Casos de Seguridad" (Case for Safety)	SIMOPS** Auditorias e inspecciones "Casos de Seguridad" (Case for Safety) Operacionales	SIMOPS** Audits
Analisis de Riesgos	Generación Eléctrica	QRA preliminar			QRA	HRA	
	Refino/Petroquímica/O&G	CRA	CRA revisado	QRA preliminar HRA	QRA	HRA	
Mitigación de riesgos	Generación Eléctrica				HAZOP/SIL (LOPA)	Emergency Response Plan	
	Refino/Petroquímica/O&G		F&G preliminar ESD preliminar Fire Protection preliminar Emerg Response preliminar	LOPA SIS/SIL F&G ESD Fire Protection Emerg Response	LOPA** SIS/SIL** F&G ** ESD** Fire Protection** Emerg Respons **	Emergency Response **	
Revisiones de etapas de proyecto	Generación Eléctrica				Revisiones de Diseño	Revisión Construcción	PSSRs (muy ocasionalmente)
	Refino/Petroquímica/O&G	Revision diseño conceptual	Revisión según selección	Revisión definición técnica	Revisiones de Diseño	Revisión de Construcción	PreStartup Safety Review (PSSR)

* Tomado de CCPS GUIDELINES FOR INTEGRATING PROCESS SAFETY INTO ENGINEERING PROJECTS

** Revisar según necesidades y avance de proyecto

Leyenda:

CRA: Concept Risk Analysis	HAC: Hazardous Area Classification	RAM: Reliability, Availability and Maintainab
DHM: Design Hazard Management	HAZID: HAZards Identification study	RA/MS (RAMS): Risk Analysis/Method Staten
EER: Evacuation, Escape and Rescue study	HAZOP: HAZard and Operability study	SGIA: Smoke and Gas Ingress Analysis
ESD: Emergency Shut Down	HFA: Human Factors Analysis	SCE: Safety Critical Equipment/Element
FEL: Front End Loading	HRA: Hazards and Risk Analysis	SIP : Shelter In Place
FSS: Facility Siting Study	ISD: Inherently Safer Design	SVA: Security Vulnerability Analysis
FHA: Fire Hazard Analysis	JSA: Job Safety Analysis	ORR: Operational Readiness Review (Revisió
F&G: Fire and Gas	QRA: Quantitative Risk Analysis	

Tabla 4.30.- Comparativa Análisis de Riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. A partir de Apéndice A de [44], elaboración propia.

En la Tabla 4.30 se han marcado en otro color algunos estudios que se realizan sistemáticamente en el sector de refino/petroquímico/Gas y que por el momento no se vienen realizando en el sector eléctrico.

Se pueden extraer varias conclusiones, algunas de ellas muy representativas del estado del sector en la seguridad del proceso:

1. La respuesta y adecuación de estándares de uso común en industrias de referencia en el sector de la seguridad de procesos en el caso de los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica se puede considerar una respuesta “reactiva”. El sector va incorporando de manera lenta y no siempre adecuada las mejoras y avances que en este campo lideran otros sectores industriales.
2. La incorporación de las prácticas de diseño inherentemente seguro debería ser consideradas para su implementación en etapas tempranas del proyecto. Aunque el diseño de áreas de la planta tiene en consideración la selección de diseños inherentemente más seguros, no se encuentra implementado como diseño prioritario y mandatorio, de modo que no se realizan justificaciones y estudios específicos para este fin. Debería incorporarse en la documentación la inclusión de un estudio específico que tratará estos asuntos muy relevantes para la seguridad de los procesos. Sería conveniente justificar como se han considerado las alternativas para realizar un diseño inherentemente seguro y reportarlo mediante la elaboración de los correspondientes reportes de cálculo. Para ello se podrían incorporar documentos adicionales a los habituales que justifiquen lo anterior, obviamente dentro de los límites del contrato. No se puede pretender sustituir los combustibles previstos por otros, pero por ejemplo, se podría proponer un tratamiento diferente de los productos de la combustión si existen métodos alternativos más seguros aunque la inversión sea más costosa y no limitar los estudios al alcance estrictamente contractual.

Incorporar un método riguroso para establecer un protocolo de diseño que garantice la incorporación de las prácticas de diseño seguro como el que se puede deducir de la propuesta realizada por Rayner Brown et al., en [209].

3. Por el momento no se realiza ningún estudio relacionado con los factores humanos en los proyectos de construcción de plantas de generación eléctrica. Sería muy conveniente implantar el análisis de factores humanos para revisar los riesgos y problemas relacionados con los factores humanos, respecto de la ergonomía física, el potencial del error humano y problemas tales como la priorización de alarmas, etiquetado, señalización, ruido e iluminación. Se abordarían problemas relacionados con la operación de equipos clave, como son válvulas de aislamiento, acceso a las mismas, eliminación de zonas de riesgo en planta, orientación, LOTO. Algunas de estas consideraciones si son tomadas en cuenta en el diseño de las instalaciones, sin embargo no se encuentra tratado como un estudio global, que a su vez incorpore otras consideraciones como pueden ser:
 - a) Interfases del operador con el sistema de control, tales como pantallas de operación, consideraciones para evitar la avalancha de alarmas y otros aspectos de la interfase hombre-maquina.
 - b) Marcado / etiquetado de equipos y tuberías

- c) Rutas de salida y de evacuación de emergencia, eludir zonas de peligro mediante señalización adecuada
- d) Sistema de comunicación adecuado. Calidad en las comunicaciones, sobre todo en áreas de mucho ruido. Específicamente señales de alarma.
- e) Tiempo de respuesta de emergencia. Cálculo de tiempos requeridos por el operador para la realización de determinadas tareas críticas que pueden resultar determinantes en la prevención de accidentes.

Muchas de estas consideraciones se atienden en el diseño, o al menos, en partes del diseño, pero no se encuentra establecido la elaboración de un estudio específico de factores humanos, el cual sería muy bien recibido por los interesados en la construcción de este tipo de plantas. Para ello sería también necesario incorporar la figura del Coordinador de ingeniería de factores humanos como parte del equipo de HSE del proyecto, el cual entre otros cometidos tendría la elaboración del Plan de ingeniería de factores humanos o HFE plan.

- 4. Deberían incorporarse como prácticas estándar la elaboración de estudios específicos SIS/SIL y ESD. Esto simplificará y aclarará la puesta en práctica y cumplimiento de estándares IEC relacionados con estos estudios, los cuales por el momento no son realizados con la suficiente solvencia que se requiere por los clientes y promotores, los cuales por otra parte, tampoco disponen del necesario conocimiento para cumplir con dichos estándares y normas.
- 5. Esta poco extendida la participación del equipo de construcción en las etapas de ingeniería. Desde el punto de vista de la seguridad sería muy conveniente que los especialistas que dirigen las actividades de construcción en el sitio participen de algún modo en alguna fase de diseño aportando su punto de vista, el cual es muy diferente al que tiene la ingeniería en oficina. Existen diversas formas de participación y algunos contratistas y tecnológicos piden en determinados momentos su asistencia. Hay algunas formas de realizar esto, bien mediante la participación del equipo de construcción en los estudios HAZOP en alguna sesión dedicada a ello o realizando un estudio HAZOP específico para construcción, se ha venido en llamar HAZCON y se enfoca a la realización de un estudio HAZOP pero en lugar de realizarlo para la operabilidad, este estudio está específicamente centrado en la Construcción.
- 6. El Estudio de Operabilidad y Riesgos de Control (CHAZOP) es un procedimiento para llevar a cabo el análisis de seguridad y confiabilidad de los sistemas de Control de la planta. La incorporación de este tipo de estudios contribuiría a la mejora de la seguridad de los procesos y por tanto a la confiabilidad de la instalación. Los estudios CHAZOP se pueden realizar de varias maneras y con distintos objetivos en función de los resultados esperados. Se puede realizar un análisis de operabilidad de los sistemas de control exclusivamente para completar los estudios de análisis de riesgos para los sistemas de proceso o se puede enfocar el estudio en la confiabilidad de los sistemas de control implicados en la producción de la planta. El elevado grado de automatización de las centrales eléctricas ha sido históricamente una característica tecnológica determinante de su base productiva, entre otras razones por la compleja interacción entre los diferentes equipos y componentes de la instalación y la

necesidad de consumir la energía eléctrica producida de manera instantánea en la red. Participar y liderar los avances en materia de seguridad de los sistemas de control que gobiernan los procesos productivos del sector debería ser atendido con la máxima naturalidad por los implicados, sin embargo por el momento no se incorporan estas prácticas entre los estándares de aplicación en los proyectos, lo que resulta del todo incomprensible.

Adicionalmente a lo anterior, en términos generales se ha comprobado la ausencia de estudios de análisis de riesgos de proceso para los sistemas temporales. Se ha podido constatar que para estos sistemas no se realiza un HAZOP como el que se viene realizando para el resto de los sistemas mecánicos y de proceso, o para los sistemas paquete y equipos mecánicos que conforman la central, tales como Turbinas de Gas, de Vapor o Calderas en cualquiera de sus configuraciones.

Se ha podido comprobar también, que para los sistemas temporales, los cuales se encuentran en la frontera de sistemas que se implementan en la última etapa de la construcción y en las primeras fases de las etapas de la puesta en marcha de la planta (precomisionado y comisionado), se vienen tratando con consideraciones similares a las que se le dan a las tareas y trabajos de la etapa de construcción. Por supuesto al proporcionar la exposición de métodos o un JSA, no se le da un tratamiento menos seguro que a otras actividades propias de la construcción, sin embargo no todos los peligros pueden ser correctamente identificados si no se realizan análisis como los que se vienen realizando para otros peligros de proceso. Las condiciones diferentes de presión, caudal y temperatura que manejan estos sistemas, deberían tener una consideración similar a la que se dan en el resto de los sistemas de proceso de la planta.

Adicionalmente, la práctica usual de subcontratación externa de los mencionados sistemas temporales favorece la falta de dedicación de los especialistas de seguridad involucrados en los análisis de riesgos de proceso que si participan en los estudios del resto del proyecto.

En la segunda parte de esta tesis se estudian con detalle los sistemas temporales que habitualmente se desarrollan en centrales de generación eléctrica, también se dará una visión de cómo se realizan los estudios de seguridad. Asimismo, en los siguientes capítulos se propondrá un método alternativo al estudio HAZOP para este tipo de sistemas, que es más rápido y flexible y puede anticipar el estado real de la instalación inmediatamente antes de su ejecución, lo que favorecerá la seguridad de las operaciones.

**PARTE II.-PROPUESTA
METODOLOGICA PARA EL ANALISIS
DE RIESGOS EN LOS SISTEMAS
TEMPORALES DE LA ETAPA FINAL DE
LA CONSTRUCCIÓN Y EN EL
COMISIONADO**

Capítulo 5.

Los sistemas temporales en la etapa de construcción y puesta en servicio de una planta de generación de energía

5.1 Sistemas temporales

Como su nombre indica un sistema temporal, es aquel que se desarrolla para cumplir una determinada función durante una etapa concreta de la fase de construcción, entendiendo como tal la consideración más amplia del término. Así durante la finalización de determinadas actividades de construcción es requerido el uso de algunos equipos, componentes o sistemas soporte que permitan realizar las actividades mediante la utilización de elementos temporales que una vez sean utilizados deberán ser retirados de las instalaciones definitivas. El concepto de “*material no permanente*” utilizado en la configuración del sistema puede ayudar a definir el alcance y límites de los sistemas aquí considerados. No se pretende abordar sistemas temporales típicos empleados en la construcción, como pueden ser puntales, cimbras o tablestacas, entre otros.

La definición de sistema temporal varía en función de la tipología de la planta y de los servicios que puedan ser proporcionados por el propietario o por alguno de los interesados del proyecto, pero en términos generales, los sistemas temporales son habitualmente utilizados en las etapas iniciales de la puesta en marcha de la instalación, coincidiendo con la finalización de la construcción y del montaje tanto de los equipos, como de las tuberías de interconexión. Así, entre los sistemas que pueden tener la consideración de sistemas temporales, se encuentran, sin ser limitativa la lista, los siguientes:

- Sistemas mecánicos y de proceso:
 - Lavados químicos
 - Limpiezas con aire, agua o con otros productos
 - Soplado de tuberías con vapor
 - Tuberías e instalaciones temporales de combustibles líquidos o gaseosos
 - Inertización de tuberías y equipos.
- Sistemas eléctricos:
 - Sistemas de alimentación temporal mediante generadores Diesel
 - Interconexiones temporales
 - Alimentaciones eléctricas a equipos durante etapas previas al arranque desde equipos eléctricos provisionales
 - Alimentaciones de tensión ininterrumpida y segura temporales
 - Sistemas eléctricos en operación sin los ajustes de protección definitivos y por tanto con ajustes temporales que pueden ocasionar riesgos y peligros que en condiciones definitivas no se encuentran presentes.
- Sistemas de instrumentación y control:
 - Sistemas de protección con ajustes preliminares al no disponer del comportamiento final de la planta.
 - Lógicas de control temporales que se incorporan para la realización de ciertas pruebas.
 - Alarmas no operativas o con valores de ajuste preliminares, por no encontrarse finalizada la construcción completamente.

- Señales sin conectar o lazos incompletos lo que obliga a incorporar modificaciones en la lógica de control hasta que la construcción se encuentre finalizada.

Respecto de que sistemas de los que conforman una central deben ser considerados temporales y por tanto serían de aplicación las consideraciones que en este y en los próximos capítulos serán desarrollados, es recomendable que se estudie caso a caso por el Comité de Seguridad que debería ser constituido para evaluación de riesgos en la etapa de puesta en servicio de la central. Como se verá más adelante, la constitución de un comité de seguridad que asista a los especialistas en la etapa de puesta en marcha es una práctica recomendable para la prevención de riesgos durante una de las etapas más peligrosas del ciclo de vida del proyecto, extendiéndolo a la vida útil de la central. equipo de especialistas que llevará a cabo las actividades de pruebas y puesta en servicio de la instalación, aunque ciertamente algunos de los sistemas mencionados antes, están comúnmente aceptados tanto por los profesionales como por los investigadores del sector.

Recientemente P. Sakar [210], ha publicado un compendio detallado de las actividades preoperacionales que se requieren en la fase de pruebas de una central térmica. Lo definido por Sakar como actividades preoperacionales, coincide perfectamente con actividades previas a la puesta en servicio de la planta que en la mayor parte de los casos requieren de la instalación de equipos, componentes y dispositivos temporales o no-permanentes, que configuran de un modo u otro un sistema temporal como los aquí definidos.

En el capítulo 3 se han descrito las fases que conforman el ciclo de vida del proyecto y las actividades principales que habitualmente se encuentran incluidas en el alcance del contratista del proyecto, teniendo en cuenta la modalidad de ejecución elegida por el promotor o propietario de la instalación.

En la Figura 4.16 del capítulo 4, en la fase de precomisionado se mencionaron las actividades correspondientes a las limpiezas de tuberías (flushing), del tren de agua de alimentación (etapa F), la limpieza química del generador de vapor (etapa G) y el soplado con vapor de las tuberías de alimentación a la Turbina desde el HRSG, como etapas básicas que toda central debe acometer antes de su puesta en servicio propiamente dicha. Estas fases son las habituales desde la finalización de la construcción, hasta el inicio de las pruebas de la planta. Las pruebas a su vez se considera que serán realizadas en diferentes etapas. Habrá una etapa de pruebas en frío (comisionado) y otra de pruebas en caliente (puesta en servicio), hasta la realización de las pruebas de prestaciones para la entrega de la instalación al propietario. En la etapa de precomisionado es donde se pueden encuadrar la mayor parte de las instalaciones temporales.

A continuación se incluye una lista de instalaciones temporales típicas que han sido identificadas para un ciclo combinado de reciente construcción:

Lista de temporalidades de carácter general:

- Andamios para sustitución de accesos permanentes durante la construcción, que pueden estar operativos en el inicio del comisionado.
- Pasarelas temporales sobre zanjas abiertas o tuberías.

- Andamios para la fase de puesta en servicio, incluyendo el precomisionado y comisionado.
- Soportes provisionales de tuberías (durante el montaje y en su finalización e inicio del precomisionado).
- Protección mecánica de las tuberías de combustible líquido (sobre todo en la finalización del montaje).
- En ocasiones se consideran también provisionalidades o temporalidades necesarias para la realización de las pruebas hidráulicas de tuberías y equipos montados en obra.
- Viales temporales para tránsito pesado protegiendo enterrados.
- Alimentación eléctrica para labores de construcción y montaje que en ocasiones se utiliza como fuente de energía auxiliar para máquinas y herramientas durante el precomisionado.
- Alimentaciones de baja tensión provisionales para puentes grúa.

Sistemas mecánicos y de proceso:

- Limpieza química. Entre los sistemas mecánicos que suelen ser incluidos están:
 - Sistemas de combustible líquido (gasoil).
 - Sistemas de agua de alimentación a caldera y distribución a servicios diversos como atemperaciones de vapor.
 - Sistemas de vapor, los cuales antes del soplado con vapor pueden recibir una limpieza química. Aquí se encuentran sistemas de vapor de alta presión, recalentado caliente y frío o los sistemas de baja presión.
 - Sistemas de HRSG.
 - Sistemas de vapor auxiliar.
 - Sistemas de condensado y refrigeración de componentes.
 - Sistemas de drenajes atmosféricos, que en ocasiones también son tratados con este procedimiento.
- Llenado de tanques de agua mediante sistemas de tuberías temporales con agua de calidad antes de la puesta en servicio de la planta de tratamiento.
- Instalación de planta de tratamiento de agua portátil con las temporalidades necesarias (agua bruta, tratada, energía eléctrica y aire comprimido entre otras).
- Disposición de efluentes a foso de drenajes para recogida por gestor autorizado.
- Limpieza de tuberías mediante recirculación e instalación de filtros temporales con recogida y evacuación de efluentes mediante temporalidades.
- Primer llenado de fluidos diversos en equipos mecánicos y eléctricos. Ejemplos típicos son los llenados de H₂ del generador eléctrico, aceite de refrigeración en transformadores elevadores de tensión de salida de la central, transformadores eléctricos o circuitos de aceite en Turbinas de Gas o Vapor. También es habitual el llenado de aceite de fluido hidráulico para accionamientos en circuitos hidráulicos de control, como pueden ser las válvulas de control de admisión de vapor a turbina para regulación de carga del turbogruppo.
- Limpieza de circuitos de aceite o de fluido hidráulico antes del llenado para su operación normal. Entre estos cabe citar como más habituales, los siguientes:

- Sistema hidráulico de la chimenea de bypass
- Sistema de aceite de refrigeración en Turbinas de Gas y de Vapor.
- Sistemas de fluido hidráulico de válvulas de control de servicio severo.
- Sistemas de refrigeración de equipos de alta presión como bombas de agua de alimentación a caldera.
- Sistemas de aceite de Compresores de gas.
- Purgado de las líneas de gas de alimentación a la planta y puesta en servicio de la estación de regulación y medida previamente al encendido de las Turbinas de Gas o quemadores de caldera.
- Temporalidades de los sistemas de protección contra incendios que en ocasiones se deben instalar hasta la finalización del montaje completo de todos las infraestructuras y edificios, técnicos y no técnicos.
- Suministro de aire mediante generadores locales para pruebas de componentes y equipos menores.
- Aire comprimido para instrumentación y servicios diversos de carácter temporal hasta la finalización del montaje de todos los consumidores.
- Pruebas hidráulicas de tuberías y equipos mecánicos.

Sistemas eléctricos

- Prueba de aislamiento (Hipot test) para cables y equipos eléctricos. Requiere en general de maquinaria y herramientas especiales para la realización de la prueba con instalaciones temporales para la generación de los valores de tensión y corriente de la prueba.
- Presurización de las barras de fase aislada mediante equipos temporales de aire comprimido en caso de que durante la energización de los sistemas eléctricos en back feed, el equipo definitivo no se encuentre operativo.
- Sistemas de alimentación temporal para servicios esenciales durante las pruebas. Se pueden encontrar, entre otros los siguientes
 - Sistemas de iluminación exterior para garantizar la seguridad durante las pruebas.
 - Sistemas de protección contra incendios.
 - Sistemas de ventilación y aire acondicionado.
 - Sistemas de refrigeración auxiliar de emergencia.
- Sistemas de baja tensión para los circuitos de control y protección de los sistemas eléctricos. Entre los que se pueden encontrar los siguientes:
 - Subestación eléctrica.
 - Circuitos de control de transformadores elevadores de voltaje de planta (generadores de Turbinas de Gas y Turbinas de Vapor).
 - Transformadores Auxiliares.
 - Sistemas de distribución de tensión segura y alterna regulada, entre otros.
- Sistemas temporales de alimentaciones en media tensión, en aquellos casos en los que se requiera. Situación muy especial y en pocas ocasiones necesaria.

- Sistemas de llenado de aceite de refrigeración para transformadores de tensión.

Sistemas de Instrumentación y Control.

- Instalación de equipamiento auxiliar de los sistemas de control para ampliar los puestos de pruebas, tales como estaciones de operación, servidores o estaciones de ingeniería adicionales con la infraestructura adicional necesaria.
- Instalación de redes de fibra óptica temporal para incorporar dispositivos adicionales durante las pruebas.
- Lógicas de control temporales que se incorporan para la realización de ciertas pruebas. Por ejemplo ajustes temporales en el control de calderines durante los sistemas de soplado.
- Alarmas no operativas o con valores de ajuste preliminares, por no encontrarse finalizada la construcción completamente. Inhibición de alarmas a valores que no perturben la atención de los operadores durante las pruebas.
- Señales sin conectar o lazos incompletos lo que obliga a incorporar modificaciones en la lógica de control hasta que la construcción se encuentre finalizada.
- Listado de protecciones que se pueden inhibir en determinadas condiciones de arranques del sistema y en qué condiciones. Asimismo, es preciso identificar que protecciones no pueden ser inhibidas o saltadas en ningún caso.
- Es necesario en ocasiones disponer de un registro de los sistemas de control que están funcionando con capacidades limitadas o no en su estado final, por ejemplo, falta de redundancias en alimentaciones eléctricas, comunicaciones, PLCs en local por falta de conexión al sistema de control principal, DCS, entre otras.

Con objeto de disponer de una visión algo más detallada de algunos de los sistemas típicos más habituales que se emplean sobre los que se aplicará el método de análisis de riesgos en esta tesis, los cuales se discutirán en el capítulo 7, se describen a continuación los que pueden ser considerados más habituales y que están comúnmente aceptados como necesarios previamente a la puesta en marcha.

5.1.1 Sistema de limpieza química

En [211], se puede encontrar una breve reseña histórica de la evolución de la limpieza química de los generadores de vapor desde el siglo pasado y las expectativas de estos métodos en este.

Durante el montaje de los generadores de vapor y durante la instalación de las tuberías, en las paredes internas y en las superficies de intercambio, se depositan en su interior restos de materiales de montaje y depósitos los cuales deben ser eliminados para mejorar la transferencia de calor y eliminar la posibilidad de fallo de los equipos. La selección del método de limpieza dependerá de diversos factores, entre los que se encuentran el tipo de caldera, sus condiciones normales de operación, la cantidad y características de los depósitos existentes, el uso de disolventes compatibles con los materiales de la caldera, así como la disponibilidad de agua desmineralizada, entre otros. De lo que no hay dudas, es que previamente a las operaciones de puesta en marcha de la central, es necesario realizar un tratamiento químico a las partes internas de la caldera y de los

sistemas de agua que alimentan a la misma. En los últimos años, además, se ha generalizado el tratamiento químico de los sistemas de precaldera e, incluso de los sistemas de vapor, ya que los resultados en términos de vida útil y facilidad de los tratamientos químicos del agua de calderas lo benefician notablemente. La eliminación de restos de cascarilla, restos de soldadura y otros componentes nocivos favorecen la eliminación de la corrosión en el interior de las tuberías de los sistemas de caldera y de precaldera. Se está utilizando el término precaldera, en el sentido que lo utiliza Sarkar en [210] y es utilizado por muchos otros autores, donde se incluyen los sistemas de agua de alimentación, condensado y los calentadores de alta y baja presión en las plantas que disponen de ellos. Es habitual también que en los sistemas de alimentación de combustible líquido a la caldera se lleven a cabo también operaciones de limpieza química para evitar la introducción de estos depósitos en los sistemas de quemadores, los cuales tendrían un efecto muy nocivo.

Además de cascarilla y restos de material de soldadura adheridos a las paredes de las tuberías, es habitual encontrar restos de arena y suciedad que pueden provocar la formación de sílice y calcio en el agua de caldera que se traducirá en contaminantes del vapor de alimentación a la turbina, lo cual debe ser evitado desde el inicio de las operaciones de comisionado. Para la eliminación de cascarilla y restos de materiales de soldadura se necesita realizar una limpieza química, mientras que para la arena y los restos de suciedad con un simple lavado con agua desmineralizada pueden ser eliminados.

Existen otros contaminantes como aceites y grasas, los cuales también aparecen como subproductos de la fabricación y montaje de los sistemas de caldera y precaldera. Para eliminar estos productos se puede recurrir a un lavado mediante una solución alcalina, la cual resulta efectiva para su eliminación.

Todas las consideraciones que se realicen en términos de selección del taller de prefabricación de tuberías en campo, o montaje en taller afecta al estado de limpieza de las tuberías y por tanto al coste y tiempo necesario para realizar la limpieza química en planta y su grado de complejidad. Además hay que tener en consideración el tratamiento y disposición de los efluentes de la limpieza química ya que deben ser tratados separadamente por gestores medioambientales debidamente autorizados para la recogida y tratamiento.

La norma VGB R513e [212], puede ser utilizada como referencia para la ejecución de la limpieza química de los generadores de vapor

En [213] se establecen algunos criterios para la limpieza química de generadores de vapor en función de sus condiciones normales de operación. Así, si se mantiene un sistema de montaje “limpio” en obra, la mayoría de las calderas que trabajan por debajo de los 62 barg, con un lavado con agua de los sistemas de agua de alimentación y condensado, seguido de un lavado alcalino con vapor, puede ser suficiente antes del soplado de las tuberías de vapor. Si las condiciones de montaje no han sido todo lo limpias que sería deseable o el grado de suciedad es más alto, se necesitará además un lavado alcalino caliente de los sistemas de precaldera y un hervor alcalino de la propia caldera y economizador además del correspondiente soplado con vapor posterior de la propia caldera y líneas de vapor asociadas.

Las calderas que operan a más de 62 barg., necesitan una limpieza química más completa. Requieren además de lo indicado un lavado alcalino antes de los tratamientos ya mencionados para eliminar las grasas y arenas y un lavado ácido de los principales componentes y tuberías tanto de la caldera como de los sistemas precaldera. En ocasiones la limpieza ácida se retrasa a después de las primeras operaciones de la caldera. Incluso se realizan entre varias semanas hasta un año después de la operación inicial.

La limpieza química se encuentra en permanente evolución, los tecnólogos y suministradores de equipos de generación de vapor investigan técnicas más económicas y fiables que permitan utilizar por ejemplo soluciones neutras y a temperatura ambiente. Véase como ejemplo el trabajo de Mitsubishi en [214] o la patente [215] de reciente publicación. Hay no obstante abundante literatura donde se discuten los principales métodos de tratamiento químico para superficies industriales.

En términos generales, se pueden considerar las siguientes etapas [216] para realizar una limpieza química de la caldera y de sus sistemas asociados.:

- En primer lugar será necesario aislar los tramos a limpiar y llenar los circuitos con agua para realizar la prueba de fugas del circuito asegurando su estanqueidad, evitando de este modo fugas peligrosas durante la utilización de productos químicos en la propia limpieza.
- A continuación, es habitual realizar un lavado inicial con agua desmineralizada, arrastrando la máxima cantidad de impurezas y cascarilla acumulada en las paredes de tubería.
- El primer tratamiento químico es el desengrasado con un agente no iónico en una solución caústica que normalmente se mantiene a una temperatura templada. Esta etapa se designa como hervido alcalino
- Etapa de decapado. Lavado ácido con una solución de ácido cítrico u otros como clorhídrico, fluorhídrico, etc. [211], a una temperatura en torno a los 65-75 ° C. Durante esta etapa de lavado se verificarán parámetros tales como el Hierro disuelto, que es uno de los principales indicadores de la limpieza.
- Cuando el hierro se ha estabilizado en la etapa anterior se procede con la limpieza alcalina mediante la adición de un álcali que neutralice y homogenice la solución hasta un valor de pH adecuado.
- Cuando el pH se encuentre en valores comprendidos entre 7-7.5 se procederá con la etapa de pasivación, la cual es fundamental para minimizar la agresividad de la limpieza ácida de las paredes de las tuberías.
- La temperatura en los pasos anteriores se encontrará entre los 30-40°C. Se mantendrá esta solución en recirculación hasta que los parámetros se encuentren estables, principalmente el hierro disuelto.
- Finalmente se procederá con el vaciado y disposición de los efluentes a balsas para retirada por un gestor autorizado de residuos químicos y un enjuague y aclarado final.

Normalmente estos pasos conforman la limpieza química y puede ser realizada en etapas diferentes o en etapas combinadas mediante el denominado proceso de un solo paso o de un

llenado sencillo, designado por sus siglas en inglés como OPC (One Phase Cleaning), donde el desengrasado, decapado y pasivado se realiza con un solo llenado del sistema, con lo que se reduce la cantidad de residuo generado y la cantidad de agua necesaria para el proceso de limpieza [217].

En la Figura 5.1., se proporciona una ilustración del montaje de un sistema tradicional de limpieza química y a su lado una fotografía del montaje real para que se pueda observar cómo se realizan en la realidad las operaciones y maniobras sobre las instalaciones temporales.

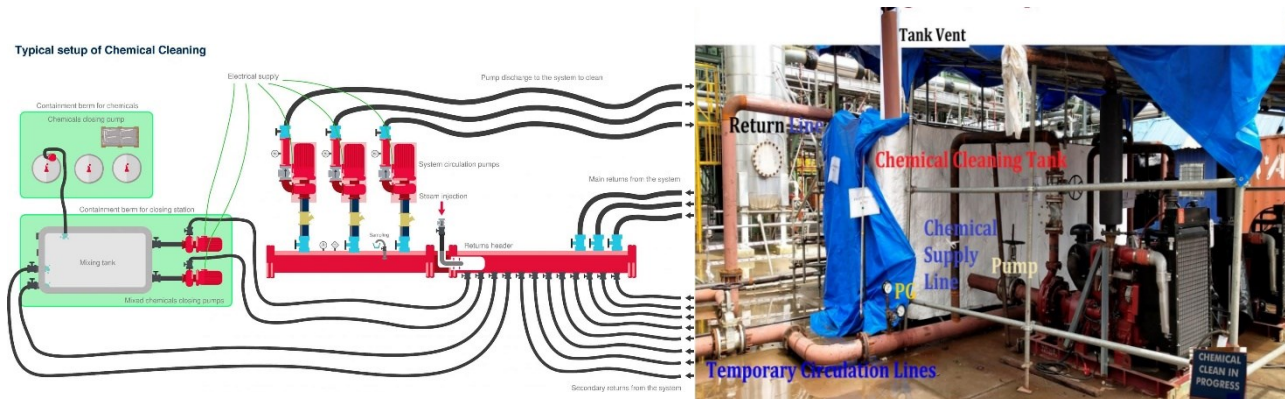


Figura 5.1.-Instalación del sistema de limpieza química de caldera y sistemas asociados [216], [217].

Se puede observar que existen instalaciones fijas, como puede ser el colector de descarga de las bombas, las propias bombas de recirculación de la solución o el tanque de mezcla y dosificación e instalaciones temporales, constituidas en la parte mecánica/proceso por mangueras de conexión entre la instalación de limpieza química y la instalación permanente de la central. Hay, asimismo, instalaciones temporales eléctricas tales como alimentaciones y elementos de mando, protección y maniobra eléctrica y de instrumentación y control los cuales también se consideran parte de las temporalidades habituales en este sistema. Desde los cuadros de mando y control se pueden realizar tareas como la supervisión de los consumos de bombas para comprobar su correcto funcionamiento, dispositivos de arranque y parada de los distintos componentes que conforman la instalación, y en ocasiones se puede verificar algunos parámetros del sistema, en función de la automatización que se realice sobre el mismo. Existen compañías especializadas en la realización de estos trabajos las cuales en ocasiones disponen de sistemas portátiles que se incorporan en bancadas prefabricadas (skids), o camiones el conjunto de la instalación.

Como se puede observar, las maniobras que se llevan a cabo en estas actividades manejan fluidos químicos que son peligrosos en sí mismos, a lo que hay que añadir las presiones y temperaturas que aunque no son muy elevadas incorporan numerosos peligros y riesgos. En [218], se relacionan algunos aspectos de seguridad de este sistema, que pueden resultar de interés para evitar accidentes inesperados. Sarkar en [210], incluye una lista de precauciones que se encuentra extendida en este tipo de sistemas. Entre las precauciones mencionadas se encuentran las siguientes:

- La solución alcalina es perjudicial para la salud. Cuando entra en contacto con el cuerpo, puede quemar la piel y los vapores alcalinos pueden provocar lesiones en los ojos.

- En el área que rodea el tanque de disolución de productos químicos, las bombas de circulación deben ser adecuadas para que cualquier derrame de productos químicos del sistema no dañe ningún equipo permanente.
- Durante el proceso de lavado con álcali, la suciedad y los desechos de varias partes del sistema se acumulan en el tanque de disolución de productos químicos y, a su vez, pueden infiltrarse y obstruir los filtros de succión de las bombas de circulación de productos químicos en funcionamiento. La obstrucción del filtro de succión se puede determinar observando una caída en la presión de descarga de la bomba. En caso de que ocurra un evento de este tipo, se pondrán en servicio las bombas de circulación de productos químicos de reserva; luego, la bomba en funcionamiento debe detenerse y su filtro de succión debe limpiarse y colocarse en su posición. Esta bomba actuará entonces como una bomba de reserva.
- Una medida de seguridad que debe ser considerada es la instalación de pulsadores de parada de emergencia en las proximidades del área de descarga para detener las bombas de circulación de productos químicos cuando sea necesario.
- La instalación eléctrica debe estar a una distancia segura de las bombas y se debe tener cuidado para asegurar la protección contra la lluvia.

5.1.2 Sistema de limpieza de tuberías de vapor

La experiencia ha demostrado la importancia de la limpieza de los sistemas de vapor y los sistemas de sellado de la turbina antes de sus operaciones y rodajes iniciales [219], ya que de lo contrario, los restos que quedan en el sistema se introducirían en la turbina y causarían daños graves a las piezas y componentes internos por los que circula el vapor en su expansión. Los filtros temporales instalados en las válvulas de admisión y en las válvulas combinadas de parada y control no pueden sustituir en modo alguno la limpieza de las tuberías con el grado de eficacia requerido.

Hay muchos métodos de limpieza de tuberías. Entre los más habituales se pueden citar la limpieza con agua, la limpieza con aire, con vapor, la limpieza química descrita en el apartado anterior, el enjuague o lavado con aceite, la limpieza con dispositivos que se introducen en la tubería como el hidrojete o. Rotomol [220], entre otros, Decidir el método de limpieza adecuado es una decisión importante para el equipo de proyecto ya que una decisión incorrecta puede implicar importantes afecciones al cronograma de las pruebas y por tanto, del proyecto. La decisión debe ser tomada en las etapas iniciales del proyecto en función de las características del montaje, de los equipos y de otras consideraciones como el fluido a manipular, el material de la tubería y las condiciones de la pared interna, así como, las condiciones en las que se ha desarrollado el montaje, si se ha realizado la prefabricación en obra o en taller, etc. Muchos fabricantes recomiendan realizar antes de proceder con el soplado de las tuberías, una limpieza química como la descrita antes, con objeto de eliminar las incrustaciones y otros materiales extraños, que de otro modo podrían pasar a la máquina. De este modo, se procedería a realizar una limpieza química y un soplado de los siguientes equipos y tuberías antes del inicio de las pruebas de la planta.

- Cada generador de vapor y sus líneas de vapor asociadas.

- Las líneas de vapor principales y el cabezal desde cada generador de vapor hasta la tubería de derivación (bypass) de la turbina, justo aguas arriba de la válvula de atemperación de dicho bypass de la turbina. Para evitar que la válvula de atemperación esté en la trayectoria del vapor durante el soplado, se deben instalar líneas de soplado temporales que se conectan a un punto justo aguas arriba de la válvula de atemperación del bypass de turbina.
- Las líneas principales de vapor y el cabezal a través de la (s) válvula (s) de aislamiento de la turbina.
- La/s tubería/s del sello de vapor. Algunos OEMs no recomiendan la limpieza acida de esta tubería de sellos.

El proceso que algunos OEM recomiendan en sus estándares [221] es, en primer lugar, proceder con la limpieza química para las tuberías del sistema de vapor consistente en un proceso de tres fases como las descritas antes. Un desengrasado alcalino, una limpieza acida para evitar la corrosión y la eliminación de cascarilla y, finalmente la pasivación de superficies metálicas activas. Es habitual también la ejecución OPC con un solo llenado del sistema.

Respecto al procedimiento de soplado de las tuberías de vapor, hay varios métodos probados disponibles para su limpieza, entre los que se pueden citar los dos principales, el soplado con vapor o el soplado con aire. Antes de la selección de un método de limpieza deben ser estudiadas las ventajas de cada método para seleccionar el que mejor se adapte a las circunstancias y necesidades particulares. En los contratos de ejecución para la construcción de centrales la responsabilidad de la selección del método y de la aceptación de los resultados de la limpieza habitualmente recaen en el suministrador de la turbina de vapor, ya que es el fluido que moverá su máquina y las condiciones de limpieza del mismo deben ser aceptadas de acuerdo con sus estándares y prácticas recomendadas. También es responsabilidad de esa parte decidir cuándo se ha completado la limpieza.

5.1.2.1 Sistema de soplado de tuberías de vapor con vapor

El soplado con vapor se realiza elevando la presión de la caldera hasta un determinado valor que será función del método de soplado elegido, de manera que se buscará producir un arrastre de las impurezas y depósitos que se encuentran adheridos a las paredes de la tuberías para producir su eliminación. Se busca proporcionar un choque térmico en el interior de las tuberías que se están limpiando para primero ablandar la cascarilla y restos metálicos adheridos en las paredes interiores de la tubería que posteriormente se elimina mediante su desprendimiento por la expansión del vapor. Serán los fabricantes de la turbina, del generador de vapor, del contratista principal que ha instalado los sistemas permanentes de tuberías y el operador final de la planta quienes de común acuerdo decidirán el método de limpieza, los criterios de evaluación de la limpieza y el grado de limpieza requerido para la operación de los equipos.

La operación de soplado de vapor se lleva a cabo sobre el sobrecalentador, el recalentador y las tuberías de vapor que interconectan la turbina con la caldera y de otros circuitos de vapor que se encuentren involucrados en la operación. Para llevar a cabo la operación de soplado de manera efectiva, se debe crear una fuerza de arrastre en la superficie interior de los tubos y tuberías de

interconexión mucho mayor que la que produce el vapor en su circulación por dichos tubos y tuberías en operación normal a su valor de máxima carga nominal continua. La relación entre el arrastre creado durante el soplado de vapor y el arrastre que se produce durante la carga nominal continua máxima se denomina CFR (Cleaning Force Ratio –CFR), o factor de perturbación k.

De acuerdo con VGB-R 513 [212], para conseguir la limpieza se deberá alcanzar un factor de perturbación $k \geq 1.2$. El factor de perturbación k se calcula de acuerdo con la ecuación (5.1):

$$CFR = \frac{m_b^2 v_b}{m_0^2 v_0} \quad (5.1)$$

Donde

CFR Relación de limpieza o factor de perturbación. - Factor k.

$m_b \equiv$ caudal másico durante el soplado

$v_b \equiv$ volumen específico durante el soplado

$m_0 \equiv$ caudal másico al 100% MCR de caldera

$v_b \equiv$ volumen específico al 100% MCR de caldera

Se tratará entonces de crear una fuerza de arrastre en la superficie de los tubos o tuberías mucho mayor que la que ocurre durante la carga nominal continua máxima de la turbina para obtener un valor de CFR o factor de perturbación k superior a 1.2. Esta aceptado por diversos fabricantes de calderas y especialistas en sistemas de soplado que el CFR puede estar comprendido entre 1,2 a 1,7 [210], [222], [223], [224] o [225].

Para alcanzar el factor K durante el soplado de vapor, existen dos métodos de soplado de vapor:

1. Soplado de vapor discontinuo (también designado como “de golpe o de choque”)
2. Soplado de vapor continuo

Cuando se utiliza el método de vapor discontinuo, la presión dentro del generador de vapor se eleva a un valor determinado de manera que al alcanzar la presión requerida, se abre rápidamente una válvula de sacrificio temporal. El valor de presión de operación de la caldera suele estar comprendido en torno al 50% de su operación normal y habitualmente por encima de la considerada en norma alta presión ($p > 62$ barg). Durante esta liberación de presión, se alcanza el factor K o la velocidad del vapor, pero por un período corto de tiempo. Debido a la liberación de vapor a la presión y temperatura de soplado, el generador de vapor tiene que ponerse en marcha de nuevo. La operación de soplado de vapor discontinua viene a durar entre cuatro a seis horas, incluido el encendido y apagado del generador de vapor. El número de operaciones de soplado de vapor diarias es reducido para asegurar una refrigeración adecuada del sistema.

Cuando se realiza el soplado de vapor por el método de soplado continuo no hay acumulación de presión en la caldera y el factor K se alcanza continuamente. La caldera, en este caso, operará sin pasar por la turbina y soplando el escape de vapor a la atmósfera. Los valores promedio de operación de soplado continuo oscilan entre 5 a 25 bar de presión de vapor y 380 a 510 ° C de

temperatura de vapor con un valor del 20 al 40% de carga de caldera. Las principales válvulas de aislamiento de vapor deben estar completamente abiertas durante esta operación.

Durante el soplado, la efectividad del proceso de limpieza por el soplado se realiza mediante la inserción de placas testigo, cuyas características vienen especificadas por norma. En el método de soplado discontinuo la inserción de cada placa se realiza inmediatamente antes de la apertura de la válvula temporal de soplado, mientras que en el soplado continuo, la placa testigo permanece insertada durante toda la operación de soplado. Las placas testigo recogen el número de impactos de partículas en un área determinada. Cuando el número de impactos es menor de un valor de referencia (su valor viene siendo determinado por los fabricantes de turbinas y generadores), el grado de limpieza de las tuberías se considera satisfactorio y el soplado se da por concluido.

El vapor que se libera durante las operaciones de soplado está en unas condiciones de presión y temperatura elevadas, lo que implica que al ser liberado a la atmosfera produce mucha formación de niebla y mucho ruido. Para reducir los niveles de ruido a valores aceptables, el vapor debe enfriarse. Hay dos tipos de métodos de reducción de ruido. Uno es el silenciador clásico o “knockout pot”, que funciona como una especie de ciclón; el aumento de la superficie enfriará el vapor. El segundo tipo de reducción de ruido consiste en inyectar agua pulverizada en el vapor (“quenching”). Normalmente la inyección de vapor se inyecta al final de la línea donde se instalan recipientes que recogen el condensado del vapor.

El soplado de vapor continuo tiene ciertas ventajas en comparación con el soplado de vapor discontinuo. La reducción de ruido es mayor en el soplado continuo. El factor K durante el soplado continuo se puede alcanzar durante un período más largo que con el soplado de vapor discontinuo, cuyo valor se alcanza durante un período menor. Además, la cantidad de agua desmineralizada requerida para el soplado de vapor continuo es mucho menor que con el soplado de vapor discontinuo. Finalmente, considerando la inyección de agua para reducir el ruido, esto se traduce en la reducción de la presión de trabajo del soplado en la tubería temporal, lo que significa que la tubería temporal puede ser más económica.

En la Tabla 5.1, se proporciona una comparativa entre los dos métodos de soplado.

	Proceso de soplado continuo a la atmósfera.	Proceso de soplado discontinuo o de choque
Reducción de ruido	Templado Sin pérdida de presión Tubería temporal PN16	Silenciador / Absorbedor de sonido Gran pérdida de carga Tubería temporal PN63 (máx.58 bar a 400 ° C) o PN100
Ámbito de aplicación / áreas de aplicación	Eliminación de cascarilla y partículas sueltas en las partes de vapor de la caldera. No se superan las pendientes de diseño de la caldera y las líneas de vapor. Todavía se puede utilizar en caso de restricciones de carga de la caldera.	Eliminación de cascarilla y partículas sueltas en las partes de vapor de la caldera. Se superan las pendientes de diseño de la caldera y las líneas de vapor. La planta / sistema siempre debe estar operativa.

<p>Procedimiento de expulsión de vapor</p>	<p>Funcionamiento de la caldera en modo de presión deslizante contra la atmósfera. La presión de vapor surge de la pérdida de presión del sistema de sobrecalentador y del sistema de tuberías de soplado de vapor temporal. Parámetros de funcionamiento: Presión de vapor entre aproximadamente 15 y 35 bar. La temperatura del golpe de vapor debe estar entre 480 y 525 ° C. Durante el soplado de vapor, la temperatura de enfriamiento debe estar entre 250 y 480 ° C. Carga de la caldera de aproximadamente 20% a 40%. El sobrecalentador de la caldera y las líneas de vapor están completamente abiertos durante toda la operación. La duración de la operación de purga es de aproximadamente 3 a 6 horas (capacidad de almacenamiento de agua desmineralizada). El soplado con vapor se puede terminar en un tiempo de 4 a 5 días.</p>	<p>Arranque de la caldera aproximadamente al 50% de la presión de funcionamiento (aproximadamente 68 bar). Acumulación de presión por estrangulamiento de la válvula de purga temporal (tiempo para abrir / cerrar <10 segundos). Son posibles de 2 a 5 acciones de soplado de vapor por día con el procedimiento de soplado de choque. Para cada paso de soplado, la combustión / calentamiento debe desactivarse, porque el nivel de agua en el tambor de vapor aumenta fuera del área visible. Ajustar el regulador de alimentación secundaria de tal manera que al final del impacto / aumento de presión el nivel del agua en el calderín esté dentro del rango visible. El número de operaciones de soplado depende de la tasa de limpieza durante el montaje. El tiempo de soplado de vapor es incalculable.</p>
<p>Ventajas y desventajas</p>	<p>Sistema amigable. Aumento gradual y uniforme de presión y temperatura. Utiliza menos agua desmineralizada en total. Posibilidad de mejorar el factor K de forma variable. El nivel de ruido se puede controlar mediante inyección de agua. Por medio de una presión de expulsión más baja y una temperatura de vapor sustancialmente reducida, es posible utilizar líneas de expulsión de vapor temporales con un espesor de pared más pequeño y aceros de más baja aleación. No se requieren válvulas de operación rápida. Gran diámetro para las líneas de soplado de vapor después de las inyecciones / pulverizaciones. Acumulación de vapor de escape (niebla) en el silenciador debido al enfriamiento por agua.</p>	<p>Sistema menos amigable debido a la rápida disminución de la presión y la temperatura. Utiliza más agua desmineralizada en total. Difícil de alcanzar / lograr el factor K. El nivel de ruido se puede controlar mediante silenciadores. Deben utilizarse líneas de soplado de vapor con paredes de mayor espesor y acero de alta aleación debido a la mayor presión y temperatura del vapor durante el soplado de vapor. Se necesitan válvulas de funcionamiento rápido y son caras. Diámetro constante de las líneas de soplado de vapor hasta el silenciador. Posibilidad de ahorrar agua de proceso, ya que no se requiere agua de enfriamiento.</p>

Tabla 5.1.- Comparativa soplado continuo soplado discontinuo con vapor.

En la Figura 5.2, se proporcionan algunas imágenes representativas de los dos métodos. En la imagen de la izquierda se observa la salida de vapor por el método discontinuo tras la apertura de la válvula de sacrificio temporal, una vez alcanzadas las condiciones de presión adecuadas para el soplado. La salida del vapor está dirigida a zonas abiertas de modo que la expulsión de restos con el vapor no cause daño alguno y el impacto acústico sea menor. En el centro se observa el sistema de inyección de agua para las operaciones de soplado continuo. En la imagen de la derecha se ve el vapor de salida de un sistema de soplado continuo que como puede observarse tiene una condición de humedad mayor que en el soplado discontinuo.



Figura 5.2.- Soplado continuo y soplado discontinuo [224] y [225]

5.1.2.2 Sistema de soplado de tuberías de vapor con aire comprimido

El sistema de soplado de tuberías de vapor con aire comprimido es similar al soplado con vapor pero utiliza aire en lugar del vapor que se produce en la caldera. En la Figura 5.3, se muestra el circuito de soplado con vapor de una caldera (izquierda) y el circuito equivalente utilizando compresores de aire que deben conectarse al calderín de la caldera.

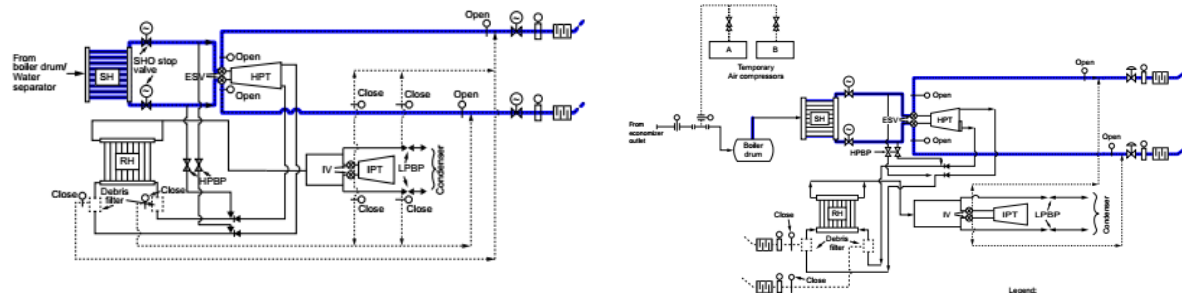


Figura 5.3.- Circuitos soplado con vapor y soplado con aire comprimido.

En las comparativas que se realizan por diversos autores, todos ellos recurren al estudio realizado por General Electric en el año 1990, GER-3636 A [226], donde se proporcionan los datos de diferentes compañías que a lo largo de los años realizan la limpieza de las tuberías de vapor utilizando aire comprimido. Se proporcionan los datos obtenidos por las compañías Allegheny Power (desde 1967, se pusieron en servicio 10 unidades supercríticas desde 576 a 668 MW), Detroit Edison que lo empleó en dos unidades de e 660 MW alimentadas con carbón y Basin Electric, que lo utilizó en dos unidades de 440 MW cada una. La conclusión del estudio es que para la misma presión inicial de caldera, la fuerza de limpieza con ambos métodos es aproximadamente la misma. Aunque los ciclos térmicos no están presentes, la experiencia ha demostrado que la limpieza con aire comprimido es tan eficaz como los golpes de vapor. Algunos prefieren la purga de aire comprimido porque permite una mayor flexibilidad en la programación de la construcción ya que no se requiere que la caldera y todos los sistemas auxiliares estén operativos para el soplado.

También se ha estudiado el uso de nitrógeno para el soplado en lugar de aire, sin embargo este último caso no se encuentra tan extendido como los soplados con vapor, en su modo continuo o discontinuo o el soplado con aire.

5.1.3 Limpieza del sistema de aceite de lubricación de turbina

Durante el funcionamiento normal de la turbina, la lubricación de cojinetes y partes móviles de la misma se realiza desde el circuito cerrado de aceite de lubricación. La circulación a través de los componentes se lleva a cabo desde la bomba de aceite principal, la cual está montada y accionada por el eje de la turbina. La bomba extrae aceite del tanque de aceite principal y lo descarga a alta presión en el sistema de aceite de lubricación (ver Figura 5.4 izda.).

La presión del aceite de lubricación se mantiene constante en el valor prefijado por la estación autorregulada de presión, el cual depende del diseño particular de la turbina y de sus cojinetes.

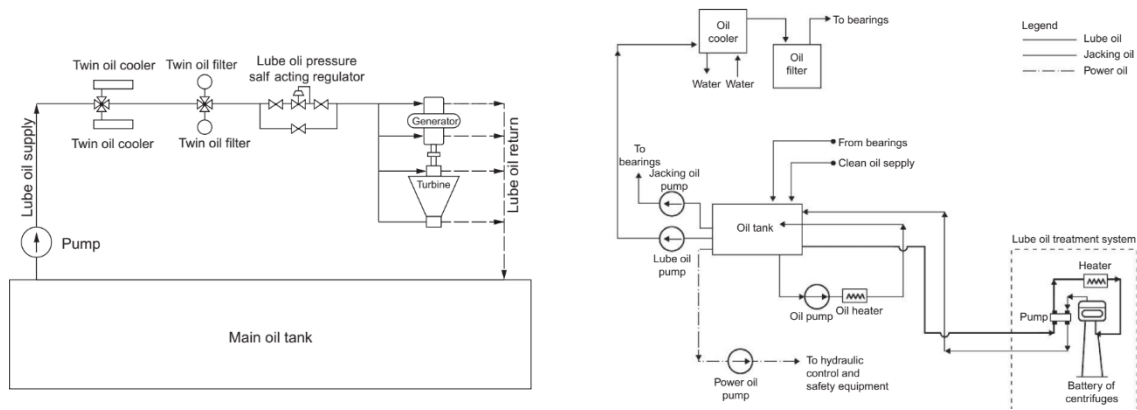


Figura 5.4 Configuración del sistema de aceite de lubricación de turbina [107]

Durante las operaciones de arranque y parada de la turbina, cuando el rotor y la bomba de aceite principal no alcanzan la velocidad nominal, se necesita una bomba de aceite auxiliar accionada por motor eléctrico la cual proporciona el aceite durante las maniobras mencionadas.

El tanque de aceite principal está equipado con extractores de vapor para mantener la atmósfera del tanque de aceite libre de vapores de aceite que se producen por las diferencias de temperatura en su interior. También dispone de filtros para detener las impurezas en suspensión. El aceite utilizado para el sistema de aceite de lubricación de los cojinetes se enfría en los enfriadores de aceite de la turbina para controlar la temperatura del aceite / metal del cojinete.

A partir de entonces, el aceite pasa a través del filtro de aceite para suministrar aceite libre de suciedad a los cojinetes. El aceite que ha pasado a través del filtro se envía a los cojinetes a través del cabezal de suministro de aceite de lubricación a través de un regulador reductor de presión de aceite. Desde los cojinetes, el aceite lubricante vuelve, por gravedad, a través del cabezal de retorno de aceite lubricante al tanque de aceite, donde tenderán a depositarse las impurezas pesadas que puedan haber sido recogidas por el aceite durante la circulación.

El sistema de aceite de lubricación, según el diseño del equipo, puede tener diferentes configuraciones. Es habitual que una parte del fluido se envíe para su uso por el sistema de control hidráulico que es utilizado como fluido de control en los actuadores y servomecanismos que gobiernan los sistemas de control y protección de la turbina, tales como válvulas de regulación y parada, sistemas de protección de sobre velocidad, entre otros. Asimismo es habitual que el sistema de elevación del eje de turbina también pueda ser accionado a través de circuitos independientes accionados por bombas que están integradas en el circuito de aceite de lubricación de turbina.

La Figura 5.4 dcha., muestra los diferentes circuitos y bombas que accionan el fluido de lubricación a través de los componentes del sistema integrado. También es usual el suministro de todos estos equipos montados en un conjunto fabricado, instalado y probado de fabrica en skids.

La Figura 5.5, muestra un skid de un suministrador de este tipo de equipos. Se ha proporcionado también el circuito hidráulico de los equipos que están incluidos en el skid.

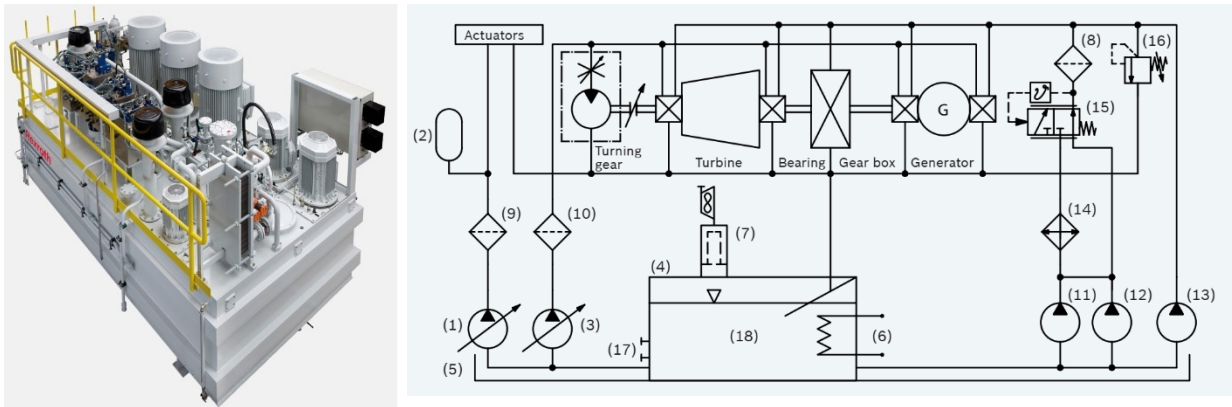


Figura 5.5.- Skid de aceite de lubricación, circuito de control y elevación [227]

Una de las principales causas de daños a las turbinas procede de la contaminación en los sistemas de aceite de lubricación. La contaminación por partículas puede ser de varios tipos, desde cordones de soldadura y escoria hasta recortes, virutas restos de metal y arenas o vidrio. Además de la contaminación por partículas puede existir agua en el aceite, la cual en concentraciones bajas, no tiene un efecto significativo, pero si se han reportado daños si se encuentra agua disuelta en estado libre. Durante el montaje de la tubería de aceite es inevitable su contaminación con suciedad, polvo y material particulado como el descrito, por lo que realizar las operaciones de lavado y limpieza de las tuberías es imprescindible y es una operación realizada en la fase final de la construcción y montaje de las turbinas justo al inicio del comisionado y precomisionado.

El proceso de lavado consiste en la circulación de aceite por el sistema de tuberías utilizando para ello las propias bombas de aceite de lubricación, de aceite hidráulico o de elevación según del circuito de aceite que se esté lavando. El uso del mismo tipo de aceite que se emplea para el lavado de las tuberías que el utilizado en operación normal de la máquina asegura la calidad final del circuito al disponer de las mismas características finales. De acuerdo con las instrucciones de los fabricantes de turbinas y teniendo en cuenta la configuración y efectividad del proceso, el sistema se suele dividir en uno o más circuitos según la configuración del diseño del sistema de lavado de aceite y según la recomendación del fabricante del equipo. La Figura 5.6, muestra un esquema de lavado de aceite de lubricación típico de una turbina-generador de vapor.

El proceso se realiza normalmente de manera secuencial. Se divide el sistema en circuitos independientes y se realiza el lavado completo de cada uno. Para cada circuito los pasos habituales son los siguientes:

- Llenado de carga de aceite al sistema
- Circulación de aceite en el sistema de acuerdo con el circuito establecido
- Limpieza y purificación del aceite de lavado durante la circulación
- Mantenimiento del tiempo de circulación hasta conseguir una limpieza adecuada.
- Llenado y circulación de aceite nuevo.

En la Figura 5.6, se pueden observar las líneas de bypass (en color rojo) de los componentes críticos de la máquina para evitar su contaminación en el proceso de lavado de las tuberías.

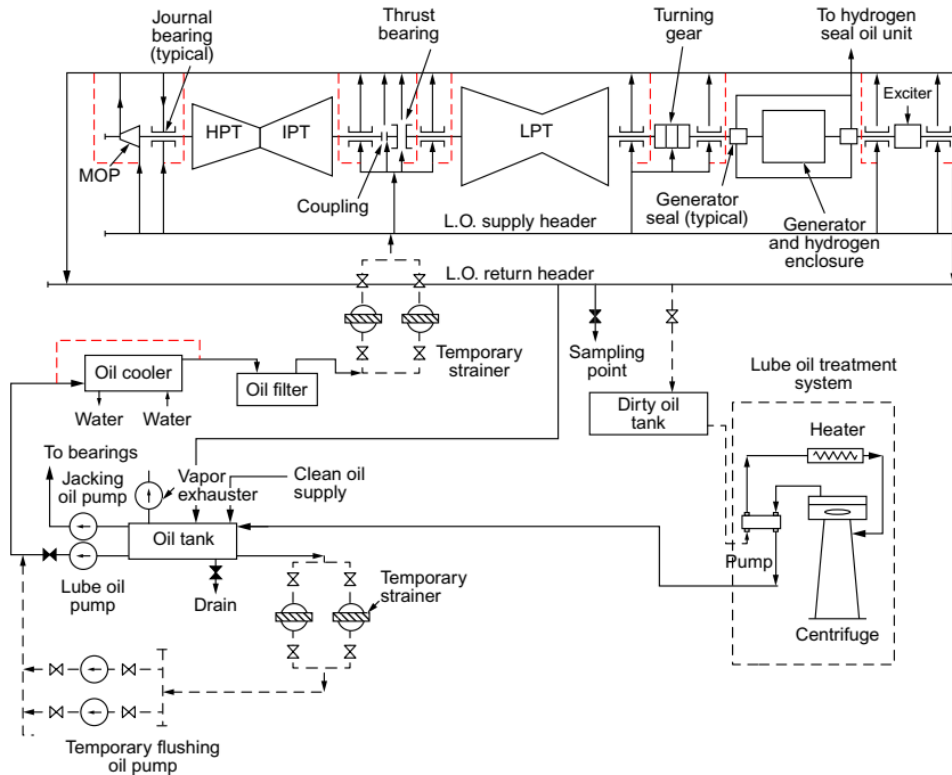


Figura 5.6.- Esquema de lavado del sistema de aceite de una turbina-generador típico [210]

El aceite circula por el circuito con la ayuda de la bomba de aceite de lubricación, aceite hidráulico o de elevación, según el caso o de los medios auxiliares externos si así se recomienda por el fabricante. El tiempo requerido de limpieza lo determina el criterio de aceptación del grado de limpieza obtenido. Normalmente el criterio de aceptación se fija por el fabricante del equipo en base a estándares recogidos en la normativa. Los más comunes quedan regulado en la norma ISO, la cual establece diferentes grados de calidad de los aceites en función de su uso y servicio.

Antes de comenzar con las operaciones debe encontrarse en servicio los extractores de vapor y los calentadores de aceite del tanque de aceite para aumentar su temperatura al valor especificado. Se mantendrá la circulación del aceite por el circuito establecido y las tuberías a través de las derivaciones para retornar de nuevo al tanque. La circulación será continua y se detendrá de vez en cuando para inspeccionar y limpiar los filtros temporales, los cuales acumularán los materiales extraños que se desprenden de las tuberías. El grado de suciedad de los filtros se detectará por un aumento de la presión diferencial a través de los mismos. En ocasiones, si el grado de suciedad es muy alto es posible que sea necesario retirar el aceite sucio a un tanque de almacenamiento y recargar el sistema con aceite para continuar con el proceso de lavado.

5.2 Factores Humanos

Conviene recuperar en este punto la mención que se hacía en el capítulo 2 que las intervenciones humanas inapropiadas son responsables en las tres cuartas partes de los casos de accidentes debidos a la alineación inadecuada de equipos en operaciones de mantenimiento y puesta en servicio de las instalaciones [11]. Operaciones tales como drenajes abiertos indebidos, el bloqueo

no realizado por error o los errores de programación son motivo de accidentes, muchos de ellos provocados precisamente por actuaciones en instalaciones temporales como las que se están tratando aquí.

Ya se ha apuntado en las conclusiones del capítulo anterior, que la falta de estudios relacionados con el análisis de riesgos en los proyectos de construcción de centrales eléctricas y la falta de estructuración de planes de ingeniería de recursos humanos favorece, o mejor no contribuye a mejorar la seguridad de las instalaciones de generación eléctrica durante su construcción y puesta en servicio. Recientemente algunos clientes están requiriendo que se desarrollen actividades relativas al factor humano desde etapas tempranas de los proyectos como parte del alcance del contratista. Lo habitual en otros sectores que se encuentran más avanzados en estos temas es que las bases de diseño de HFE forman parte de las especificaciones básicas de diseño del proyecto y son proporcionadas por el promotor o explotador de la instalación.

Para la coordinación de las actividades de HFE en el proyecto, la figura del coordinador de HFE resulta clave. El coordinador de HFE, en otros sectores industriales, es el encargado de coordinar las siguientes actividades, entre otras:

- Desarrollar y actualizar un Human Factor Engineering Plan. Preferentemente en base al documento base del cliente o en su defecto a los criterios y alcance del plan acordado.
- Realizar un análisis crítico de válvulas, teniendo en cuenta los modos de fallo de las mismas y las consecuencias de dichos modos. En [228], se proporcionan algunos aspectos a considerar a la hora de los posibles fallos en válvulas. También se debe estudiar la accesibilidad y operabilidad en todos los modos posibles.
- Revisar todos los aspectos de HFE en las revisiones específicas del modelo de planta.
- Realizar análisis de Human Machine Interface.
- Revisar y especificar los requisitos de la sala de control. No solo en cuanto a ergonomía, sino al diseño de las propias pantallas de operación del sistema de control de planta.
- Realizar un análisis de gestión de sistemas de control y alarmas.
- Realizar un “critical task inventory” y “critical task analysis”, Analisis, Inventario o relación de tareas críticas o la identificación de aquellas tareas realizadas por operadores que garanticen la integridad de los equipos y /o la seguridad de los procesos.
- Reportar periódicamente al comité de Human Factors del Proyecto.

Los estudios HFE pueden tener un alcance muy amplio. Es una actividad multidisciplinar que se ha de acometer, preferentemente desde el inicio del proyecto y debe ser liderada por un especialista, el coordinador HFE del equipo de HSE del proyecto. Se puede consultar bibliografía especializada [229], [230] para estudios relacionados con HFE o [231] donde se proporciona un enfoque de factores humanos y organizativos (FHO).

La existencia de un plan de HFE en el proyecto y un coordinador de HFE integrado en el equipo de HSE sería muy conveniente para mejorar los estándares de seguridad de las instalaciones. En concreto, el establecimiento de planes de HFE para la construcción que identifique las actividades relacionadas con HFE es, asimismo muy recomendable. El plan identificará la organización

requerida para lograr, principalmente a través de la capacitación, definiendo roles y responsabilidades y actividades de control de calidad durante la construcción.

Existe poca reglamentación al respecto. Se refieren habitualmente a las buenas prácticas como elemento de regulación. En estos términos, la Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas editan guías y practicas recomendadas en base a la experiencia adquirida a lo largo de los años en investigación de accidentes con consecuencias fatales. En [232], se proporcionan algunas claves que podrían resultar de interés en las instalaciones objeto de estudio en esta tesis, pero que por el momento no están siendo puestas en práctica y parece recomendable su implantación paulatina a medio plazo. Entre ellas se introducen los términos seguridad basada en el comportamiento (BBS, Behavioural-Based Safety), como clave en el tratamiento del error humano en los accidentes. El enfoque de seguridad basado en el comportamiento promueve intervenciones que se centran en las personas y, a menudo, incorporan observaciones individuales o grupales de los empleados que realizan tareas de trabajo de rutina, establecen metas y brindan retroalimentación sobre el comportamiento relacionado con la seguridad, el entrenamiento y la supervisión. Las iniciativas tienen un enfoque proactivo, alentando a las personas y sus grupos de trabajo a considerar el potencial de participación en incidentes (accidentes) y a evaluar su propio comportamiento como seguro o inseguro siempre, pase lo que pase.

En las prácticas recomendadas [232], se proporciona la relación entre BBS y HFE mediante la Figura 5.7, la cual proporciona sobre un conjunto de riesgos humanos significativos como pueden verse controlados por los diferentes sistemas de control de riesgos.

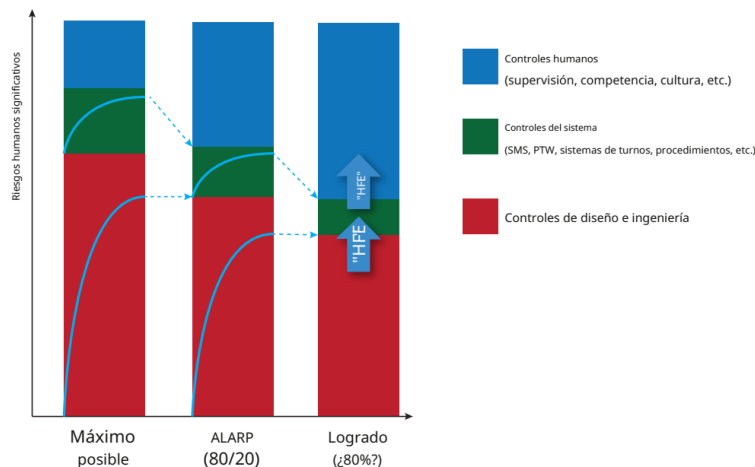


Figura 5.7.- El papel de HFE en el control de riesgos humanos

El eje de la izquierda de la figura indica la proporción de este conjunto que puede mitigarse mediante tres tipos diferentes de controles, marcados cada uno con un color:

- Color rojo, controles de diseño e ingeniería
- Color verde, controles del sistema, como son los sistemas de gestión de seguridad, el sistema de permisos de trabajo (PTW) o los procedimientos de operación, etc.

- Color azul, los controles humanos, es decir aquellos que se realizan por la buena actitud hacia la seguridad o aquellos que estén en condiciones de trabajar y debidamente supervisadas, lo que se ha identificado como sistema BBS).

Se puede observar en la figura, que suponiendo una instalación lo suficientemente compleja, como lo son las instalaciones térmicas, se pueden tener las siguientes consideraciones:

- Máximo posible: Incluso si se hace todo lo teóricamente posible, los controles de diseño e ingeniería no pueden controlar todos los riesgos relacionados con las personas. La diferencia se compensa mediante una combinación de controles del sistema y controles humanos.
- ALARP: aplicando el criterio de hacer lo que es "razonablemente práctico", en lugar de lo que es teóricamente posible (y asumiendo una regla 80/20 de rendimientos decrecientes), la efectividad de los controles de ingeniería y del sistema se reducen. Como consecuencia, aumenta la dependencia de los controles humanos (BBS).
- Logrado: en muchos casos, como muestra repetidamente la investigación de incidentes importantes, el riesgo asociado con los factores humanos no se reduce a ALARP mediante controles de ingeniería. El mismo argumento se puede aplicar a los controles del sistema, ya sea por causas diversas, como procedimientos mal redactados, inaccesibles o impracticables, falta de supervisión o competencia, entre otros, hacen que de nuevo se deba incrementar la confianza en el control humano, BBS, para compensar el vacío del sistema y de diseño e ingeniería.

Por lo tanto, una forma de ver la ingeniería de factores humanos, HFE, es como una disciplina que se ocupa de garantizar que los controles de ingeniería y del sistema contra la falta de confiabilidad humana se diseñen, implementen y mantengan de manera que se reduzca la dependencia de BBS. En las prácticas recomendadas en [232], se proporcionan las directrices para confeccionar un sistema de HFE a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Algunos autores abordan el error humano y describen las diferentes metodologías y modelos para extraer las distintas tipologías de los errores, clasificarlos y ser capaces de investigarlos como un modelo de error [233], [234] o [229] donde se aborda el modelo de habilidades-reglas-conocimiento (SRK) como medio de análisis del error humano. Los modelos de error humano describen cómo las personas procesan la información, cómo reaccionan y responden. Los modelos más avanzados también describen las metas y objetivos de una persona y las decisiones y acciones tomadas para lograr esas metas. Para evaluar el error de operador, el modelo de operador debe estar vinculado a un modelo correspondiente de la planta, de manera similar a la que lo está el sistema de control. Si bien puede parecer algo inhumano considerar a los operadores como un "componente" de la planta, es aún más inhumano exigir que funcionen perfectamente todo el tiempo sabiendo que todos los demás componentes de la planta definitivamente tienen una tasa de fallas. Debe aceptarse que los operadores están sometidos a requisitos ambientales, y que las tareas que realizan deben estar adaptadas a sus capacidades de tal modo que, incluso, en las mejores circunstancias, se producirán errores.

Otros autores abordan los controles del sistema para reducir las tasas de fallo y mejorar las operaciones [235], [236] o [237].

La consideración del factor humano en los estudios de seguridad es determinante y un factor a tener en consideración en todos los análisis de riesgos que se ven involucrados los operadores. Es un campo de investigación abierto en la aplicación de las técnicas de seguridad y su relación con la ingeniería de factores humanos. Para el sector de construcción de plantas eléctricas objeto de este trabajo, su aplicación proporcionaría importantes avances en materia de seguridad y en los métodos de supervisión y operación de las plantas.

5.3 Técnicas de evaluación de riesgos para el comisionado

Se han venido desarrollando algunas técnicas específicamente enfocadas al análisis y evaluación de riesgos en las etapas de comisionado o en aquellas en las que el uso de procedimientos esta generalizado. Así, la técnica denominada HAZOP humano [238], se diseñó precisamente con el objetivo de trasladar la técnica del análisis HAZOP al estudio en profundidad de las desviaciones que pueden ocurrir durante la ejecución por humanos de los procedimientos de puesta en marcha. En lugar de establecer nodos de la planta, el método utiliza los pasos individuales de un procedimiento como unidad elemental de análisis. Para identificar todas las posibles desviaciones, mantiene el uso de palabras guía (debidamente modificadas), pero estas palabras deben aplicarse a las tareas individuales definidas por el procedimiento en cuestión, más que a los parámetros del proceso. El objetivo es identificar fallos humanos durante una actividad y evaluar el potencial de recuperación del operador u otras medidas de reducción de riesgos que eviten que esta falla se convierta en un accidente mayor. Cuando el fallo humano hace una contribución significativa al riesgo de un accidente mayor, se consideran mejoras con el objetivo de reducir el riesgo al "mínimo razonablemente posible" (ALARP). La metodología es cualitativa e involucra a un equipo de personal experimentado que emplea el método de la guía de HSE de UK [239] para la evaluación de riesgos.

La metodología de HAZOP humano, incorpora una serie de ventajas respecto del HAZOP tradicional al detectar el cambio de los parámetros de proceso a las condiciones en las que se realiza la puesta en marcha y considerar al operador como parte fundamental de la puesta en servicio. Sin embargo, tal como describe Cagno et al [240] en su propuesta de mejora, el HAZOP humano no considera el sistema de control como parte de los factores de análisis, ni tiene en consideración la ejecución y el resultado de los pasos previos en la evaluación de la ejecución del procedimiento, algo que en opinión de los autores es determinante para su propuesta de mejora.

La metodología HAZOP multinivel [240] utiliza como punto de partida el HAZOP humano pero desglosa el análisis en dos direcciones diferentes:

- En una dirección vertical, desglosando de una manera jerarquizada cada procedimiento en una secuencia ordenada de pasos. De esta manera se puede analizar cada operación teniendo en cuenta la operación de manera individual pero considerando el contexto de las operaciones anteriores y sucesivas de la secuencia.

- En la dirección horizontal cada paso se descompone horizontalmente en los tres niveles lógicos: operador, sistema de control y planta / proceso, que caracterizan la ejecución de un procedimiento de puesta en servicio. De este modo se puede registrar cómo pueden surgir desviaciones en diferentes niveles lógicos, y así establecer medidas de carácter preventivo y de protección para cada uno de ellos.

La propuesta incorpora el sistema de control en la evaluación de las actividades y pasos que conforma el procedimiento. Así, el operador inicia la implementación de un paso en un procedimiento determinado, ya que reconoce las actividades a realizar, y luego elige los respectivos comandos en un panel de control o realiza una acción directa. Posteriormente, deberá comprobar mediante instrumentos adecuados que las actividades se han realizado correctamente. El sistema de control tiene como misión proporcionar al operador la información sobre el estado del proceso de la planta, para que pueda emprender la acción correcta para completar la tarea asignada. Siempre que los pasos del procedimiento prescriban la ejecución de acciones sobre componentes automatizados, el sistema de control tiene la función adicional de actuar en la planta la acción indicada por el operador en la sala de control. Mediante la medición de variables específicas del proceso, el sistema de control también proporciona retroalimentación al operador sobre la implementación de cada acción. Finalmente el nivel de planta / proceso asume un papel pasivo, al permitir que el proceso se coloque en el estado correcto para que las acciones realizadas en los niveles anteriores se puedan completar con éxito. Este nivel es muy importante dentro de la metodología ya que 'memoriza' errores cometidos en pasos anteriores. De hecho, una desviación durante una tarea determinada causa un daño inmediato o significa que la planta / proceso no está en las mejores condiciones para ejecutar el siguiente paso.

Para el método se utiliza el análisis del árbol de eventos ETA. La Figura 5.8, proporciona el esquema básico sobre el que se realiza la evaluación de riesgos.

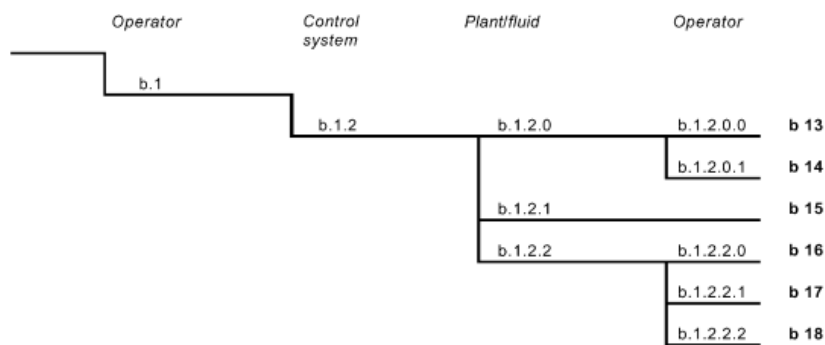


Figura 5.8.- Tabla para el análisis HAZOP multinivel [240]

Para proceder con la evaluación de riesgos, el método HAZOP multinivel sigue los tres pasos siguientes, evaluación de la probabilidad, estimación de las consecuencias y selección de las medidas correctoras.

Para la evaluación de la probabilidad de ocurrencia se procede con la evaluación a nivel de operador, nivel de sistema de control y nivel de planta.

Para evaluar la probabilidad de fallo del operador se recurre a las técnicas de evaluación y reducción de errores humanos HEART [241] y a la técnica para la predicción de la tasa de errores humanos THERP [242].

Para la evaluación de la probabilidad de fallo del sistema de control se recurre a la experiencia previa de la puesta en servicio y a los datos históricos de dicha experiencia. Si tales datos no están disponibles, las cifras sobre la confiabilidad de diferentes tipos de instrumentos y dispositivos pueden tomarse de manuales específicos [243].

Las probabilidades en el nivel de planta no se calculan completamente específicamente para cada paso, ya que en el análisis de los pasos anteriores la probabilidad de que las consecuencias no registradas y corregidas en el tiempo se conviertan en desviaciones a nivel de planta / proceso ya ha sido adquirido. Estos valores se multiplican por la probabilidad de que el operador no registre o corrija las consecuencias (cuando esto sea posible antes del siguiente paso), para determinar la probabilidad efectiva de que una ruta de error determinada se propague como un cambio en el estado de la planta / proceso desde las condiciones objetivo. La falta de corrección de las desviaciones es generalmente el resultado de omisiones y / o entrada incorrecta por parte del operador, por lo que la evaluación de probabilidad se puede realizar nuevamente con las técnicas HEART / THERP utilizadas en el nivel de operador.

Finalmente se recomponen los valores de probabilidad. Las consecuencias individuales posteriores de cada ruta del árbol de eventos pueden verse como la intersección de todos los eventos en la ruta que conduce a la consecuencia. Por esta razón, la probabilidad se da como el producto de las probabilidades de que ocurran las desviaciones en la trayectoria.

Después se procede con la evaluación del impacto económico de las consecuencias y con el cálculo del correspondiente índice de riesgo. Para medir el riesgo asociado a una ruta de árbol de eventos, se debe obtener un índice de la intensidad del daño causado. Desde un punto de vista operativo, el cálculo de los índices de magnitud necesarios para evaluar el riesgo requiere el apoyo de expertos en la puesta en servicio con suficiente sensibilidad para estimar, al menos en términos de orden de magnitud, el impacto económico de cada consecuencia examinada. Una vez obtenidos estos valores, el siguiente paso es multiplicarlos por la respectiva probabilidad de ocurrencia calculada previamente. El resultado es el índice de riesgo agregado de cada consecuencia negativa.

Finalmente se procede con la elección de las medidas correctoras. Si, por un lado, es posible predecir con precisión el coste de cada medida, de nuevo son necesarias estimaciones para valorar los dos factores (probabilidad e impacto económico) que miden el riesgo tras las propias mejoras. Con estos valores y suponiendo que sean fiables, es posible optimizar las medidas para maximizar la reducción de riesgo esperada en términos de coste, teniendo en cuenta los recursos disponibles. Nótese que la evaluación de riesgo se realiza en términos de coste optimizando las medidas de mitigación.

Cabe mencionar que la metodología HAZOP humano se ha materializado en la aplicación de la técnica HAZOP basada en procedimientos, la cual es parte de los análisis de riesgos propuestos y generalizados por el CCPS [43] y que formará parte fundamental en el desarrollo de la propuesta

metodológica que se desarrolla en la presente tesis. Precisamente ninguna de las técnicas mencionadas arriba, ha sido puesta en práctica con resultados satisfactorios para incrementar los niveles de seguridad en las operaciones de puesta en servicio, probablemente por tener un grado de complejidad alto para su realización y disponer de datos poco actualizados, lo que ha podido motivar que no sean consideradas parte de los análisis de riesgos de aplicación a los proyectos de manera generalizada. De hecho solo recurriendo a una búsqueda muy especializada se puede acceder a estos estudios, los cuales no tienen una implantación generalizada por el momento y ya ha transcurrido un tiempo suficiente para poder afirmarlo sin temor a equivocación.

Con el objetivo de proporcionar una metodología de fácil aplicación y flexibilidad en el capítulo siguiente se propone un método más sencillo y con resultados favorables en la reducción del riesgo.

Capítulo 6.

Propuesta metodológica para el análisis de riesgos de los sistemas temporales durante la construcción y comisionado de una central eléctrica

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, la evaluación de peligros debe ser realizada como parte del programa de gestión de riesgos de una organización, sobre todo, aquellas organizaciones que dependen en una u otra medida de la seguridad del proceso en el que basan su productividad. En el caso de una central de generación eléctrica, la gestión de seguridad de los procesos forma parte integral del sistema de gestión de riesgos de la compañía. La utilización del enfoque del “ciclo de vida”, atendiendo a las evaluaciones de peligros durante cada etapa del proyecto, ayuda a revelar de manera adecuada las deficiencias que pueden existir en determinadas actividades y/o procesos [43].

Una evaluación de peligros es un esfuerzo estructurado y organizado que busca identificar y analizar las deficiencias y debilidades que las instalaciones tienen, ya sea por un problema de diseño incorrecto o por una falta de previsión en los potenciales peligros a los que se encuentra sometido el proceso o los equipos en determinadas condiciones de operación. Estos peligros incorrectamente identificados o mal gestionados pueden conducir no solo a pérdidas en la producción por paradas imprevistas de la planta, o retrasos en la ejecución de las actividades durante la puesta en servicio, si no en el peor de los casos a daños sobre las personas.

La evolución tecnológica se encuentra en permanente desarrollo y por tanto la aplicación de nuevas tecnologías para la operación de las instalaciones también está en permanente evolución, por lo que en determinados procesos lo que era muy complejo de incorporar para la prevención de incidentes en la planta, actualmente puede resultar relativamente sencillo, si se identifican adecuadamente los peligros que pueden estar presentes en el proceso. Además la aplicación de las técnicas de evaluación de riesgos e identificación de peligros se ha generalizado en la mayor parte de las actividades industriales, por lo que se requieren nuevas aplicaciones y métodos que respondan a dichas demandas.

Además de identificar la metodología más adecuada para la identificación de peligros y evaluación de riesgos, será necesario también identificar y cuantificar los recursos necesarios para su realización, como se documentarán los resultados y como se llevará a cabo la evaluación, es decir cuál será el procedimiento a seguir para dicha evaluación. Este capítulo intentará proporcionar respuesta a estas cuestiones de la manera más general posible para los procesos que se han identificado en el capítulo 5 como deficitarios en los proyectos de construcción de centrales eléctricas.

Cada método de los que se enunciaron en el capítulo 2, o aquellos que puedan haberse desarrollado después para aplicaciones específicas, disponen de unas determinadas características que los diferencian entre sí y por tanto, pueden ser mejores para una determinada aplicación y pueden no resultar tan efectivos para otra. Los especialistas en la gestión de riesgos de procesos podrán en base a su experiencia seleccionar cual es el método de análisis que mejor se adapta para una determinada aplicación. Sin embargo, lo que puede resultar obvio para un especialista, puede no ser así para otro, ya que todos los métodos disponen de algunas características comunes que hacen que puedan ser identificados peligros que sin la propia aplicación de la técnica no lo serían. Por tanto, es preciso requerir la relativización de los argumentos que en lo que sigue se utilizarán para

proporcionar una metodología de trabajo sobre los sistemas temporales que se instalan en la fase de comisionado y precomisionado de las centrales eléctricas.

6.1 Selección del método

Para la selección del método más adecuado se recurrirá a las técnicas descritas en el capítulo 2.3, las cuales fueron someramente descritas con objeto de disponer, por un lado, de una visión suficiente para evaluar con cierto detalle en los capítulos posteriores, los métodos más ampliamente utilizados en el análisis de riesgos durante la ejecución de los proyectos de construcción de una central eléctrica, y, por otro, llegados a este punto conocer las distintas alternativas disponibles para realizar la evaluación de peligros que el proceso que se pretende analizar dispone.

Así, es necesario identificar con el mayor rigor posible, cuáles son los requisitos que debe cumplir el método de identificación de peligros para poder realizar la evaluación de riesgos buscada. Será preciso identificar qué elementos deben ser revisados y analizados para que el método proporcione la efectividad buscada.

En primer lugar, se debe asegurar que la información y documentación disponible para realizar el ejercicio de evaluación de riesgos es suficiente y está en unas condiciones adecuadas que permitan conocer, con el detalle necesario, las particularidades del proceso a analizar. También será necesario saber si dicha documentación ha sido revisada por los especialistas de las distintas disciplinas técnicas con objeto de asegurar su idoneidad desde los diferentes aspectos que deben ser considerados en el diseño. Específicamente se identificará que documentación es imprescindible para la realización de las actividades previstas y si dicha documentación incorpora los procedimientos necesarios y las instrucciones básicas para la ejecución en planta.

En segundo lugar, se debería tener en cuenta el estado de la planta para la ejecución de las tareas previstas y si se dispone de los recursos, herramientas y dispositivos necesarios para su realización.

Finalmente se establecerán los recursos requeridos para la realización del análisis y del momento más idóneo para realizarlo, teniendo en cuenta los aspectos mencionados de estado de documentación, estado de la planta así como la planificación y cronograma del proyecto para cada caso de análisis.

Se pueden considerar dos pasos claramente diferenciados en la metodología a seguir:

- Etapa inicial de evaluación de la documentación y estado de la instalación.
- Realización de la identificación de peligros y análisis de riesgos sobre el proceso y actividades consideradas sobre las instalaciones temporales a evaluar.

Considerando los métodos de análisis discutidos en el capítulo 2, que se han diferenciado en función de la metodología en que basan sus análisis estableciendo o no razones numéricas del fenómeno analizado, se distinguieron métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos. Solo se considerarán metodologías de análisis cualitativas, ya que las híbridas y cuantitativas exceden los objetivos que se persiguen para la evaluación a realizar sobre las instalaciones

temporales. De ser necesario en algún caso, se podría recurrir a realizar algún análisis específico que precise del uso de índices o parámetros para la clasificación, pero inicialmente se consideran únicamente las metodologías cualitativas. Entre los métodos cualitativos se identificaron dos grandes grupos de métodos de análisis:

- Basados en escenarios
- No basados en escenarios

Dentro de las identificaciones de peligros “no basadas en escenarios”, se discutieron las siguientes:

- Análisis preliminar de peligros (Preliminary Hazard Analysis-PreHA-).
- Revisión de seguridad (Safety Review)
- Método de la clasificación relativa (Relative Ranking)
- Listas de Verificación (Check List)

Y en el grupo de métodos basados en escenarios se discutieron en detalle los siguientes:

- Análisis What-if o ¿Qué pasa si?
- Análisis What-if / Lista de verificación
- Estudios de riesgo y operabilidad (HAZOP)
- Análisis de efectos y modos de falla (FMEA)
- Análisis de árbol de fallas (FTA)
- Análisis del árbol de eventos (ETA)
- Análisis de causa-consecuencia (CCA) y análisis de pajarita

Por lo tanto, para la selección adecuada del método a utilizar, en primer lugar es preciso conocer si el análisis se realizará sobre escenarios o no será necesario considerar escenarios de trabajo sobre los que evaluar los incidentes potencialmente peligrosos.

Resulta evidente que para la primera evaluación, no se requiere el establecimiento de escenarios, ya que solo se busca evaluar si la documentación disponible y el estado de las instalaciones es conforme a lo requerido para la evaluación de riesgos o por el contrario, ni siquiera puede ser realizada. Para la etapa inicial del análisis se considerarán entonces los métodos disponibles dentro de la categoría “no basados en escenarios”.

El análisis preliminar de peligros PHA, tal como se ha conceptualizado y se ha descrito en el capítulo 2, se aplica generalmente durante el diseño conceptual de la planta y es muy útil para la toma de decisiones en relación con la implantación y la selección del sitio para su instalación. Normalmente se utiliza para la definición de los sistemas y áreas de proceso que componen la instalación, formulando una lista de peligros y situaciones peligrosas genéricas y determinadas características del proceso analizado. No es el método adecuado para la evaluación buscada.

Respecto de las Revisiones de Seguridad SR, las cuales se suelen utilizar para verificar que la planta y los procedimientos de operación y mantenimiento cumplen con los criterios de diseño y los estándares de construcción, podrían perfectamente ser de aplicación al método buscado. De hecho, la revisión se realiza por el equipo de revisión a través de entrevistas con los especialistas y personal asignado al proyecto, disponiendo además de las normas aplicables, de los estudios de

seguridad realizados y de los procedimientos de operación y mantenimiento aplicables. Sin embargo, el método no resuelve las necesidades de la etapa 1 y puede resultar más efectivo para la etapa 2 de la metodología buscada. El mismo razonamiento puede ser de aplicación para el método de la clasificación relativa, el cual es habitualmente utilizado en etapas iniciales del proyecto y se limita normalmente a proporcionar una visión de las principales áreas de peligro potencial, aunque puede ser adaptable a las necesidades normalmente se limita a la identificación de peligros de incendio, explosión y exposición química, por lo que resulta de difícil aplicación para el método buscado.

Sin embargo entre las técnicas más versátiles y flexibles se encuentra la lista de verificación, la cual encaja perfectamente con los requisitos de esta primera etapa.

Efectivamente la técnica de evaluación de peligros Lista de Verificación (Check List) utiliza las experiencias anteriores disponibles en la compañía que se han ido compilando, las cuales incluyen medidas de protección, pasos de procedimiento, propiedades de los materiales, peligros o características de diseño de "buenas prácticas" de una aplicación particular. Pueden utilizarse para la verificación de diseños, operaciones o estados del sistema y a menudo se utilizan conjuntamente con otras técnicas de análisis, las cuales se complementan. Aunque suelen usarse conjuntamente con otras técnicas resuelven con sencillez casos de evaluación complejos ya que la técnica utiliza preguntas las cuales habitualmente se resuelven con "sí", "no", "no aplica" o "necesita más información", de manera que es sencillo obtener resultados cualitativos que aunque son dependientes de la situación específica a analizar, permiten decidir con un "sí" o "no" sobre el cumplimiento buscado.

Por tanto para la primera etapa de la metodología buscada se elaborará una Lista de Verificación que permita identificar el estado del diseño y de la planta antes de proceder con la evaluación de riesgos propiamente dicha de la etapa 2.

De esta primera etapa se obtendrá un informe que incluirá las deficiencias encontradas junto con las propuestas de resolución o mejora. El informe deberá incluir además de las respuestas que se han encontrado a las preguntas realizadas, todas las notas destacables y aquellas llamadas de atención que los especialistas hayan detectado en esta primera revisión.

Deberá ser rápida, de manera que se informe inmediatamente a la dirección de proyecto de las necesidades con objeto de cumplir o retrasar al mínimo el cronograma.

Como ya se apuntó en el capítulo 2, la principal desventaja de las listas de verificación como método de análisis reside en la dificultad de preparar una buena lista que incluya la verificación de los aspectos principales del proceso a evaluar.

La formación del equipo de especialistas que participará en la evaluación y análisis de las instalaciones temporales será otro de los factores determinantes para el éxito de la metodología propuesta, no solo en términos de cualificación profesional y experiencia, si no en términos de selección de los perfiles profesionales y especialidades adecuadas, lo que facilitará el enriquecimiento de la lista en sucesivos proyectos y evaluaciones de riesgos.

La etapa 2 constituye el núcleo central de la evaluación, aunque la etapa 1 pondrá de manifiesto algunas consideraciones a tener en cuenta para la etapa 2. Así ya se habrá podido revisar el estado de la documentación y si se han incluido aquellos documentos básicos que los especialistas necesitan para proceder con la revisión del diseño y de las medidas de prevención y reducción de peligros consideradas. Conviene recordar que existen cuatro estrategias diferentes para reducir el riesgo del proceso:

- Inherente, que como se ha visto en el sector eléctrico aunque poco extendido en el propio diseño básico si se considera habitualmente, por lo que cabe esperar que los productos empleados en el proceso y las condiciones de trabajo ya habrán considerado la reducción posible del riesgo debida a esta categoría.
- Pasivo, el cual reduce el riesgo mediante la incorporación en el diseño de procesos y equipos que reducen la frecuencia o la gravedad, como puede ser el uso de recipientes a presión; sistemas de drenaje y contención adecuados o incorporación de equipos a prueba de explosiones. Aquí el equipo deberá verificar que se han tenido en cuenta las necesarias consideraciones de diseño para evitar los peligros del proceso y sobre todo de la instalación temporal.
- Activo, el cual incorpora controles y dispositivos que actúan para responder a situaciones peligrosas. Aquí se pueden considerar los sistemas de control y protección ya sean electrónicos como mecánicos, como pueden ser el uso de dispositivos de alivio como válvulas de seguridad, de exceso de flujo, etc.
- Procedimental: Mediante el uso de procedimientos operativos, controles administrativos, planes de respuesta de emergencia, etc., de modo que se prevengan y minimicen los efectos del incidente

En la etapa 2 se revisará principalmente el diseño del proceso para verificar que se han considerado las medidas de prevención y mitigación de peligros para cada uno de los escenarios establecidos en el análisis. Para ello resultará determinante estudiar en detalle no solo la documentación habitual en los métodos basados en escenarios, sino también incluir los procedimientos de verificación, pruebas y procedimientos operativos que establecen las operaciones que deben ser realizadas por los operadores en cada momento. Este hecho incorpora un factor diferencial respecto de los métodos tradicionales basados en escenarios que son empleados durante la fase de diseño del proyecto.

De entre los posibles métodos a emplear para la etapa 2, se puede descartar directamente el análisis modal de fallos y efectos, FMEA, ya que este método considera los modos de fallo individuales de un elemento de la planta, o de varios elementos, que conforman un sistema de la misma. Para realizar la evaluación se selecciona uno o varios equipos de la planta que puedan fallar evaluando a continuación cuales son los efectos de ese fallo en el sistema o en el funcionamiento de la planta. Es un análisis que de ser requerido por ejemplo para identificar el nivel de redundancia de una válvula o bomba puede ser necesario específicamente en el proceso de análisis, pero no como método general aplicable a este tipo de instalación.

El mismo razonamiento podría realizarse sobre la metodología FMEAC, la cual incorpora la gravedad de las consecuencias de los fallos al método FMEA. Ambas proporcionan recomendaciones para aumentar la confiabilidad del equipo, mejorando de esta manera la seguridad del proceso.

Antes se mencionó que para esta etapa podría considerarse la revisión de seguridad SR o revisión de diseño como método de análisis. Efectivamente, esta metodología de análisis fue de las primeras en establecer un método para la identificación de peligros, sin embargo esta técnica suele considerar la verificación por el equipo auditor de que los estándares, prácticas y normas aplicadas al diseño son las adecuadas y no es muy habitual la incorporación de escenarios, por lo que parece más adecuado evaluar con más detalle otros métodos de análisis, como el HAZOP, What-If, o las evoluciones y adaptaciones de estas técnicas al caso estudiado.

No cabe duda de que el método más extendido para la evaluación de riesgos e identificación de peligros de proceso basados en escenarios es el HAZOP. Siempre que el proyecto lo pueda soportar, recurrir a esta metodología es garantía de éxito. Sin embargo en la aplicación de esta metodología a los sistemas temporales y, en concreto, en el caso de que la ejecución de los sistemas se realice bajo la modalidad de subcontratación, es muy probable que el cronograma del proyecto no permita y por tanto no encaje en el tiempo con la disponibilidad de la documentación necesaria para su realización, cuando se realiza el estudio. Aunque es posible realizar estudios HAZOP en momentos diferentes del proyecto, en función de las necesidades, la realidad se impone y el equipo de especialistas que atiende a los estudios HAZOP, normalmente no se encuentra disponible siempre que se realiza en etapas tardías del proyecto. Hay que tener en cuenta además que el subcontratista debe elaborar la documentación del proyecto para poder proceder con el acopio de los materiales, y precisamente este tipo de necesidades contribuye de manera determinante a “desatender” otros aspectos que vienen a ser determinantes en la seguridad de estos procesos.

Se ha recurrido también a solicitar como parte del alcance del contratista la incorporación de un estudio HAZOP específicamente aplicado a las instalaciones que son objeto del subcontrato. Esto proporciona una falsa sensación de seguridad, ya que disponer de un estudio “HAZOP estándar” no es lo más recomendable por múltiples razones. El estudio HAZOP dispone de una rigurosa metodología con la participación de especialistas diversos y debe ser realizado particularmente al proyecto teniendo en cuenta las condiciones de contorno y las interfases, las cuales pueden resultar determinantes precisamente para este tipo de instalaciones, por lo que no es recomendable optar por esta solución.

Se requiere disponer de un método de análisis algo más flexible o si se quiere menos riguroso en su forma. El método What-If o ¿Qué pasa sí?, es un método de análisis que también se basa en la técnica de “lluvia de ideas” (brainstorming) donde un equipo de especialistas experimentados se plantean preguntas sobre el proceso y sobre escenarios de riesgo. No está tan estructurado como el HAZOP, aunque puede enriquecerse y estructurarse según las necesidades, precisamente por su flexibilidad. El equipo designado para el análisis lanzará una serie de preguntas, que pueden haber sido elaboradas previamente a la reunión o que pueden estar predefinidas y sistematizadas en

función de las necesidades y que también puede ser completada durante la propia reunión con otras preguntas en función de las necesidades y creatividad del equipo. El equipo debe trabajar de manera lógica y estructurada a lo largo del proceso, con la intención de desafiar las diferentes partes del diseño y verificar que se han considerado todas las contingencias así como las correspondientes medidas de mitigación. El cuestionamiento debe ser creativo con análisis de consecuencias, clasificación de criticidad y recomendaciones acordadas por los miembros del equipo. Aunque el método puede parecer que carece de rigor, tiene gran parte de la técnica HAZOP incorporada en su esencia de trabajo. Después de cada pregunta para cada caso o escenario de estudio, el equipo evalúa las consecuencias de un determinado escenario de riesgo, de modo que una vez se hayan considerado las posibles causas, asignará una calificación de criticidad al evento, por ejemplo, utilizando una matriz simple de frecuencia de las consecuencias. Cuando sea aplicable, el equipo también debe identificar las opciones disponibles o hacer recomendaciones de modificaciones al diseño. Para cada pregunta “Y si ...”, el análisis se registra en una tabla simple con columnas para la pregunta Y si ..., las Consecuencias, las Salvaguardas, la Criticidad y las Recomendaciones.

Como se vio en el capítulo 2, recientemente se ha desarrollado una variación del método What-if denominado SWIFT de sus siglas en inglés “Structured What-IF Technique” o técnica Estructurada What-if [76], la cual utiliza la técnica What-if incorporando palabras **guía / encabezados** previamente desarrollados, de manera que los especialistas que conforman el equipo de análisis lanzan preguntas o preocupaciones que normalmente comienzan con las frases “¿qué pasaría si...?” o “¿Cómo podría...?” para examinar los riesgos y peligros del sistema analizado. El análisis de esta técnica también es menos detallado que el HAZOP y por eso consume menos tiempo y es más ágil que este. La técnica SWIFT ha sido utilizada con éxito en otros sectores y puede ser complementada con un análisis HAZOP o “que pasa si” aplicado a procedimientos como caso especial de estudio según se describe en [57] como extensiones de las herramientas de análisis o casos de aplicaciones especiales.

La propuesta metodológica para el análisis de riesgos de los sistemas temporales que se instalan en las fase de precomisionado y comisionado de la planta antes de su puesta en marcha, se basará en una combinación de las siguientes técnicas convenientemente aplicadas:

- Listas de Verificación
- Aplicación de técnicas SWIFT con palabras guía preseleccionadas
- Aplicación de técnicas de HAZOP aplicado a procedimientos como expansión de la evaluación de peligros del HAZOP pero mediante el uso de preguntas relacionadas con operaciones incorrectamente ejecutadas o no ejecutadas por el operador.

Se puede considerar que el método propuesto podría definirse como un método combinado What-If/Listas de verificación como el que se ha descrito en el capítulo 2, renombrado como SWIFT/Listas de Verificación con palabras guía seleccionadas ad-hoc para la aplicación a los sistemas temporales.

6.2 Descripción de la metodología

El método propuesto se dividirá en etapas. La Figura 6.1. muestra un grafo del proceso que será necesario seguir para completar la evaluación de riesgos del proceso sobre el que se aplicará el método.

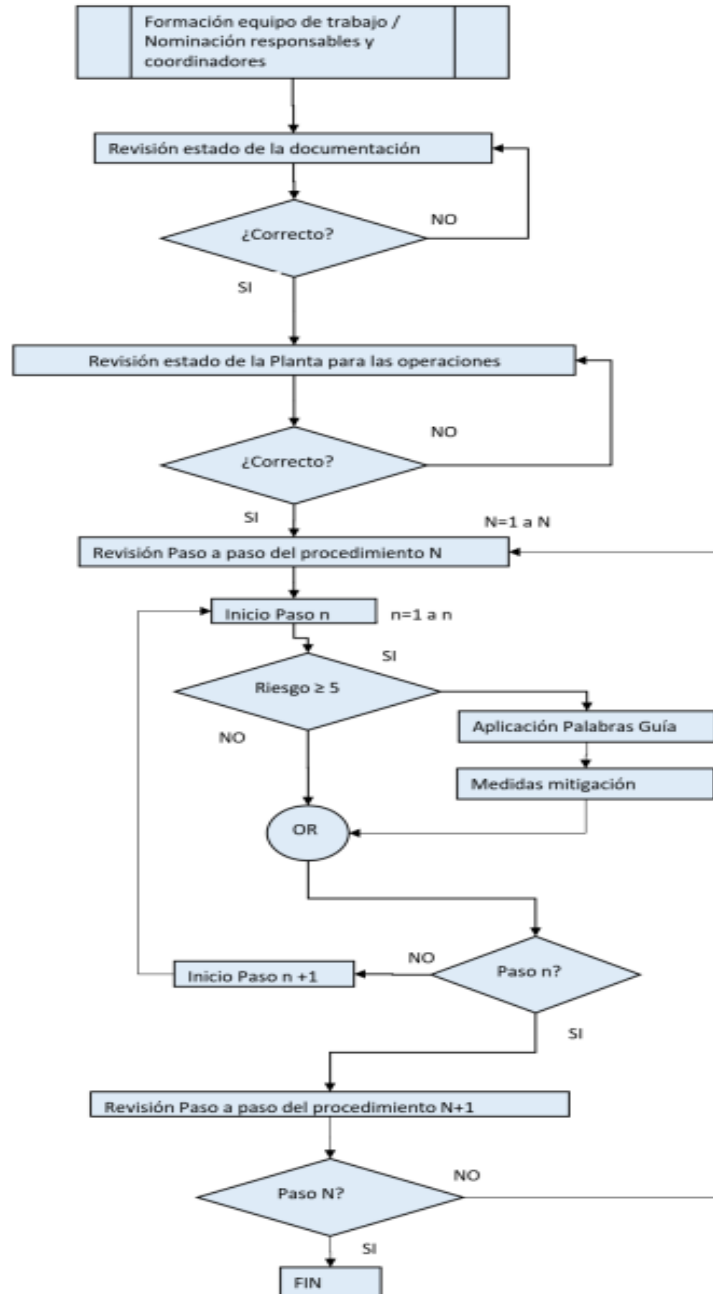


Figura 6.1.- Método de evaluación de riesgos para sistemas temporales.

El **Paso 1** consiste en la formación del equipo de trabajo. En el apartado 6.4 se proporciona una visión detallada de las necesidades de recursos y perfiles de los componentes del equipo de revisión. Para conformar el equipo se puede establecer estratégicamente por la compañía que realiza las funciones de contratista principal, la subcontratación de una empresa externa especializada en la realización de análisis de riesgos, o bien conformar el equipo completamente

con especialistas de la propia compañía contratista del proyecto. Sea como fuere, se precisa establecer un líder del equipo de revisión, el cual deberá ser una persona experimentada en este tipo de estudios multidisciplinarios que basan su metodología en la tormenta de ideas. Es muy recomendable también, designar como parte del equipo a un secretario, que se encargará de realizar las actas y anotar los resultados de la revisión. Como el método utiliza una metodología similar al HAZOP o más específicamente a What-If, disponer de un marco bien estructurado de análisis se convierte en algo fundamental y, específicamente, anotar los resultados de los escenarios analizados resulta determinante para poder completar el análisis de manera satisfactoria en el caso de ser necesario volver atrás en alguno de los supuestos o de las medidas de mitigación existentes o adicionales sugeridas.

El líder del equipo de revisión coordinará las reuniones y proporcionará la documentación aplicable al análisis de riesgos, de manera que previamente a la primera reunión los integrantes del equipo llevarán a cabo el estudio y revisión del sistema objeto de análisis de manera individual, proporcionando sus comentarios antes de la reunión del equipo completo. Este se considera el **Paso 2** del procedimiento propuesto, el cual es habitual en estos estudios.

Si el resultado del análisis es correcto, es decir si la documentación que va a ser utilizada por el equipo de revisión es adecuada para que sobre ella se realicen las preguntas detalladas y se desarrollen los escenarios de accidente, se procederá con la propia revisión la cual queda establecida como **Paso 3**.

El paso 3 entra a revisar en detalle el estado de la planta, para verificar que las operaciones previstas en el procedimiento y en la documentación asociada, pueden ser llevadas a cabo. En el apartado 6.5.1.2. se proporciona con más detalle la documentación que se considera necesaria para realizar con garantías el estudio. Mencionar aquí que cuando las actividades que conforman los sistemas temporales, véase como ejemplo la limpieza química de los sistemas de caldera y precaldera, o las actividades de soplado de tuberías de vapor, son subcontratadas a una empresa especializada en estos servicios, es habitual que la documentación quede conformada por un conjunto de documentos que se vienen en denominar RAMS Exposición del Método y Análisis de Riesgos, de sus siglas en inglés, los cuales incluyen normalmente una evaluación de riesgos que puede ser usada como referencia complementaria al análisis que se va a realizar sobre el proceso.

Una vez completados los pasos anteriores, el equipo entra a realizar de manera detallada la revisión y análisis de riesgos de cada uno de los pasos y tareas que conforman cada una de las actividades, proporcionando escenarios de análisis y evaluación de riesgos para cada uno de ellos mediante la técnica de la lluvia de ideas, (**Paso 4**). Para la evaluación se utilizará como referencia la matriz de riesgos, la cual es muy conveniente que sea la misma que ha sido utilizada en el proyecto y que el cliente ha considerado adecuada para los otros estudios y análisis de riesgos (QRA, HAZOP, EAC, u otros).

Si el resultado de la evaluación del riesgo en el paso 4 es menor de un valor determinado, el cual será fijado por el equipo de revisión, por ejemplo un valor de 5, como se ha indicado en el grafo de la Figura 6.1., como umbral aceptable de riesgo, el equipo continuará con el siguiente paso del

procedimiento y de manera reiterativa continuará con los siguientes hasta finalizar el procedimiento.

Si el riesgo encontrado es igual o mayor de 5, el equipo evaluará en detalle el escenario peligroso que se ha identificado en este paso. Para la evaluación detallada utilizará un conjunto predeterminado de palabras guía, las cuales se relacionan y justifican en el apartado 6.5.2.2. Las palabras guía sugeridas en esta tesis, pueden obviamente ser adaptadas y ampliadas por el equipo de revisión si así lo consideran por el proceso analizado. Se ha buscado disponer de suficientes escenarios y palabras guía que favorezcan el análisis de modo que pueda ser convenientemente estructurado, pero permitiendo al mismo tiempo proporcionar la flexibilidad buscada.

En la evaluación se determinarán las medidas de mitigación disponibles en el proceso y en caso de no ser suficientes, se propondrán otras de modo que el nivel de riesgo disminuya hasta un valor aceptable.

El proceso continuará con los pasos 6 y 7 para finalizar el proceso estudiado, el cual habitualmente se revisa utilizando el procedimiento de ejecución incluido en la Exposición de Métodos, de modo que se complete el sistema objeto de análisis.

Utilizar el procedimiento de ejecución de tareas para la realización de las actividades objeto de análisis no es mandatorio; es decir, se puede proceder con la revisión si el equipo así lo decide aunque no se disponga o no parezca adecuado usar el procedimiento de ejecución.

Es fundamental por otra parte disponer de un sistema de gestión del cambio y de verificación de la implementación de las acciones que surgen como resultado de la aplicación del método, para disponer en todo momento del estado real de la instalación sobre la que se está realizando el estudio.

En el capítulo 6.5., se proporciona el procedimiento detallado incluyendo formatos sugeridos para la ejecución del análisis, el cual se aplicará en algunos procesos de sistemas temporales en el capítulo 7.

6.3 Tipos de resultados y estimación de recursos

Se obtendrán resultados de cada una de las etapas que conforman el proceso.

Como resultado de la etapa 1, se obtendrán Listas de verificación cumplimentadas con los resultados obtenidos de cada una de las iteraciones que hayan sido necesarias hasta obtener los resultados satisfactorios que permitan acceder a la siguiente etapa.

La etapa 2 proporcionará resultados en formato similar al que se obtiene de los análisis What-If o SWIFT. Se obtendrán tablas que incorporarán las entradas y las salidas, las cuales conforman los resultados del análisis.

Las entradas constarán de los pasos del procedimiento y actividades sobre las que se realizan las preguntas necesarias para el análisis, es decir las preguntas incluyendo las palabras guía tabuladas adecuadamente. Los pasos del procedimiento y actividades que debe realizar el operador se relacionaran secuencialmente y sobre cada una se realizan las preguntas en base a las palabras

guía preseleccionadas que constituyen la estructuración ordenada del análisis. Se anotarán los resultados obtenidos sobre la misma tabla que se utiliza como herramienta de trabajo por el equipo de análisis. Si se requiere realizar algún tipo de croquis, cálculos que apoyen alguna hipótesis de fallo o proporcionen alguna clasificación adicional de peligros se incorporarán separadamente con llamadas mediante notas al margen de la tabla.

Cuando se evalúe separadamente con el nivel de detalle requerido algún escenario que se ha encontrado peligroso, se recurrirá a tabular el análisis realizado sobre el escenario evaluado utilizando formatos de tabla similares a los que se proporcionan en las referencias que se han venido manejando en la presente tesis[43], [57] o [46]. En los capítulos siguientes se proporcionan los formatos propuestos y el procedimiento de trabajo sugerido para la evaluación. Por el momento será suficiente mencionar que la tabla deberá incorporar al menos una descripción del escenario evaluado, las causas que pueden conducir a dicho escenario, así como las consecuencias esperables para cada una. Se identificarán en detalle las salvaguardas que se han previsto para mitigar el riesgo identificado y las recomendaciones que realiza el equipo de análisis para reducir el riesgo en caso de resultar necesario.

El Comité de Seguridad para la Puesta en Marcha de la Planta nominará los integrantes del equipo de análisis y evaluación de riesgos para los sistemas temporales.

Como ya fue apuntado en capítulos precedentes, la constitución de un **Comité de Seguridad** que asista a la Dirección de las Pruebas y a la Dirección del proyecto y a los especialistas durante la etapa de puesta en marcha de la central es una práctica recomendable para la prevención de riesgos durante una de las etapas más peligrosas del ciclo de vida del proyecto, pudiendo ser extendido por la propiedad para el resto de la vida útil de la central, mediante la designación por la propiedad de integrantes equivalentes, que actuarán como interlocutores para la resolución de conflictos relacionados con la seguridad durante esta etapa y otras posteriores, si así se considera.

El Comité de Seguridad para la Puesta en Marcha estará constituido, sin ser limitativo por las siguientes personas:

- Responsable de Ingeniería. Debe ser conocedor en profundidad de la tipología de la planta que se está poniendo en servicio. Es muy conveniente además que haya estado en contacto con los especialistas durante la etapa de diseño de detalle de la planta, siendo conocedor de las decisiones más importantes que se han tomado durante la etapa de ingeniería, pero idealmente no ha formado parte del equipo de proyecto.
- Responsable de Construcción, que conocerá en detalle los procedimientos de construcción así como las particularidades de las posibles subcontratas que participan en la puesta en servicio. Igual que el responsable de ingeniería puede haber participado de las decisiones importantes que afectan a la construcción de la planta.
- Responsable de HSE, quien será conocedor de la política de HSE de la compañía a nivel corporativo, así como a nivel operativo en su aplicación a los proyectos y obras.
- Responsable de Comisionado, quien será conocedor de los procedimientos operativos para el precomisionado, comisionado, puesta en servicio y entrega de la planta al cliente.

Los integrantes del Comité de Seguridad, idealmente, deben ser independientes del proyecto y disponer de una experiencia acreditada en su campo de conocimiento dentro de la compañía de tal modo que, conocen perfectamente, además de la tipología de la planta, los procedimientos operativos de la compañía que actúa como contratista principal del proyecto de construcción de la central. Deben disponer de rango suficiente para que el juicio que emitan sobre la puesta en marcha no sea puesto en tela de juicio por el equipo que dirige el proyecto y sus recomendaciones e informes se atiendan con diligencia por las partes afectadas.

El Comité de Seguridad no tiene por qué residir en el sitio, puede atender varios proyectos y visitar las instalaciones en caso de ser necesario, bien para la toma de datos, para entrevistas o verificaciones en campo o para reuniones con los equipos de pruebas en planta o con el cliente, en caso de resultar conveniente. Entre sus atribuciones se encuentra la selección de los sistemas temporales críticos desde el punto de vista de la seguridad y que serán sometidos a análisis para la seguridad de procesos, así como la designación de los especialistas que conformarán el equipo de revisión y la metodología aplicable en cada caso. Se podrá seleccionar cualquiera de los métodos que se han descrito o el que se describe en esta tesis, cualquiera de ellos deberá ser debidamente justificado ante la dirección del proyecto.

El equipo de especialistas que realizará las labores de evaluación de riesgos para los sistemas temporales, serán nominados por el Comité de Seguridad de común acuerdo con el equipo de proyecto y los departamentos técnicos de la compañía, eligiendo los mejores especialistas de los posibles para realizar las revisiones de diseño de seguridad. El equipo lo conformarán al menos, los siguientes especialistas:

- Un líder del equipo, el cual conocerá además de la tipología de plantas sobre las que se realizarán los estudios de evaluación de riesgos, la metodología de análisis de riesgos basados en escenarios. Dispondrá de amplia experiencia en la dirección de equipos multidisciplinarios y dispondrá de recursos para orientar y dirigir las reuniones técnicas de evaluación. Formará parte de su alcance también la evaluación de la documentación disponible antes de su estudio por los especialistas. Es posible que la compañía contratista principal de la realización y ejecución del proyecto no disponga de este perfil de alta especialización, por lo que como se ha discutido anteriormente con objeto de otros aspectos, es posible subcontratar dichos servicios a una tercera parte que proporcione este tipo de recursos.
- Un secretario, también denominado escriba en el ámbito de la seguridad de los procesos, el cual tiene como misión principal la elaboración de las actas de las reuniones, incorporando el resultado de las mismas. Debe disponer de conocimientos técnicos suficientes para poder incorporar no solo los resultados, sino la descripción de los escenarios, causas, consecuencias, salvaguardas y recomendaciones en términos lo más concisos posible.
- Un ingeniero de procesos altamente cualificado y con conocimiento detallado de este tipo de sistemas en la tipología de plantas de generación. Debe conocer además del proceso, las condiciones de operación y diseño de los equipos involucrados en los sistemas. Si se precisa, podrá ser conveniente la incorporación de un especialista de materiales o/y equipos específicos con los que trabajan los sistemas.

- Un ingeniero de instrumentación y control conocedor en profundidad de los sistemas de control y de las modificaciones temporales que se pueden o no realizar sobre los mismos, considerando la situación de la planta en el momento en el que se realizan las potenciales modificaciones sobre los sistemas de control y protección.
- Un especialista de HSE, el cual es muy conveniente que haya participado en el proyecto y conozca los detalles de las evaluaciones de riesgos realizadas, como pueden ser los estudios HAZID, HAZOP u otros habituales en este tipo de plantas.
- Un ingeniero de sistemas de puesta en marcha encargado de la ejecución de los sistemas temporales que se estén analizando. Si el alcance se divide entre diferentes especialistas, participarán en cada reunión/sesión y estudiará la documentación cada uno de ellos. Cuando el sistema temporal ha sido objeto de subcontratación a una empresa especializada (limpieza química, soplado de tuberías u otros), normalmente el ingeniero de puesta en marcha se encuentra en contacto con los especialistas que realizarán la ejecución de las pruebas y del propio sistema temporal, por lo que su participación es determinante para aclarar/resolver todas las dudas que surjan al equipo de análisis, actuando como interlocutor con dicha compañía subcontratada.
- Dependiendo de la modalidad del contrato es posible que al equipo se sume algún responsable de operación y mantenimiento de la planta para conocer y disponer del conocimiento futuro sobre las actuaciones y detalles que pueden resultar necesarios en caso de requerirse la repetición en la vida útil de la central.
- La incorporación de otros especialistas como un especialista eléctrico para revisar las alimentaciones temporales, cuadros de distribución y paneles temporales de mando puede ser recomendable en determinados momentos de la evaluación. También otros especialistas como comentados antes, materiales o de equipos que aporten su punto de vista sobre determinados aspectos muy concretos de la evaluación de riesgos.
- En ocasiones el responsable de comisionado de planta, así como el responsable de comisionado de “Home Office”, suelen participar en el equipo de revisión.

Por supuesto, en caso de surgir dudas en el proceso de evaluación sobre algunos aspectos de detalle la incorporación de especialistas que han estado involucrados en la etapa de ingeniería del proyecto se considera muy recomendable. En esto la compañía encargada del proyecto no debe escatimar recursos. Además este tipo de consultas pueden abrir otros escenarios que probablemente el equipo de especialistas puede no haber considerado, o en ocasiones, proporcionar un enfoque diferente.

Como es práctica habitual en este tipo de análisis, es conveniente proporcionar una estimación de los recursos en términos de horas hombre equivalentes requeridas para realizar la revisión de seguridad de los sistemas temporales. La tabla 6.1., proporciona una estimación bastante aproximada de los recursos necesarios para un sistema temporal, tanto para un sistema de complejidad baja como otro de complejidad alta.

Alcance	Recursos etapa estudio documentación / comentarios			Recursos reuniones		Totales (días)
	Nº Especialistas	Horas / especialista	Total horas document.	1ª reunión	2ª reunión	
Sistema complejidad baja/media	6	8	48	48 (1días)	24 (1/2 día)	2.5 (1/2 semana)
Sistema complejidad media/alta	8	16	128	128 (2 días)	48 (1 día)	5 (1 semana)

Tabla 6.1 Recursos Método de análisis de riesgos Sistemas Temporales etapa comisionado

6.4 Procedimiento

Para establecer de manera rigurosa el procedimiento a seguir para realizar el análisis y la evaluación de riesgos de los sistemas temporales durante la etapa de comisionado y construcción, se seguirán las etapas descritas por el Centro de Seguridad de los Procesos Químicos del AIChE en [43], donde una vez establecido el alcance y límites de batería del sistema temporal a evaluar, se estudian los tres grandes bloques siguientes, los cuales se han venido proponiendo históricamente para cada uno de los métodos de análisis propuestos:

1. Preparación de la revisión, incluyendo el alcance de la revisión y la documentación necesaria.
2. Procedimiento de análisis, estableciendo las reglas básicas para la revisión y las palabras guía recomendadas.
3. Documentar adecuadamente los resultados de la revisión.

En los capítulos siguientes se proporciona el análisis detallado de cada etapa, las cuales en conjunto, conformarán la metodología de análisis propuesta.

6.4.1 Preparación de la revisión

6.4.1.1 Definición del alcance

Para la aplicación de la metodología propuesta lo primero que debe ser claramente establecido es el alcance de la revisión que va a llevarse a cabo por el equipo de revisión. En términos prácticos en el caso de los sistemas temporales, el alcance se puede establecer de una manera bastante aproximada teniendo en cuenta el carácter precisamente temporal de las actividades y operaciones que se llevan a cabo, lo cual implica la determinación precisa de los límites de batería del sistema en cuestión.

Atendiendo a las modalidades de ejecución que se han visto en el capítulo anterior, si la modalidad seleccionada es mediante la contratación de una empresa especializada, los límites de batería habrán quedado claramente establecidos en el contrato para la realización de los trabajos. Será en este caso algo más sencillo delimitar el alcance de la revisión de seguridad a realizar, al estar acotados normalmente los límites de batería entre unas organizaciones y otras. De cualquier modo, hay que tener la precaución de revisar los límites de responsabilidad de cada parte con objeto de que no que no existan áreas sin cubrir. Los materiales y equipamientos que cada organización

suministra e instala en el sitio también debe ser considerado en el análisis y en la definición del alcance.

Si la elección del modo de ejecución no ha sido el anterior, sino que la misma empresa realiza el diseño y suministro de los equipos temporales como el resto de la instalación, en este caso es muy posible que se haya podido realizar la revisión en las etapas de diseño previstas con el resto de los sistemas, llevando a cabo los análisis HAZOP, EAC u otros. De no haber sido así, entonces habrá que prestar especial atención a la definición de los límites de batería entre los sistemas mecánicos, eléctricos y de I&C, que pueden verse involucrados en el establecimiento del alcance del sistema temporal, y consecuentemente del alcance de la revisión.

En cualquier caso, el encargado de establecer el alcance de la revisión a realizar y la documentación necesaria para que el equipo de revisión realice su trabajo con las garantías requeridas, es el líder del equipo. El líder del equipo consensuadamente con los especialistas que han participado en el diseño del sistema temporal y conjuntamente con los representantes del Comité de Seguridad, establecerá el alcance de la revisión, el número de sesiones y la documentación requerida necesarias para conseguir la efectividad buscada. Lo habitual es que el líder del equipo, en ocasiones con el escriba o secretario, se reúnan con los especialistas designados por la dirección de proyecto y por el Comité de Seguridad para revisar los detalles del alcance y particularidades de cada sistema temporal, antes de involucrar a los especialistas del equipo de revisión. Se trata de limitar al máximo las interferencias e ineficiencias en el trabajo de revisión. El número de reuniones y aclaraciones necesarias lo va dictando la experiencia a medida que en la empresa que ejecuta el proyecto va rodando el proceso.

Una vez que se han establecido los límites de batería del sistema, la documentación necesaria y se han planificado las actividades a realizar por el equipo para la realización completa del análisis del sistema o sistemas a evaluar, se comenzará con la revisión de la documentación del primer sistema temporal planificado. Para ello el líder y/o el escriba del equipo de revisión compilará la documentación y la enviará a cada uno de los especialistas del equipo de revisión.

La necesidad o no de realizar una reunión de lanzamiento de las actividades lo dictará la experiencia del equipo y la complejidad del sistema a evaluar, aunque es recomendable realizar una reunión inicial donde se fijen los términos generales y los criterios comunes para el análisis de riesgos del sistema o del paquete de sistemas a evaluar.

Dependiendo del estado de la planta en el momento en que se va a llevar a cabo las actividades relativas al sistema temporal, puede resultar conveniente que la reunión de lanzamiento se realice en el sitio, si a juicio de los especialistas y del Comité de Seguridad así se entiende. Realizar una revisión del estado de la planta antes del inicio de las actividades propias de la evaluación puede ser muy adecuado para entender las condiciones y limitaciones que se tendrán durante la ejecución de las tareas evaluadas. Actualmente con el estado de los sistemas de comunicación, esto ya no es tan determinante ya que de ser preciso mantener alguna entrevista con alguno de los operadores o responsables de las actividades en el sitio, se pueden realizar video conferencias según sea necesario o grabar algún video en planta y enviarlo al grupo de revisión para comprobar o verificar

el estado de algún equipo o conexión. La visita tiene algunas otras ventajas ya que permite a los integrantes recibir de manera directa las condiciones en las que se desarrollaran las actividades.

Pueden surgir preguntas adicionales a las que están previstas en los formularios y check list predefinidos como resultado de esta aproximación a la evaluación. Las entrevistas y visitas a la planta generan en el equipo de revisión certidumbres que de otro modo difícilmente se pueden alcanzar, aunque es cierto que no son determinantes para llevar a cabo una efectiva evaluación de riesgos en este tipo de sistemas, aunque si cobran más valor aquí que en otros casos.

También es muy conveniente que como paso previo al análisis de riesgos del sistema a evaluar, los especialistas del equipo de revisión dispongan de las referencias y estudios previos realizados en proyectos similares, de modo que puedan trabajar y profundizar sobre los aspectos más importantes que ya fueron detectados o resueltos en proyectos y estudios previos.

6.4.1.2 Documentación necesaria

Para realizar el análisis de riesgos de los sistemas temporales que se disponen durante la construcción de una central eléctrica con el método propuesto aquí, será necesario que el equipo de revisión disponga, al menos, de la siguiente documentación:

1. Alcance detallado del sistema, incluyendo listados con los puntos límites de batería y Ties del sistema. Aquí se proporcionará la lista de consumos y alimentaciones requeridas para el sistema. Se proporcionarán los datos de energía requerida, consumos de aire previstos, así como productos químicos a suministrar y cualquier otro insumo necesario para la ejecución adecuada de las actividades del sistema temporal.
2. Descripción del proceso en el que se basa el sistema temporal a implementar. Aquí se proporcionarán todos los detalles necesarios para que el equipo de revisión pueda entender los distintos aspectos y procesos sobre los que se basa el sistema. Si existen reacciones químicas en las que se basa el proceso y sobre estas se determina el uso de reactivos o productos, se incluirán someramente los cálculos sobre los que se basa el dimensionamiento del sistema y de los equipos que lo componen. Se incluirán con claridad las condiciones de operación y diseño de los distintos modos en los que operará el sistema.
3. Diagramas de flujo así como P&IDs del sistema. Aquí se incluirán los circuitos temporales necesarios para la operación. Se identificarán los circuitos permanentes y los temporales así como los equipos que serán utilizados para la operación del sistema, tanto permanentes como temporales. También se incluirán los límites de batería de cada
4. Listado y Hojas de Datos de los productos químicos que se utilizarán en el proceso del sistema temporal. Hojas de Datos de Seguridad de los productos (SDS). Preferentemente las SDS de los productos se proporcionarán en el formato oficial del país donde se está realizando la obra, o en su defecto de organismos internacionales europeos o americanos y siempre de acuerdo con las prácticas habituales del suministrador del producto.
5. Listado y Hojas de datos de los equipos que componen el sistema. Se proporcionarán las características principales de los equipos que se van a utilizar, así como las necesidades de

energía y consumibles requeridos. Se prestará atención especial a la operación de los equipos y a las condiciones de trabajo de los mismos.

6. Planos de disposición de equipos y arreglos generales donde se muestre la localización e implantación prevista de los equipos y componentes que conforman el sistema temporal. Se trata de disponer de información relativa a los accesos y a otras condiciones que pueden limitar o condicionar en términos de seguridad la operación del sistema y de los equipos implicados en cada modo de operación.
7. Planos isométricos y/o planos de composición de tuberías del sistema. Es muy importante que en esta documentación quede establecido el alcance de la instalación temporal y su interconexión con la permanente.
8. Listado de materiales que se incluyen en el sistema temporal. Hojas de datos de tuberías y/o componentes en el caso de incluir alguna no prevista en el proyecto. Es recomendable también listar las necesidades de equipos que formen parte del equipamiento permanente del sistema cuando así sea requerido. Esto favorece la identificación errores en las condiciones de diseño de unos equipos y componentes y de otros favoreciendo la revisión.
9. Procedimiento de ejecución del sistema. Aquí se incluyen, al menos, los siguientes:
 - a. Procedimiento de llenado del sistema. Considerando las condiciones iniciales del mismo.
 - b. Procedimiento de arranque.
 - c. Procedimiento de operación normal y de emergencia.
 - d. Procedimiento de parada.
 - e. Otros procedimientos.

Los procedimientos deben ser completos y estar estructurados en base a pasos de procedimiento que permitan establecer con claridad las necesidades y condiciones necesarias para ejecutar el paso, indicando asimismo con la mayor claridad las condiciones para establecer el paso cumplido y poder proceder con la ejecución del siguiente. En ocasiones los procedimientos se elaboran de manera genérica y no establecen con claridad las condiciones de paso y de paso cumplido, lo que puede favorecer el incremento del riesgo en el sistema.

Cuando el sistema temporal ha sido contratado a una tercera parte, es muy habitual que esta información se proporcione como parte de la “Exposición de métodos de la Evaluación de Riesgos del sistema” (RAMS). En estos casos normalmente se dispone adicionalmente de la siguiente documentación:

10. Evaluación de riesgos (Risk Assesment) del sistema. Aquí se incluyen las actividades habituales relacionadas con la instalación y manejo de productos químicos, así como las principales peligros y riesgos derivados de la operación. Normalmente esto se aborda desde una perspectiva relacionada con la salud laboral de los trabajadores y no tanto desde el punto de vista de identificación de peligros y análisis de riesgos relacionados con el proceso, de ahí la necesidad de disponer de metodologías complementarias a esta.

11. Procedimientos de análisis en caso de ser requeridos por las características del sistema en cuestión (por ejemplo para determinar un determinado parámetros del agua o del vapor en sistemas que proporcionan un grado de limpieza determinado).
12. Programa de puntos de inspección. Es posible que este programa, además de incorporar las inspecciones de las actividades del sistema, incorpore inspecciones durante la fabricación de piezas o componentes necesarios para el sistema.
13. Otra documentación que sea considerada relevante para que se realice con garantías la evaluación de riesgos por los especialistas. Por ejemplo condiciones ambientales en los que deben desarrollarse algunas pruebas, avisos a la población limítrofe con la planta o a las autoridades, etc.

Es importante que la documentación se encuentre en el estado final, después de la revisión que se ha realizado por el equipo de ingeniería. Idealmente, la información debería estar en la condición “según construido”, de modo que la documentación del sistema refleje el estado final de la instalación y de los equipos y componentes del sistema. Dado que esto es complejo y no en todas las instalaciones es posible cumplir, al menos debe considerarse que la documentación sobre la que se realizará la evaluación de riesgos este en un estado lo suficientemente avanzado y con un grado de diseño completo. Si existe algún pendiente que debe ser resuelto, pero que no impide la ejecución de las actividades del sistema, este debe estar perfectamente identificado por todos los interesados.

Por otra parte, como ya se indicó en el capítulo precedente, disponer de la documentación de otros estudios previos realizados sobre sistemas temporales similares en otra planta es otra de las propuestas recomendable. Permite que el equipo de revisión centre sus esfuerzos en los aspectos más relevantes para la seguridad y pueda resolver los aspectos menos relevantes recurriendo a como se resolvió en el pasado.

Resulta evidente que dependiendo del proceso y del sistema temporal analizado, así como de las condiciones de contorno en las que se va a realizar la ejecución de las tareas, la documentación necesaria podrá ser ajustada y adaptada a las necesidades concretas y al diseño del propio sistema temporal.

6.4.2 Procedimiento de análisis. Reglas y palabras guía recomendadas.

Una vez que el equipo de trabajo ha sido formado, la documentación y el alcance de la revisión ha sido establecido, los especialistas procederán con el estudio de la documentación de manera individual verificando, por un lado, que la propia documentación se encuentra en un estado lo suficiente avanzado como para proceder con la evaluación de riesgos y, por otro, que la planta, también se encuentra en el grado de avance requerido como para llevar a cabo las actividades del sistema temporal. Este análisis se recomienda que se realice de modo independiente por cada especialista y en una primera reunión se pongan en común las conclusiones alcanzadas por cada miembro del equipo.

El líder del equipo se encargará de convocar la reunión y la dirigirá convenientemente para llegar a una conclusión. De esta primera reunión el equipo podrá concluir:

1. El estado del sistema y la documentación se encuentran en un estado **aceptable** para proceder con el análisis de riesgos, o
2. El estado del sistema y/o la documentación **no** se encuentran en una estado **aceptable** que permita proceder con el análisis de riesgos.

En el primer caso, el equipo procederá con la evaluación de riesgos. En el segundo se consensuarán los comentarios a la documentación que se entregarán al equipo de proyecto para que proceda a su corrección con objeto de proceder con el análisis de riesgos en el menor plazo posible. Se puede entender con facilidad lo negativo para el proyecto de esta segunda situación, ya que una vez que las actividades han sido lanzadas la corrección debe realizarse a la mayor brevedad para que el impacto en el cronograma del proyecto sea el menor posible. El equipo de proyecto debe evitar que esto se produzca tomando las acciones preventivas necesarias con antelación suficiente. Téngase en cuenta que en estas condiciones todavía no se han obtenido resultados directamente relacionados con la seguridad del sistema y los peligros asociados y sin embargo el cronograma del proyecto ya se ha podido ver afectado.

Es muy conveniente por tanto, que la documentación y el estado de la planta sean revisados lo antes posible para evitar al máximo el estrés derivado de estas situaciones para los involucrados, ya que esto no favorece el clima adecuado para la necesaria reflexión, el estudio y la toma de decisiones.

Si la situación ha sido la derivada del caso 2, será el líder del equipo junto con el escriba el responsable de obtener del equipo de proyecto las condiciones adecuadas para que pueda procederse con el análisis de riesgos. Los especialistas no deberían ser convocados hasta que sus comentarios no se encuentren resueltos. Se evitará en la medida de lo posible que los especialistas traten directamente la resolución de los comentarios. Eso debe realizarlo el equipo de proyecto o en todo caso el líder del equipo o el escriba se encargarán de intermediar para su resolución.

Una vez que se obtengan las condiciones adecuadas, se procederá con el análisis de riesgos, según se detalla en el apartado 6.5.2.2.

6.4.2.1 Verificaciones previas

El equipo de revisión valorará el estado del sistema para proceder con el análisis de riesgos. Se procederá con la verificación atendiendo a los siguientes aspectos principales:

1. Aspectos relacionados con la seguridad e higiene en el trabajo
 - Sistemas auxiliares necesarios para operar el sistema perfectamente identificados y disponibles en planta.
 - Requisitos de HSE identificados.
 - Medios de protección personal (EPIs) identificados y disponibles en planta para su uso.
 - Medios de comunicación identificados, disponibles y operativos.
 - Accesibilidad a la zona de maniobras adecuada y medios de iluminación también adecuados.
 - Permisos de trabajo emitidos.

- Estudios de seguridad de riesgos (JSA u otros) se han realizado y se encuentran implementadas las medidas de control y mitigación de riesgos requeridas.
- Se han realizado los cursos de capacitación para el personal que atenderá las maniobras.
- Se encuentran identificados y preparados los sistemas de bloqueo y etiquetado (LO&TO) y se han realizado las charlas de seguridad.
- El área se encuentra señalizada y con las barricadas necesarias instaladas.
- El control de accesos y la vigilancia de la zona de maniobras se encuentra implantada.

2. Aspectos relacionados con los sistemas de emergencia

- Los sistemas de control involucrados en la operación y protección del sistema se encuentran operativos.
- La alineación de válvulas para la operación del sistema se encuentra establecida.
- En caso de requerirse válvulas de seguridad, éstas se encuentran correctamente ajustadas y operativas.
- Están identificadas las instrucciones de emergencia para su aplicación en caso de ser necesario durante la operación del sistema.
- El personal de operación que realizará las maniobras conoce las operaciones de emergencia aplicables en las diferentes situaciones que pueden producirse durante la operación.
- Los sistemas de emergencia están operativos. En este caso es necesario confirmar que sistemas como protección contra incendios del área donde se realizan las maniobras, sistemas de megafonía, comunicaciones personales, etc., se encuentran totalmente operativos durante las operaciones requeridas.
- El nivel de ruido durante las maniobras es adecuado para los sistemas de comunicaciones previstos. Se dispone de medios de comunicación alternativos en caso de imposibilidad de comunicación por los medios previstos.
- Las responsabilidades de los participantes están claramente definidas.

3. Aspectos relacionados con la operación del sistema

- Definición de las operaciones a llevar a cabo en el sistema.
- Identificación de los equipos necesarios para la ejecución de las operaciones requeridas así como su alineamiento en planta.
- Definición de las operaciones automáticas y manuales en el procedimiento.
- Grado de conocimiento de los operadores de las operaciones automáticas y de los enclavamientos del sistema.
- Temporalidades necesarias requeridas en el sistema. Definición y recursos disponibles en planta. Identificación de las deficiencias en caso de que existan. Alternativas.
- Identificar si se necesita realizar algún proceso secuencial paso a paso. En caso de requerirse, verificar que se encuentran correctamente identificados los pasos de secuencia y que también

se encuentran identificados los criterios de cumplimiento de paso. En procesos secuenciales, es muy conveniente, al menos para pasos determinantes del proceso, conocer cómo actuar en caso de que no puedan ser cumplidos.

- Están identificadas correctamente las áreas desde donde se realizarán las maniobras, sala de control, paneles de operación local, ubicaciones locales, etc.

La verificación se realizará para las operaciones habituales del sistema tales como:

- Llenado inicial del sistema.
- Arranque del sistema.
- Parada del sistema.
- Operación normal.
- Vaciado del sistema.

En el anexo 2 se incluyen formatos de Listas de Verificación para los casos descritos aquí. La Figura 6.2. muestra uno de los formatos previsto.

System	xxxxxxx	Hazard evaluation			Company logo	
Code Number	xxxxxxx					
SubSystem	N/A	Cod/Equipment Description			Document Attached	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Drawing or Procedure:	Unit:	Method:			Doc. Type:	
xxxxxxxxxxxxxxxx	xxx	Structured What If /Check List			xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	
Llenado Inicial del sistema						
Description	Yes	No	N/A	Remarks		
¿Esta marcado el alineamiento inicial de válvulas en los P&IDs?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
¿Esta listada la alineación inicial de válvulas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
¿Están claramente identificadas las operaciones manuales que realizarán los operadores?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
¿Están claramente identificadas las operaciones automáticas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

Figura 6.2.- Formato Lista de Verificación.

6.4.2.2 Procedimiento de análisis. Reglas básicas

La revisión se basará en la técnica de la “tormenta de ideas” o brainstorming mediante reuniones de revisión que serán atendidas por los especialistas designados por el Comité de Seguridad de acuerdo con la dirección del proyecto y los departamentos técnicos de la compañía.

La técnica de la tormenta de ideas estará basada en escenarios y será la misma que la que viene siendo utilizada con éxito para otros análisis de riesgos como el HAZOP o el propio análisis What-If.

Las reuniones de revisión comenzarán con una explicación básica del proceso, la cual será proporcionada por el procesista designado al efecto o por el líder del equipo, quién dará al resto de las claves principales que serán recomendadas para ser atendidas por el equipo de revisión. Esta presentación será breve y estará enfocada a los aspectos relacionados con la seguridad y los procedimientos de operación incluidos en el sistema. Los miembros del equipo ya conocen las particularidades del sistema, no se olvide que han estudiado y comentado previamente la documentación por lo que la presentación deberá ser lo más objetiva posible y mostrará los circuitos previstos para el sistema temporal y la organización del mismo.

El enfoque de la revisión se centrará principalmente en los procedimientos descritos para realizar las operaciones requeridas en el sistema, operaciones de puesta en marcha, arranque y parada del mismo. Se identificarán y evaluarán escenarios de incidentes directamente asociados con los modos de operación y, específicamente se buscará la respuesta del operador ante dichos escenarios. El análisis se enfocará, además del diseño del sistema en cuanto a la identificación de las salvaguardas previstas para mitigar las consecuencias de los escenarios peligrosos analizados, en los aspectos relacionados con los factores humanos que pueden hacer que las operaciones sean aún más peligrosas. Hay que tener en cuenta el carácter temporal de los sistemas en cuestión, lo que necesariamente hace que en ocasiones, muchas de las acciones involucren a decisiones del operador, lo que necesariamente obliga a centrar el estudio en sus reacciones y posibles errores del mismo a la hora de evaluar los diferentes escenarios. Además las salvaguardas previstas pueden no resultar tan determinantes como en otros procesos, precisamente debido al carácter temporal de las instalaciones. No es lo mismo implementar un enclavamiento en el sistema de control para evitar una situación peligrosa, que la implementación del enclavamiento en el sistema pase por una modificación temporal al mismo, o incluso realizarla de manera independiente al propio sistema de control. Incluso, es posible, que las salvaguardas estén inhabilitadas en determinados modos de operación, precisamente para permitir la operación fuera de rango del sistema en las condiciones buscadas.

El análisis buscará la vulnerabilidades del sistema y se centrará en el análisis de situaciones “que pasa si...” buscando el potencial error del operador ya sea en la ejecución de un determinado paso de secuencia, en la no ejecución del mismo o en otras circunstancias que puedan ser identificadas por el equipo de revisión. Aunque el método propuesto estructura el proceso de análisis y busca la efectividad de las preguntas y escenarios de trabajo propuestos por el equipo, no se trata de “limitar” la creatividad del mismo, si no de estructurar la revisión, de manera que la experiencia de los miembros determinará la ampliación de los escenarios en función de la complejidad o riesgos identificados durante la reunión de evaluación. Como ocurre con otros métodos de análisis, no es conveniente que las reuniones superen las 4-6 horas de trabajo diarias y tampoco es recomendable extender las reuniones para un sistema temporal más allá de 2-3 días a la semana. Si se necesita más tiempo es mejor parar y continuar la semana siguiente planificando, en caso de que algún asunto se haya complicado más de lo previsto, intercalando la revisión de otro sistema, o iniciando otras actividades que permitan tomarse el tiempo necesario.

La propuesta metodológica aquí descrita considera que la reunión se desarrolla con un guion preestablecido, incorporando sobre el formato de evaluación los pasos de procedimiento los cuales serán evaluados en base a escenarios de trabajo predefinidos. La definición de los escenarios se conseguirá mediante la utilización de determinadas palabras guía.

El líder del equipo evaluará la conveniencia de subdividir los pasos de procedimiento en otros menores si la complejidad del proceso o del análisis así lo requiere. El líder también incitará a los miembros del equipo de revisión a incluir otros escenarios en caso de que la evaluación así lo requiera, pero en términos generales, el líder moderará la reunión con idea de que los evaluadores se atengan lo más posible a los escenarios previstos.

Cuando se evalúe un procedimiento este se encontrará subdividido en pasos. El equipo evaluará el procedimiento completo de manera continua de principio a fin. No es conveniente interrumpir o alterar la lógica del procedimiento, salvo que el escenario encontrado así lo recomiende.

Para cada paso del procedimiento el equipo evaluará de acuerdo con las palabras guía el escenario resultante de la aplicación de las preguntas clave “¿qué pasa si...?” o ¿Cómo podría...?”, afectar la omisión de un paso al proceso, realizar incorrectamente el paso al proceso, o en otro supuestos, si la presión o la temperatura obtenida o regulada en el paso es mayor o menor de la prevista. El equipo establecerá de acuerdo con una criterio simple de categorización la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias en una escala de 1 a 5 tal como muestran las Tablas 6.2. y 6.3.

Valor	Descripción	Valores de referencia para la estimación
1	Muy Improbable	Posibilidad de ocurrencia extremadamente remota
2	Poco Probable	Evento raro . No es probable durante la ejecución.
3	Ocasional	Evento poco frecuente que puede ocurrir durante las operaciones pero solo de vez en cuando.
4	Probable	Evento que ocurrirá con probabilidad durante la ejecución.
5	Frecuente	Es probable que ocurra durante la ejecución.

Tabla 6.2.- Probabilidad propuesta para la evaluación del riesgo.

Valor	Descripción	Personas	Medioambiente	Equipos
1	Despreciable	Ligero - Lesión de primeros auxilios	Daño leve: pero no al medioambiente	Daños menores al equipo: sin retraso en las operaciones
2	Menor	Lesión leve: sin efectos irreversibles	Daño menor al medio ambiente	Daños menores al equipo: hasta 1 día de retraso en las operaciones
3	Sgnificativo	Lesión grave: discapacidad permanente y efectos sobre la salud	Daño al medio ambiente con contaminación in situ moderada	Daños importantes en el equipo: varios días de retraso en las operaciones
4	Severo	Muerte (1-2): múltiples lesiones graves / discapacidad permanente	Daños mayores con contaminación significativa fuera del sitio	Daños importantes al equipo: pérdida prolongada de operaciones.
5	Catastrófico	Varias muertes / varias lesiones graves fuera del sitio.	Daños extensos: contaminación externa importante y sostenida	Impacto masivo: pérdida total de la unidad principal de la planta.

Tabla 6.3.- Estimación de las consecuencias para la evaluación del riesgo.

Con los valores obtenidos para la probabilidad y para las consecuencias del escenario de riesgo identificado se obtendrá el producto de ambas magnitudes el cual, en base a la matriz de riesgos, proporcionará la estimación final del valor del riesgo identificado en el escenario evaluado. La Figura 6.3. muestra la matriz de riesgos propuesta aquí.

CONSECUENCIAS	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25
		1	2	3	4	5
		PROBABILIDAD				

Figura 6.3.-Matriz de riesgos.

La matriz de riesgos habitualmente usada es la matriz de riesgos del proyecto, la cual debería ser simplificada para que el equipo de revisión pueda establecer rápida y eficazmente el nivel de riesgo preliminar identificado con objeto de “filtrar” aquellos escenarios realmente peligrosos o que pueden resultar siéndolo.

En el formato de la Figura 6.4. se muestra como ejemplo el resultado de la revisión.

System		xxxxxxx		Risk evaluation				Company logo								
Code Number		xxxxxxx						Project name								
SubSystem		N/A		Cod/Equipment Description				Document Attached Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>								
Drawing or Procedure:		Description:		Method: Structured What-If/Check List (SWIF/CL)				Doc. Type:								
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx		xxx		Guide words procedure Part I.- Risk evaluation				xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx								
Activity:		Description:														
Step	Step Description	Omission of the Step			More than / Less than			Before / After			Step exectd in a wrong order			Action executed wrongly		
		P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK
X.X.X.	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	1	1	1	1	5	5	5	5	25	X	X		X	X	
X.X.X.	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	1	1	1	1	5	5	5	5	25	X	X		X	X	
X.X.X.	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	1	1	1	1	5	5	5	5	25	X	X		X	X	

Figura 6.4.- Hoja de revisión con ejemplos de niveles de riesgo identificados.

Se puede observar que en la no ejecución de un determinado paso del ejemplo mostrado, el equipo ha observado valores de 1 tanto para la probabilidad de ocurrencia como para las consecuencias de su omisión, lo que ha dado como resultado un valor de riesgo igual a la unidad, lo que se traduce en un nivel de riesgo también igual a la unidad y se ha marcado visualmente de color verde para su rápida identificación en el documento de resultados de la evaluación.

En los otros casos ejemplo indicados, los resultados se muestran en color ámbar y rojo indicando también el producto de los valores de P y C de la matriz.

Con la evaluación de riesgos realizada para los pasos de secuencia del procedimiento, el equipo procede entonces a evaluar el detalle de aquellos escenarios identificados de riesgo medio y alto despreciando aquellos que tienen riesgo bajo, los de color verde de la Figura 6.4., por seguir con el ejemplo anterior.

Para la evaluación detallada de riesgos de cada escenario evaluado preliminarmente se seguirá el formato habitual de la técnica que pasa si habitual y recomendada por [43], entre otros.

System		xxxxxxx		Hazard evaluation				Company logo					
Code Number		xxxxxxx		Project name									
SubSystem		N/A		Cod/Equipment Description				Document Attached Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>					
Drawing or Procedure:		Unit:		Method: Structured What-If/Check List				Doc. Type:					
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx		xxx		Guide words procedure Part II				xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx					
Node:		Description:											
Item	Deviation	Causes			Consequences			Safeguards			Recommendation		
1													

Figura 6.5.- Formato de evaluación de riesgos de escenarios riesgo medio o alto.

El análisis de la evaluación de peligros, sus causas, las consecuencias y las salvaguardas previstas en el diseño para mitigar los daños potenciales se deben evaluar detalladamente para cada uno de los escenarios identificados en el análisis y evaluación de riesgos preliminar que realizó el equipo de revisión.

El momento en el que realizar este análisis detallado, queda a la elección del líder y del equipo de revisión, sin embargo, se recomienda realizarlo inmediatamente después de la identificación del nivel de riesgo para cada escenario de incidente evaluado en el análisis preliminar por el equipo de revisión. También es posible que la primera sesión se dedique a la revisión preliminar y la segunda y siguientes a la revisión detallada, aunque como se ha indicado se recomienda intercalar una y otra para que los argumentos que sirven para la categorización preliminar sean puestos en valor y evaluados inmediatamente después, con las salvaguardas de que dispone, detalladamente el diseño del sistema o equipo evaluado.

Para la realización correcta del análisis es recomendable atender las pautas generales que se proporcionan en la bibliografía [43], [57] o [80] entre otros. Entre dichas pautas generales pueden encontrarse las siguientes:

1. Definir con claridad el estado inicial del sistema
2. Acotar cada paso del procedimiento. Confirmar que es realmente un paso y no varios. En este caso, subdividirlo como corresponda.
3. Identificar las acciones individuales de cada tarea que debe ser realizada por el operador, estén o no indicadas en el procedimiento.
4. No analizar los pasos del procedimiento que se enuncian como “verificar, comprobar, inspeccionar...”, ni tampoco aquellos cuya consecuencia es “omitir un nivel de protección...”. No necesitan análisis, solo tienen que ser tomados en consideración para que el análisis de las salvaguardas establezca el nivel real de las mismas.
5. Disponer de toda la documentación y del histórico de los análisis previos.
6. Dividir los pasos en acciones que comiencen con verbos activos.
7. Aplicar las palabras guía directamente a cada acción
8. Estudiar los procedimientos de arranque, parada y operación normal de manera separada y remitir cuando proceda a análisis y evaluaciones ya realizadas que normalmente se repiten.
9. Estudiar si las mejores prácticas del procedimiento limitan la probabilidad del error humano, en caso contrario discutir los procedimientos que pueden mejorarlo, en términos de dotación de personal, interfase hombre máquina (HMI), formación del trabajador, certificación, etc.
10. Revisar el estado de los métodos de trabajo, tales como permisos de trabajo, LOTO, bloqueos, etc.

6.4.2.3 . Palabras guía

La metodología toma las bases del análisis de riesgos basados en procedimientos. En el análisis de los posibles escenarios de incidentes asociados con los procedimientos ya se ha visto que es habitual evaluar las consecuencias de errores humanos durante la ejecución de un paso, la no ejecución del mismo o su realización fuera del paso de secuencia asignado. También es habitual

evaluar el fallo de alguno de los equipos de que consta la instalación y como se ha previsto o no dicho fallo en los escenarios previstos por el procedimiento.

El Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos de EEUU dispone de la metodología HAZOP aplicada a operaciones basadas en procedimientos [43], la cual utiliza palabras guía diferentes a las que se usan en la metodología HAZOP para el análisis de riesgos para la seguridad de los procesos. En este sentido hay tres métodos principales para la realización del HAZOP de operaciones basadas en procedimientos:

- Estudio HAZOP aplicado a procedimientos que utiliza 7-8 palabras guía
- Método de las dos palabras guía, el cual normalmente es seleccionado para operaciones y tareas que no entrañan inicialmente riesgos altos.
- Método de lluvia de ideas “que pasa si...” aplicado a procedimientos, el cual es similar al que se desarrolla para operaciones y escenarios de riesgos para procesos continuos.

De acuerdo con lo indicado en [43], el 5% de los estudios HAZOP basados en operaciones de procedimientos se realizan mediante la técnica de las 7-8 palabras guía, el 55% aproximadamente se realizan mediante la metodología “que pasa si...” y el 40% restante por el método HAZOP de las dos palabras guía.

La metodología propuesta en esta tesis utilizará el método estructurado “Que pasa si...” SWITF con idea de guiar al equipo de revisión en los aspectos más determinantes del procedimiento y limitar el tiempo de revisión haciéndolo lo más efectivo posible. Para ello se ha previsto la evaluación de las siguientes situaciones o escenarios de incidentes, los cuales pueden ser debidos a la *omisión* de un paso, es decir, errores debidos a la no realización del paso, o a la *comisión* del paso, o lo que es lo mismo a su realización de forma incorrecta:

Palabras Guía	Significado de la palabra Guía
Omisión del paso	El paso no se realiza completamente o parte del paso no se realiza. Algunas razones incluyen que el operador se olvidó de realizar el paso, no entendió la importancia del paso o el procedimiento no incluyó este paso.
Exceso / defecto Mas que / menos que	La ejecución del paso del procedimiento se realiza incorrectamente aportando más/menos cantidad de la requerida. También puede entenderse como una acción realizada por exceso o por defecto, abrir al 35% en lugar del 20%... en el caso de 3 valvulas A,B y C que deben abrirse solo se abren 2 o se abren mas de las indicadas...
Antes / despues	Se realiza el paso antes o despues de lo requerido en el procedimiento. Por ejemplo se tiene que esperar un minuto y se realiza la acción antes de transcurrido el tiempo o despues...
Paso ejecutado en orden incorrecto	El paso del procedimiento se ejecuta en orden incorrecto, antes o despues de cuando es requerido o se realiza un paso posterior en este momento en lugar del paso previsto
Acción ejecutada de manera incorrecta	Puede ser como consecuencia de una incorrecta selección de un producto que dosificar, un material mal seleccionado, unas condiciones de trabajo incorrectas o un equipo incorrectamente alineado, por ejemplo un valor de presión de trabajo mal seleccionado o una bomba arrancada de manera incorrecta. También puede entenderse como una parte del paso ejecutado correctamente, no todo lo requerido

La Figura 6.6. proporciona el formato previsto, el cual se ha incluido también en el anexo 2 de esta tesis.

System	xxxxxxx	Risk evaluation						Company logo								
Code Number	xxxxxxx	Project name														
SubSystem	N/A	Cod/Equipment Description						Document Attached		Yes <input type="checkbox"/>		No <input type="checkbox"/>				
Drawing or Procedure:		Description:				Method: Structured What-If/Check List (SWIF/CL)				Doc. Type:						
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx		xxx				Guide words procedure Part I.- Risk evaluation				xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx						
Activity:		Description:														
Step	Step Description	Omission of the Step			More than / Less than			Before / After			Step exected in a wrong order			Action executed wrongly		
		P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK	P	C	RISK

Figura 6.6.- Formato evaluación de riesgos sistemas temporales basados en procedimientos.

6.4.3 Documentación de los resultados

La documentación adecuada de los resultados resulta clave no solo para transformar los hallazgos del equipo en medidas para la eliminación o reducción de peligros, sino para poder utilizar sus resultados en un futuro para siguientes sesiones e instalaciones. La documentación debe ser la que la compañía decida como la más adecuada a sus intereses y prácticas habituales. Algunas compañías requieren de un informe detallado de las acciones encontradas, para otras puede resultar suficiente una lista de recomendaciones explicando cada una de ellas.

A continuación se propone como parte del método propuesto los formatos de trabajo para recoger el escenario estudiado y los resultados de la sesión para cada uno de ellos. Se emplean los formatos de estudios ya consolidados al haber obtenido resultados exitosos en el pasado.

6.4.3.1 Formatos de trabajo propuestos.

En el Anexo 2 se proponen los siguientes formatos para desarrollar el método propuesto:

- Listas de Verificación
- Evaluación de riesgos por palabras guía (parte 1)
- Evaluación detallada de riesgos (parte 2)

Las Listas de Verificación propuestas se dividen de acuerdo con las etapas y áreas de estudio. Así se tienen Listas de Verificación para lo siguiente:

- Requisitos previos a la operación del sistema
- Llenado Inicial del sistema
- Arranque del sistema
- Operación normal del sistema
- Parada del Sistema

Todos tienen los mismos campos, una descripción del aspecto evaluado y su cumplimiento o incumplimiento. También se incluye la posibilidad de que para la aplicación o sistema estudiado el punto en cuestión no sea de aplicación.

Para la evaluación de riesgos por palabras guía (parte 1) se propone el formato ya mencionado anteriormente en la Figura 6.4 al describir el procedimiento de análisis. Aquí, se listan los pasos del procedimiento o las actividades requeridas y se evalúan una a una mediante la aplicación de las palabras guía preestablecidas. Para cada una de ellas se estima la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias. Para la estimación se utilizan índices, que en el método propuesto varían desde

1 hasta 5, obteniendo a continuación la estimación del riesgo por el producto de ambas magnitudes. Según los valores de riesgo obtenidos, se pasará a la realización del análisis detallado de la parte 2, o no.

Para la evaluación detallada de riesgos (parte 2) se toma como referencia el formato usado en otras técnicas de análisis de riesgos como el análisis que pasa-sí. Así se evalúa para cada uno de los aspectos encontrados en la parte 1 las desviaciones o escenario que ha sido encontrado que pueden resultar peligrosas, las causas por las que se pueden producir, cuales son las consecuencias más importantes de la desviación encontrada y cuales son las salvaguardas previstas en el diseño actual del sistema. Se evalúan todos los aspectos y se determina si el diseño del sistema permite llevar a cabo la operación segura del sistema o de la actividad evaluada. En caso contrario se proponen recomendaciones para incrementar los niveles de seguridad de las instalaciones.

Describir los cabeceros y los formatos para la etapa 1, Listas de Verificación y para la etapa 2...

6.4.3.2 . Ejemplos de uso

Se ha propuesto la aplicación de la metodología a tres sistemas temporales muy representativos en plantas térmicas. En el capítulo siguiente se desarrolla la aplicación del método a cada una de ellas, proporcionando los resultados obtenidos de manera resumida en el propio capítulo 7 y completo en los anexos 3 y 4.

Capítulo 7.

Aplicación de la metodología. Casos de estudio

7.1 Caso 1.- Sistema de limpieza química

7.1.1 Descripción del caso y documentación base para el análisis.

El caso de estudio presentado aquí corresponde a la limpieza química de una central térmica que puede ser considerada convencional en términos de equipamiento principal. Así, se determinó llevar a cabo la limpieza química tanto de la propia caldera, con sus circuitos internos de agua-vapor, como de los sistemas de alimentación de combustible líquido y sistema de agua de precaldera, que se corresponde con los sistemas de agua de alimentación y sistema de condensado.

Con objeto de aligerar el volumen de información y proporcionar circuitos sencillos de fácil comprensión, solo se aplicará el procedimiento al sistema de alimentación de fuel oíl de la caldera, dejando a un lado los circuitos de los sistemas de agua de alimentación a caldera así como de los propios de la propia caldera los cuales son más complejos y no aportan valor a la esencia de la metodología.

Como se describió en el capítulo 5, para completar el procedimiento de limpieza química de un circuito cualquiera es necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

1. Prueba de llenado y prueba de fugas.
2. Lavado inicial en circuito cerrado.
3. Limpieza química “Una fase” OPC.
4. Drenaje del sistema.
5. Enjuague final.

Antes de iniciar el primer paso y antes de reiniciar cualquier secuencia, se debe realizar una inspección del estado del sistema para garantizar que las conexiones entre el equipo temporal y las diferentes partes a limpiar se encuentran en perfectas condiciones y que la alineación de válvulas y otros elementos que constituyen el circuito es correcta.

1. Prueba de llenado inicial y prueba de fugas

El circuito deberá, en primer lugar ser llenado con agua desmineralizada. La procedencia del agua y su calidad no es muy determinante en esta etapa inicial ya que, probablemente, deba ser desechada y repuesta en diferentes fases del proceso, sin embargo si debe cumplir con unos mínimos estándares de calidad.

Se asegurará, asimismo, la estanqueidad de los circuitos de involucrados en la prueba, así como la correcta circulación de fluido a través de los diferentes tramos que integran el sistema a limpiar.

En el caso de que se detecten fugas en el circuito se procederá a su reparación y posterior reposición de agua.

El procedimiento para reparar las fugas consistirá básicamente en las siguientes acciones:

- a) Parar el proceso de llenado si la fuga es lo suficientemente importante
- b) Descomprimir el sistema
- c) Vaciar hasta detener la fuga,
- d) Reparar y

e) Finalmente, llenar de nuevo.

Una vez asegurada la estanqueidad del sistema, se comprobarán todos los equipos auxiliares de limpieza para garantizar que el funcionamiento es correcto.

2. Lavado inicial

Los circuitos de limpieza se enjuagarán con agua desmineralizada para eliminar la mayor cantidad posible de residuos sueltos antes de iniciar la limpieza química correctamente.

Habitualmente, los calderines de la caldera y los evaporadores se lavan primero drenándolos a la máxima velocidad, luego los circuitos individuales se descargan en circuito abierto en los calderines y luego se desechan.

En el procedimiento que se estudia aquí, se dispone de un depósito donde se drenarán todos los lavados iniciales de los diferentes circuitos y de ahí se dispondrá a un gestor autorizado que los retirará de la planta a vertedero autorizado.

Condiciones de operación del sistema

Con objeto de proporcionar los parámetros principales de trabajo en la Tabla 7.1 se incluye un resumen de los caudales, presiones y temperaturas esperadas durante las actividades de lavado y limpieza química de los diferentes circuitos de la planta. El caso que nos ocupa corresponde con la primera línea de la tabla.

Sistema	Ø	Línea / Equipo	Flujo req. para 1 m / s Ø en	Ø fuera	Flujo alcanzable	Bombas temporales	Presión esperada	Temperatura
Sistema de combustible ligero	10 "	00EGC10BR001	176 m ³ / h	1 x 4 "	+ 1 x 1 "2 x 2"	197 m ³ / h	250m ³ / h 3 x 7 - 12 bares	ET- 75 °C
Sistema de condensado	18 "	00LCA30 BR001	572 m ³ / h	2 x 6 "	2 x 4 "	890 m ³ / h	250m ³ / h 3 x 7 - 12 bares	ET- 75 °C
Sistema FW	dieciséis"	00LAB30 BR001	452 m ³ / h	> 2 x 4 "	1 x 8 "	> 452 m ³ / h	250m ³ / h 3 x 7 - 12 bares	ET- 75 °C
Entrada economizador	14 "	20LBA82 BR001	346 m ³ / h	1 x 8 "	4 x 6 "	791 m ³ / h	250m ³ / h 3 x 9 - 16 bares	ET- 75 °C
HP Steam	20 "	00LBA40 BR001	706 m ³ / h	1 X 14 "	4 x 6 "	2424 m ³ / h	250m ³ / h 4 x 9 - 16 bares	ET- 75 °C
Vapor CRH	26 "	20LBC01 BR003	1194 m ³ / h	1 X 14 "	1 x 16 "	2424 m ³ / h	250m ³ / h 7 x 9 - 16 bares	ET- 75 °C
Vapor HRH	34 "	20LBB01 BR003	2042 m ³ / h	1 X 14 "	1 x 16 "	2424 m ³ / h	250m ³ / h 7 x 9 - 16 bares	ET- 75 °C
Extracción de turbina # 5 turbobomba FW	10 "	00LBQ12 BR001	176 m ³ / h	1 x 14 "	+ 2 x 1 "2 x 2"	197 m ³ / h	250m ³ / h 7 x 7 - 12 bares	ET- 75 °C

* ET (temperatura ambiente)

Tabla 7.1.- Condiciones de operación del Sistema de limpieza química.

3. Limpieza química en una fase

Los circuitos se limpiarán mediante el proceso de limpieza denominado "Limpieza en una fase" (OPC- One Phase Cleaning), que consiste en llenar una vez cada circuito y a continuación realizar la limpieza química completa con los diferentes tratamientos para todo el sistema.

Con este proceso se consigue un ahorro importante de agua, así como de tiempo al evitar los enjuagues y vaciados tras cada tratamiento. Se realizarán las siguientes etapas para completar la limpieza completa:

A. Etapas desengrasado.

Se realizará tras el lavado inicial. Se procederá en pasos como sigue:

1. Una vez finalizado el lavado inicial, el sistema se calentará hasta aproximadamente 45 ° C.
Ver paso 8 de este mismo procedimiento.

2. Posteriormente, se inyectará al sistema los siguientes productos químicos que servirá como solución desengrasante:
 - Surfactante 0,05%
 - Sosa cáustica 0,25%
3. El proceso de calentamiento continuará hasta conseguir una temperatura de 60 ± 5 ° C. Durante esta etapa, los parámetros que se muestran a continuación serán monitoreados y registrados cada hora:
 - Temperatura
 - Alcalinidad
 - pH

B. Etapa ácida.

4. Cuando el proceso alcanza la temperatura adecuada 60 ± 5 ° C?, se detendrá el suministro de vapor y, a continuación se inyectarán los siguientes productos químicos para la etapa ácida:
 - Ácido cítrico 3%
 - Difluoruro de amonio 0,3%
 - Inhibidor de corrosión 0,2%

Durante esta etapa, los parámetros que se muestran a continuación serán monitoreados cada hora:

- Temperatura
- Acidez
- pH
- Fe³⁺
- Fe total disuelto
- Eficiencia del inhibidor

Durante la etapa ácida el pH de la solución circulante será de 3 a 4 unidades y se puede disolver de 7 a 8 g / l. La recirculación de la solución continuará en estas condiciones hasta que los parámetros de control se mantengan estables, especialmente el hierro total disuelto.

Cuando el hierro disuelto no cambia en un tiempo **no menor a dos horas** se procede como se indica a continuación:

C. Etapa de pasivación

5. Incrementar el pH a valores de 7 - 7,5 unidades mediante la adición de Hidróxido de Sodio. La introducción de reactivo debe hacerse lentamente para tener todos los circuitos neutralizados y homogeneizados.
6. Cuando todo el sistema alcance el pH indicado se inyectará el químico para la etapa de pasivación:
 - Nitrito de sodio 0,3%

En este paso, la temperatura estará comprendida entre 40 y 30° C.

Durante esta etapa, los parámetros que se muestran a continuación serán monitorizados y registrados cada hora:

- Temperatura
- pH
- Fe³⁺
- Fe total disuelto

La recirculación de las soluciones continuará en estas condiciones hasta que los parámetros de control se mantengan estables, especialmente el Fe³⁺ disuelto.

D. Etapa de drenaje

7. Una vez finalizada esta etapa, el sistema se drenará lo más rápido posible para eliminar posibles sólidos decantados al tanque temporal.

El vaciado se realizará al inicio por gravedad y utilizando las bombas temporales una vez por gravedad el vaciado pierde efectividad. Las partes inferiores del sistema que no se puedan drenar debido al cabezal principal se drenarán mediante una bomba neumática conectada a los desagües permanentes.

E. Consideraciones adicionales

8. Para calentar la solución se usará una caldera auxiliar que inyectará el vapor directamente en los colectores temporales, exactamente en el colector principal de retorno. La caldera auxiliar deberá cumplir con todas las normas de seguridad.
9. Además, en el colector de retorno principal se instalará una válvula de seguridad de presión nominal de 6 bar para evitar una sobrepresión en el sistema.

En ocasiones, esta medida de mitigación de riesgo para la seguridad de las operaciones ha sido una recomendación consecuencia de la revisión de seguridad realizada por los especialistas de acuerdo con este u otro procedimiento como el HAZOP.

10. El producto químico se agregará utilizando el tanque de mezcla temporal conectado al sistema de recirculación principal. El tanque de mezcla estará bajo supervisión todo el tiempo cuando esté en uso.
11. Adicionalmente, se instalará un contenedor tipo berma debajo del tanque de mezcla para prevenir cualquier tipo de fuga o derrame durante la dosificación.
12. Se podrán emplear dos maneras diferentes de realizar la dosificación de productos químicos:
 - i. Para productos químicos líquidos, la dosificación se realizará mediante una bomba neumática que succiona del tambor y descarga dentro del tanque de mezcla.
 - ii. El químico sólido se dosificará manualmente de pie fuera del tanque de mezcla y volteando los sacos dentro del tanque de mezcla.
Obviamente, los operarios llevarán todo el EPI necesario indicado en las Hojas de Datos de Seguridad del químico manipulado.

4. Enjuague final

1. Tras la pasivación, conviene realizar un aclarado de los sistemas con agua desmineralizada, tratada con 50 ppm de amoníaco.

2. Una vez llenado el sistema, se hará circular por un tiempo no menor a 30 minutos. Pasado ese tiempo, se vaciará a la máxima velocidad posible.

Se utilizará la documentación incluida en el Anexo 3, específicamente la que se refiere como Caso 1.- Sistema de limpieza química. En la documentación se ha incluido únicamente aquella que tiene relación con los sistemas y subsistemas estudiados aquí, habiéndose eliminado otra que por su volumen no aporta información relevante para la aplicación del método. En concreto se ha utilizado la siguiente documentación:

- Procedimientos de pruebas de los sistemas en estudio
- P&IDs marcados con los circuitos de limpieza previstos así como las necesidad de instalaciones temporales, valvulería, conexiones, etc.
- Disposición en planta de los equipos y de las instalaciones temporales, indicando donde deben ser ubicados en términos de operación y seguridad de las operaciones. También se deben indicar las conexiones para la disposición de efluentes y localización de los depósitos temporales y sus medidas de contención de fugas.
- Planos isométricos y planos necesarios para realizar las instalaciones de manera correcta. Aquí se deberán listar las listas de materiales necesarias para la instalación.
- Procedimientos de inspección y Programa de Puntos de Inspección (PPI), así como reportes de pruebas. Aquí se indicarán los resultados obtenidos y se incluirán hojas para la firma de los responsables.

Sin embargo, conviene mencionar el paquete documental que constituye la base para este sistema:

- Exposición de métodos y análisis de riesgos RAMS. En la exposición de métodos se incluye la siguiente documentación:
 - Evaluación de riesgos. Al menos de las operaciones principales y los medios de mitigación previstos.
 - Hojas de Datos de Seguridad de los productos químicos empleados.
 - P&IDs marcados con los circuitos de limpieza previstos así como las necesidad de instalaciones temporales, valvulería, conexiones, etc. También se incluye la disposición en planta de los equipos y de las instalaciones temporales, la cual se ha extraído en el Anexo 3.
 - Planos isométricos incluyendo las listas de materiales necesarias para la instalación.
- Procedimientos de análisis de laboratorio o in situ para la determinación de las variables químicas y composiciones de los productos.
- Alcance de los trabajos de cada parte incluyendo la división de responsabilidades. Aquí se definirán en función de si se dispone de una tercera parte para la realización de los trabajos, o no, distinguiendo entre el contratista principal, cliente y subcontratas.
- Hojas de datos de los equipos principales, de modo que se disponga de documentación suficiente para poder operar los distintos equipos que conforman la instalación.
- Diagramas eléctricos y de control necesarios para la realización de las temporalidades por el equipo de pruebas.

7.1.2 Aplicación del procedimiento.

Se aplicarán al sistema los pasos necesarios para completar la limpieza química de los circuitos que lo componen, tal como se ha descrito al inicio del capítulo. En el Anexo 3 se muestra el esquema general del sistema de combustible líquido con los circuitos de limpieza previstos y las conexiones principales que serán utilizadas para la configuración de cada circuito.

El sistema de limpieza química utiliza bombas temporales de limpieza química para hacer circular las soluciones de químicos y conexiones temporales (mangueras) representadas en líneas discontinuas de color rojo y azul en los planos. También utiliza instalaciones permanentes del sistema e instalaciones temporales fijas como son las balsa de recepción de las soluciones, la caldera auxiliar así como elementos y componentes para alimentación de vapor para calentar las soluciones de químicos, a través de las cuales se alimentarán los circuitos temporales y sus retornos a la balsa.

A continuación se muestran dos ejemplos detallados de la aplicación del método sobre dos casos concretos del sistema de limpieza química, los pasos 1 y 2 del procedimiento.

1. Prueba de llenado y fugas

En primer lugar, el circuito a limpiar debe encontrarse lleno de agua. Esto se consigue a través de la válvula de llenado desde la conexión temporal localizada en el punto terminal TM-03. La Figura 7.1.1, muestra un esquema del P&ID que proporciona información detallada de cómo realizar las conexiones y temporalidades del sistema. En la figura puede encontrarse la conexión TM-3 mencionada.

Los pasos necesarios que debe realizar el operador para el llenado y prueba de fugas del sistema son los siguientes. La disposición mecánica se preparará como se muestra en los diagramas P & ID marcados y la tabla de tareas a realizar para conseguirlo que se muestra en el Anexo 3, Figuras A.3.1.1, 2 y 3.

Los ítems 1.1→1.7 incluyen la disposición mecánica necesaria de los equipos para poder realizar el llenado y la circulación de las soluciones para la limpieza química. También se muestran las conexiones temporales para la preparación del circuito temporal.

La Figura A.3.1.2, muestra la disposición mecánica de los circuitos de las bombas de Fuel Oil que permiten hacer circular la solución de limpieza a través de los circuitos de bombeo.

Los ítems 2.1→2.11 incluyen la disposición mecánica de las bombas de suministro de combustible líquido LFO.

La Figura A.3.1.3., muestra la disposición mecánica de los circuitos de alimentación de combustible a la caldera que permiten hacer circular la solución de limpieza hasta la caldera para conectar al colector de retorno al tanque de recogida. Esto se consigue con las conexiones 3.1→3.9 que incluyen la disposición mecánica para el sistema de alimentación de combustible líquido a los quemadores de caldera.

El circuito se llena con agua desmineralizada a través de la conexión de manguera TP M-03. Se ha asumido que se dispone de agua en el punto terminal.

Con el circuito lleno de agua desmineralizada se verificarán las posibles fugas en el antes de realizar el paso 2.2. correspondiente al lavado inicial. Si se detectan fugas en el circuito se procederá con su reparación. El procedimiento para reparar las fugas seguirá estas acciones:

- a. dejar de llenar
- b. descomprimir
- c. vaciar el sistema hasta detener la fuga,
- d. reparar y
- e. finalmente llenar de nuevo.

Además, todo el equipo de limpieza auxiliar se comprobará mediante una inspección visual para garantizar que funcione correctamente.

En este primer ejemplo de aplicación y con objeto de mostrar la metodología de trabajo de manera práctica, a continuación se describen los pasos necesarios que deben ser realizados por el equipo de revisión para proceder con la evaluación de riesgos de las operaciones temporales correspondientes a los ítems 1.1 al 1.7. Estas tareas corresponden a la preparación del arreglo mecánico del tanque antes del inicio de la limpieza química.

Para cada una de las etapas o pasos del procedimiento el equipo de revisión procede a evaluar para cada palabra guía los escenarios de riesgo (ver Tabla 7.1.1.).

Subsistema	N/A	Cod/Equipo descripción	Doc. tipo:			Si	No									
Plano o Procedimiento:		Descripción:	Método: SWIFT/Lista Verif. (Que pasa si estrut/LV)			Doc. tipo:										
7.1.- Limpieza química		Procedimiento limpieza química sistema F.O.	Parte I de la evaluación de riesgo.- Palabras Guía			No aplica										
Actividad: 7.1.1.- Llenado inicial y P. Fugas		Descripción: Llenado inicial y prueba de fugas.														
Paso	Descripción del paso	Omisión del paso			Mas que / Menos que			Antes / Después			Paso ejecutado en orden incorr.			Acción ejecutada incorrect.		
		P	C	RIESGO	P	C	RIESGO	P	C	RIESGO	P	C	RIESGO	P	C	RIESGO
1.1	Preparar conexiones tanque de combustible															
1.1.1	Eliminar internos válvula antirretorno	3	3	9	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.2	Eliminar internos válvula	3	3	9	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.3	Preparar conexión brida DN 50 PN16	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.4	Preparar conexión brida DN 100 PN16	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.5	Eliminar internos válvula	3	3	9	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.6	Instalar disco ciego en PSV (cegar PSV)	3	3	9	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9
1.1.7	Preparar conexión brida DN 50 PN16	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	9

Tabla 7.1.1.-Evaluación preliminar de riesgos en base a palabras guía.

Así, para el paso 1.1. consistente en la eliminación de los internos de la válvula antirretorno, para permitir el flujo del fluido de limpieza química y preservar los internos en condiciones adecuadas de operación, se evaluarán los siguientes escenarios:

- ¿Qué pasa si se omite la eliminación de los internos de la válvula antirretorno?. Se analiza en primer lugar la probabilidad de ocurrencia. El equipo determina que en este caso su probabilidad es ocasional, es decir, es poco frecuente ya que esta sustitución puede ocurrir solo de vez en cuando. Establece por tanto un valor de 3 para la probabilidad de acuerdo con la Tabla 6.2.

A continuación se procede a evaluar las consecuencias de que no se retiren los internos de la válvula antirretorno. La evaluación de las consecuencias se realiza para las personas, para el medioambiente y se evalúan las consecuencias para los equipos. En este caso, se determina que para las personas no existe un riesgo relevante, tampoco para el medioambiente, sin

embargo, para los equipos se tendrán daños menores, pero el impacto en la sustitución de unos potenciales internos dañados puede tener como consecuencia el retraso de varios días o semanas en las operaciones del sistema una vez repuesto para su operación normal, en el caso de que no se disponga de repuestos específicos para los internos y cuál es el daño en los mismos. Por tanto se determina que las consecuencias a pesar de no ser relevantes para las persona, equipos o medioambiente pueden tener un impacto importante en el cronograma de las pruebas impactando de manera importante en el cumplimiento de los plazos del proyecto y su entrega al cliente. Se determina que las consecuencias se establecen en un valor de 3 de acuerdo con la Tabla 6.3.

Una vez cuantificada la probabilidad y las consecuencias, el riesgo se obtiene como producto de los dos valores, así, para el escenario en estudio se tiene un valor de riesgo de valor 9, el cual en la matriz de riesgos de la Figura 6.3., queda establecido como riesgo medio (color ámbar).

- ¿Qué pasa si la ejecución del paso se realiza de manera incorrecta aportando más o menos fluido...?. En este caso el equipo determina que no aplica el escenario para este paso del procedimiento. O en todo caso se indica la menor probabilidad y consecuencias posibles, es decir igual a 1.
- ¿Qué pasa si el paso se realiza antes o después de lo indicado?. También se establece en un valor mínimo tanto las consecuencias como la probabilidad de ocurrencia por lo que el resultado es un riesgo mínimo o inexistente para este escenario estudiado.
- ¿Qué pasa si el paso se ejecuta en orden incorrecto?. Aquí se establece que la probabilidad de ocurrencia es similar al caso estudiado antes, mientras que sus consecuencias se establecen en un valor de 1, con daños despreciables a los equipos. El riesgo en este caso se establece en un valor de 1.
- Finalmente, se estudia el escenario ¿Qué pasa si el paso se ejecuta de manera incorrecta?, por ejemplo parcialmente o en el interior se mantienen elementos extraños. En este caso el resultado de la evaluación, dependiendo de cómo de incorrecta sea dicha ejecución podrá llegar a impactar en el cronograma del proyecto en caso de dañar la válvula significativamente, lo que conduce a un escenario de riesgo medio, similar al primero.

Cuando el riesgo obtenido es ámbar (riesgo medio) o rojo (riesgo alto) se procede con la evaluación detallada del escenario de riesgo encontrado para determinar con mayor detalle las consecuencias y las medidas de mitigación existentes para cada escenario identificado. Se proporcionan recomendaciones cuando las medidas disponibles o bien no se consideran suficientes o se inadecuadas para el riesgo identificado.

Así, por ejemplo en el caso de los internos de las válvulas se tiene lo indicado en la Tabla 7.1.2.:

SubSystem	N/A	Cod/Equipment Description		Document Attached	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Drawing or Procedure:	Unit:	Method: Structured What-If/Check List	Doc. Type:		
7.1.2.1.- Chemical Cleaning	Light F.O. Chemical cleaning procedure	Guide words procedure Part II	Not applicable		
Node: 7.1.2.1.1.- Initial filling & leak test		Description: Temporary connections flanged or threaded and elements to be removed or replaced			
Item	Deviation	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendation
1.1	Eliminar internos válvula antirretorno. Caso: Omission of Step (paso no ejecutado) Caso: Action executed wrongly (acción ejecutada incorrectamente)	Error debido al operador	1.- Daños en los internos de la válvula 2.- Necesidad de reposición de internos nuevos 3.- Retrasos en el cronograma de pruebas	1.- Check List del Plan de Pruebas e Inspeccion. Apartado 4.2. Walkdown conjunto verificando la realización del paso	1.- Asegurar repuestos 2.- Incluir Lista de tareas con check list particular para verificación y comprobación de que el paso ha sido realizado. 3.- Definir equipo de revisión en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso. 4.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables.
1.2	Eliminar internos válvula control. Caso: Omission of Step (paso no ejecutado) Caso: Action executed wrongly (acción ejecutada incorrectamente)	Error debido al operador	1.- Daños en los internos de la válvula 2.- Necesidad de reposición de internos nuevos 3.- Retrasos en el cronograma de pruebas	1.- Check List del Plan de Pruebas e Inspeccion. Apartado 4.2. Walkdown conjunto verificando la realización del paso	1.- Asegurar repuestos 2.- Incluir Lista de tareas con check list particular para verificación y comprobación de que el paso ha sido realizado. 3.- Definir equipo de revisión en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso. 4.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables.

Tabla 7.1.2.- Evaluación de riesgos para los escenarios de riesgo medio y alto, casos 1.1 y 1.2.

En el Anexo 4 se incluyen los resultados de la evaluación completa del paso 1.

2. Lavado inicial del sistema.

El procedimiento a seguir para el lavado inicial es el siguiente:

Comprobar antes del arranque de la bomba temporal la posición correcta de las válvulas y conexiones temporales y que la prueba de fugas se ha realizado correctamente.

Arrancar la bomba temporal de limpieza química desde el panel de control local.

Comprobar que con el circuito en servicio el agua desmineralizada circula a través de las tuberías, componentes y equipos procediendo a la extracción de depósitos y restos de montaje. Verificar que no existen fugas en el circuito.

Controlar la limpieza del sistema mediante inspección visual de la descarga del agua en el depósito de recogida de efluentes temporal

Cuando se observa durante un tiempo que la calidad del agua descargada en el pozo de aguas residuales se mantiene, se puede considerar finalizada la etapa de lavado inicial y se puede iniciar la fase de limpieza química.

En este paso, se identifica un escenario que entraña peligro para las personas. Si la bomba temporal de limpieza química se arranca en condiciones incorrectas o el alineamiento del sistema es incorrecto, la presión del sistema puede ser elevada y llegar a provocar la rotura de las mangueras temporales con el consiguiente daño a las personas y al medioambiente al existir una nube de vapor que en función de su temperatura puede provocar daños graves a las personas. Asegurar elementos de alivio de presión en el sistema es determinante para mitigar situaciones de riesgo como la descrita. Se deberá asegurar asimismo que los dispositivos de alivio de presión se

encuentran en perfectas condiciones para la operación en caso de necesidad. En la Tabla 7.1.3. se proporciona el detalle del análisis realizado.

Drawing or Procedure:		Unit:	Method: Structured What-If/Check List	Doc. Type:	
7.1.2.1.- Chemical Cleaning		Light F.O. Chemical cleaning procedure	Guide words procedure Part II	Not applicable	
Node: 7.1.2.1.1.- Initial flushing		Description: Flushing with demin water to remove debris before chemical cleaning			
Item	Deviation	Causes	Consequences	Safeguards	Recommendation
2.2.	Arranque de la bomba temporal desde el panel local Caso: More /Less than. Mas presión que la prevista.	Bomba incorrectamente alineada o instalación incorrecta.	1.- Sobrepresión en el circuito, específicamente en las mangueras temporales 2.- Rotura de mangueras con fuga de agua a presión 3.- Posibles daños a las personas y al medioambiente	1.- Válvula de alivio de presión con ajuste inferior a la presión de diseño de las mangueras y tuberías.	1.- Comprobar presiones de diseño en el circuito y valores de ajuste de PSV. 2.- Asegurar operación y estado de PSV. Realizar test antes del inicio de las maniobras de circulación. 3.- Comprobar certificados de calidad de PSV.

Tabla 7.1.3.- Resultado evaluación de riesgos sobrepresión por operación incorrecta bomba.

En el Anexo 4 se incluyen los resultados completos de la aplicación del método.

7.1.3 Resultados

Los resultados de la aplicación del método se encuentran incluidos en el Anexo 4.

En la Tabla 7.1.4 se muestra un resumen de las recomendaciones principales para aplicación en el sistema con objeto de reducir el nivel de riesgo de determinadas operaciones.

Ítem	Desviación	Recomendación
1.1.1	Eliminar internos válvula antirretorno. Caso: Paso no ejecutado Caso: Acción ejecutada incorrectamente)	1.- Asegurar repuestos 2.- Incluir Lista de tareas con check list particular para verificación y comprobación de que el paso ha sido realizado. 3.- Definir equipo independiente de revisión en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso. 4.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables.
2.2.	Arranque de la bomba temporal desde el panel local Caso: Mas presión que la prevista.	1.- Comprobar presiones de diseño en el circuito y valores de ajuste de PSV.2.- Asegurar operación y estado de PSV. Realizar test antes del inicio de las maniobras de circulación.3.- Comprobar certificados de calidad (incluyendo calibración) de PSV.
2.3	Verificar la operación correcta del sistema Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.- Incluir lista de verificación 2.- Incluir Lista de puntos de inspección y toma de datos en campo a intervalos de tiempo.
3.1.3	Arrancar Caldera Auxiliar desde el panel local Caso: Mas presión que la prevista. Caso: Acción ejecutada incorrectamente Caso: More /Less than. Mas caudal del previsto.	1.- Proporcionar instrucciones de operación detalladas para la operación local de la caldera. 2.- Proporcionar lista de settings para los disparos y alarmas de operación de la Caldera Auxiliar.
3.1.5	Calentar la solución abriendo válvula manual Caso: More /Less than. Mas temperatura que la prevista. Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Instalar dispositivo de alarma (interruptor de temperatura) cuando la temperatura suba por encima del valor de consigna. 2.- Instalar dispositivo de corte para T>70°C, que cubre el rango de T=45°C y de la etapa de calentamiento. 3.- Evaluar instalar circuito de protección en el cuadro local para actuar sobre el dispositivo de corte de 2. para sobrepresión y para sobretemperatura
3.2.1 y 3.2.2	Aportar Surfactante 0,05% y Sosa cáustica 0,25% lentamente al tanque de mezcla temporal Caso: More /Less than. Mas producto del requerido. Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Asegurar la posibilidad de regular el caudal de alimentación de producto químico líquido con la bomba manual. 2.- Establecer las cantidades a dosificar para sosa caustica con el fin de evitar errores mayores del operador. 3.- Asegurar el vaciado desde el tanque de mezcla a la balsa de efluentes para rehacer la solución de desengrasado. 4.- Asegurar ducha lavaojos portátil
3.3.2.	Monitorizar parámetros mediante analítica.	

Ítem	Desviación	Recomendación
	Casos Omisión del paso More / Less than (más temperatura) Before /After (antes /después) Acción ejecutada incorrectamente	1.- Evaluar implementación de Check List y Hojas de registro de datos de doble verificación o revisión. La doble verificación impide errores pero penaliza el número de operadores / revisores en el sitio.
3.4.1 y 3.4.2	Etapa Acida.- Con T= 60 ± 5 °C cerrar válvula. Omisión del paso More / Less than (más temperatura) Before /After (antes /después) El paso se ejecuta en orden incorrecto	1.- Instalar dispositivo de alarma (interruptor de temperatura) cuando la temperatura suba por encima del valor de consigna. 2.- Instalar dispositivo de corte para T>70°C, que cubre el rango de T=45°C y de la etapa de calentamiento. 3.- Evaluar instalar protecciones en el cuadro local para sobrepresión y para sobretemperatura 4.- Instalar enclavamiento de dosificación con válvula de vapor abierta.
3.5.1 a 3.5.3	Etapa Pasivación.- Dosificación reactivos. Casos More / Less than (más reactivo o más rápido) Before /After (antes /después) Acción ejecutada incorrectamente	1.- Establecer las cantidades a dosificar para sosa caustica y Nitrito de sodio (solidos) con el fin de evitar errores mayores del operador. 2.- Asegurar el vaciado desde el tanque de mezcla a la balsa de efluentes para desechar una solución con exceso de producto. 3.- Asegurar ducha lavaojos portátil
3.6.2.	Parada de la bomba temporal desde el panel local Caso: More /Less than. Mas presión que la prevista.	1.- Comprobar presiones de diseño en el circuito y valores de ajuste de PSV. 2.- Asegurar operación y estado de PSV. Realizar test antes del inicio de las maniobras de circulación. 3.- Comprobar certificados de calidad de PSV.
4.1.2	Dosificar 50 ppm de amoniaco usando el tanque de mezcla temporal Caso: More /Less than. Mas producto del requerido. Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Asegurar la posibilidad de regular el caudal de alimentación de producto químico líquido con la bomba manual. 2.- Asegurar el vaciado desde el tanque de mezcla a la balsa de efluentes para rehacer la solución de desengrasado. 3.- Asegurar ducha lavaojos portátil
4.2.1	Arranque de la bomba temporal desde el panel local Caso: More /Less than. Mas presión que la prevista. Acción ejecutada incorrectamente)	1.- Comprobar presiones de diseño en el circuito y valores de ajuste de PSV. 2.- Asegurar operación y estado de PSV. Realizar test antes del inicio de las maniobras de circulación. 3.- Comprobar certificados de calidad (incluyendo calibración) de PSV.
4.3.2.	Parada de la bomba temporal desde el panel local Caso: More /Less than. Mas presión que la prevista.	1.- Comprobar presiones de diseño en el circuito y valores de ajuste de PSV. 2.- Asegurar operación y estado de PSV. Realizar test antes del inicio de las maniobras de circulación. 3.- Comprobar certificados de calidad (incluyendo calibración) de PSV.

Tabla 7.1.4.- Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos limpieza química Fuel Oil.

Se pueden establecer los siguientes grupos de recomendaciones:

1. Recomendaciones relacionadas con la instalación de dispositivos y equipamiento de protección adecuados para garantizar la reducción de los niveles de riesgo de determinadas operaciones. Entre estos se han identificado:
 - a) La instalación de un enclavamiento local durante la dosificación cuando la válvula de alimentación de vapor al sistema se encuentre abierta.
 - b) La instalación de válvulas de alivio de presión (PSV) que garanticen que la presión de operación en el circuito no supera las condiciones de diseño de los elementos temporales de conexión (mangueras).
 - c) Instalación de dispositivo de alarma (como puede ser un interruptor de temperatura) para avisar al operador de una subida de temperatura por encima del valor de consigna.
 - d) Instalar dispositivo de corte y protección cuando el valor de temperatura sube por encima de los valores de consigna establecidos, se puede instalar para T>70°C, que cubre el rango de T=45°C y de la etapa de calentamiento de la solución química.

- e) Instalación de un circuito de protección en el cuadro local para actuar sobre el dispositivo de corte cuando se pueden producir situaciones de riesgo por sobrepresión y por sobretensión
 - f) Instalar los dispositivos necesarios que permitan asegurar la regulación del caudal de alimentación de producto químico líquido con la bomba manual. Esto con objeto de evitar errores de dosificación del operador.
 - g) Definir las cantidades que deben ser dosificadas por el operador en las etapas de limpieza OPC con el fin de evitar errores mayores del operador.
2. Recomendaciones relacionadas con el aseguramiento de la ejecución de tareas. Entre estas se encuentran:
- a) Incluir lista de tareas con lista de verificación asociada que garantice la revisión de la realización del paso asegurando su correcta ejecución.
 - b) Establecer un equipo independiente de revisión en campo que compruebe de manera detallada que el paso se ha ejecutado de manera correcta. Se ha definido como doble verificación, la que realiza por un lado el operador de campo cumplimentando la lista de verificación requerida en el paso 1.a, y la que lleva a cabo un segundo equipo que verifica las operaciones realizadas.
 - c) La verificación del equipo independiente de campo debe incorporar la correspondiente hoja de firmas tanto para el operador que realiza la tarea como para el operador u operadores que la comprueban.
3. El aseguramiento de la disposición en planta de los necesarios repuestos y equipamiento adecuado para no retrasar las operaciones y no impactar en el cronograma de pruebas.
4. Recomendaciones relacionadas con la inclusión de mayor grado de detalle en los manuales y en las instrucciones de operación, tal como se encuentra descrito en diversas recomendaciones de la Tabla 7.1.4:
- a) Incluir lista de verificación que permita la correcta verificación y realización de las actividades propuestas
 - b) Incluir Lista de puntos de inspección y toma de datos en campo a intervalos de tiempo.
 - c) Proporcionar instrucciones de operación detalladas para la operación local de la caldera.
 - d) Proporcionar lista de ajustes para los disparos y alarmas de operación de la Caldera Auxiliar
5. Recomendaciones relacionadas con la seguridad industrial, como son:
- e) Asegurar el vaciado desde el tanque de mezcla a la balsa de efluentes para rehacer la solución de desengrasado con objeto de evitar daños medioambientales.
 - f) Asegurar ducha lavaojos portátil.

El método propuesto garantiza una revisión ágil, potente y con el suficiente grado de detalle que permite detectar escenarios de riesgo que de otro modo podrían pasar desapercibidos. Con la evaluación realizada se han identificado escenarios de riesgo y deficiencias en el sistema que, tras su inclusión, permiten incrementar de manera notable la seguridad en las operaciones temporales, reduciendo los niveles de riesgo para las personas equipos y medioambiente.

7.2 Caso 2.- Sistema de soplado con vapor

7.2.1 Descripción del caso y documentación base para el análisis

El segundo caso sobre el que aplica el método propuesto es el sistema temporal que se instala en las centrales térmicas para llevar a cabo la limpieza de las tuberías de vapor después del montaje de manera que se garantice que las condiciones son adecuadas para su introducción a la turbina de vapor. El sistema elegido es el sistema de soplado de tuberías con vapor mediante la utilización del método discontinuo denominado por ráfagas. La central seleccionada es una central supercrítica de 450 MW de potencia eléctrica que utiliza carbón (lignito) como combustible principal y fuel oil ligero como combustible secundario para el encendido. La caldera es del tipo de un solo paso, tipo torre con hogar de carbón pulverizado y cámara de combustión de bajas emisiones. La turbina de vapor es del tipo condensación de un solo eje acoplada al generador eléctrico el cual está conectado a la red a través de un transformador elevador de tensión a AT de 400 kV. La planta dispone de sistemas de tratamiento de gases de escape que incluyen unidad de desnitrógenación y sistema de desulfuración húmeda de gases así como sistemas de extracción y gestión de cenizas y yeso, productos de la combustión y la desulfuración, respectivamente.

El ejemplo elegido como segunda aplicación del método propuesto es totalmente distinto al que se ha estudiado en primer lugar. Ahora la planta está en unas condiciones diferentes a como se encuentra cuando se realiza la limpieza química de caldera y sistemas asociados. Mientras que durante la ejecución de las actividades de limpieza química la construcción y el montaje electromecánico de la planta se encuentran aún en plena actividad y coexisten las actividades de montaje con las actividades de la limpieza química, durante el soplado con vapor, la mayor parte de los sistemas mecánicos de la planta se encontrarán en operación, los sistemas eléctricos estarán energizados y el montaje mecánico estará en fase de finalización. Los sistemas mecánicos operarán con normalidad hasta una determinada condición de carga de caldera. Aunque la turbina de vapor no estará en operación, durante los soplados es muy recomendable que se encuentre en virador, de manera que si hay alguna fuga de vapor a través de las válvulas de admisión, ésta no tenga ningún impacto sobre la máquina.

Durante el soplado, los sistemas de control y de protección deberán estar operativos, aunque los ajustes no han podido ser realizados al encontrarse las condiciones de trabajo de la planta fuera de sus condiciones normales de operación, lo que hace, si cabe, más peligrosas las maniobras que se requieren. Los sistemas de gestión del combustible secundario, los cuales se realizan desde el BMS (Burner Management System), también deberán estar en operación, al menos para el sistema de combustible secundario. Es habitual modificar algunos valores del sistema de control y protección de los ajustes de alarma y de disparo para las nuevas condiciones de trabajo del sistema durante los soplados con vapor.

En las condiciones de operación en las que opera el soplado discontinuo, la caldera trabaja a una carga parcial, pero con parámetros del vapor que conducen a una mayor velocidad de la masa de vapor que cuando la caldera opera al 100% de carga (máxima carga en continuo o MCR). Para conseguir un valor de $k=1.2$, la velocidad del vapor al golpear contra la placa testigo estará en

torno a los 200 m/s aproximadamente. En la placa testigo se medirán los golpes o huellas de los impactos de las partículas que se encuentran arrastradas por el vapor. El número de impactos determinará si la calidad del vapor es la adecuada para su introducción a la turbina

Para evitar que la contaminación de las tuberías que se limpian en un tramo de soplado se transfieran de unos tramos a otros, los circuitos de vapor se dividen en tres circuitos principales:

1. Tramo de Alta Presión HP, que incluye los sobrecalentadores HP, los colectores HP y la tubería de vapor principal.
2. Tramo de Bypass de Turbina, que incluye los sobrecalentadores HP, los colectores HP, la tubería de bypass de alta presión y la tubería de vapor recalentado frío.
3. Tramo de Baja Presión LP que incluirá también los sobrecalentadores HP, los colectores HP, el tramo de vapor principal, el recalentado frío y los haces tubulares de recalentado caliente.

El Anexo 3 incluye las figuras que representan cada uno de los circuitos anteriores.

Para conducir el vapor que contiene los restos de cascarillas y restos de montaje del interior de las tuberías es necesario instalar tuberías temporales que conducirán el vapor desde la admisión de la turbina hasta la atmósfera.

En general, la tubería temporal se monta a través de piezas especiales que conectan las válvulas de parada principales y las válvulas de vapor recalentado, las cuales están instaladas en la admisión de alta y media presión respectivamente con la salida al exterior. Para conducir el vapor al exterior, la tubería temporal se instala hasta un lugar fuera de la zona de la caldera y se descarga a la atmósfera a través de dos silenciadores, donde se pueden realizar las maniobras de soplado a la atmósfera sin peligro para las personas o las instalaciones.

La tubería temporal se diseña para soportar las condiciones de operación (caudal, presión y temperatura), que se producen durante las operaciones de soplado de vapor para operar de forma segura.

Para la ejecución de los soplados se dispone de una válvula de soplado de vapor temporal tipo compuerta con actuador eléctrico y tiempos de apertura rápidos, que se utiliza para iniciar y parar los soplados de cada tramo. Esta válvula está equipada con una válvula de bypass manual la cual se usará antes de los soplados para realizar el precalentamiento de la tubería temporal antes de la introducción de vapor en las condiciones de soplado.

Durante las operaciones de soplado con vapor se considerarán las siguientes precauciones de seguridad:

- Las operaciones de soplado serán dirigidas y coordinadas por el personal que suministra la caldera de la central o su representante en coordinación con el equipo de pruebas.
- Antes de realizar las operaciones de soplado de cada tramo, se llevará a cabo una inspección común entre las organizaciones de construcción y puesta en servicio
- Antes de realizar el primer soplado, se distribuirá una notificación por correo electrónico a todas las partes en la obra para informar sobre la fecha, hora y duración del soplado.

- Durante el primer soplado, las áreas de caldera y el edificio de turbina deben ser evacuados y bloqueados para el personal no autorizado. Para todas las explosiones posteriores con vapor, solo se bloquearán las áreas marcadas especiales para personas no autorizadas.
- Durante el soplado se debe asegurar que en todo momento se encuentran establecidas conexiones confiables (por radio o cable) entre el personal de la sala de control y el personal situado fuera de los edificios en las inmediaciones de los silenciadores. Cuando se sospechen irregularidades o peligros para la seguridad, se interrumpirá el soplado de vapor.
- En lugares adecuados se deben instalar señales de peligro en número suficiente. Las áreas especialmente críticas deben estar acordonadas por puestos de control, barricadas, cadenas, etc.
- El chorro de vapor del soplado debe expandirse de manera segura en un área acordonada y no golpear ningún objeto como edificios, equipos, etc. Téngase en cuenta que el vapor sobrecalentado no es visible de modo que la operación de soplado de vapor en esta fase solo será reconocible debido al ruido generado.
- El área de afección de la tubería temporal no aislada debe estar perfectamente identificada para que las personas no puedan quemarse al tocar las tuberías. Cuando sea necesario, se proporcionará equipo de protección personal. No se deben almacenar combustibles u otros materiales peligrosos o sensibles en el área de tuberías y equipos temporales durante el soplado de vapor (peligro de ignición o daño causado por radiación térmica).
- Las personas que se encuentren en el área de mayor nivel de ruido deben usar equipo de protección auditiva adecuado.
- Toda la tubería temporal debe controlarse visualmente con regularidad
- Durante la inspección de las placas testigo debe tenerse en cuenta que el sistema permanece caliente y debe asegurarse de que el sistema se haya despresurizado.

El resultado de la limpieza del soplado se comprueba mediante el número de impactos de las impurezas que contiene el vapor sobre las placas testigo. En cada tubería temporal aguas abajo de cada válvula de parada y combinada se debe instalar una placa testigo. Para conseguir un flujo uniforme, la longitud de la tubería aguas arriba del lugar de instalación del testigo debe ser como mínimo 5 veces más larga que el diámetro nominal de la tubería en la que está instalada. El soportado del testigo deberá realizarse de manera que las vibraciones se reducirán al mínimo posible. La norma VGB R513 [212] establece como llevar a cabo todas estas operaciones.

Durante el soplado con vapor la caldera debe funcionar con combustible fuel oil, los sistemas de control y protección estarán operativos y los siguientes sistemas mecánicos en funcionamiento:

- Sistema de combustible líquido
- Sistema de aire gases de caldera
 - Ventiladores de caldera
 - Sistema de aire de enfriamiento
 - Precalentador de aire
- Sistemas del ciclo agua vapor:
 - Agua de alimentación a caldera

- Sistema de condensado
- Sistema de reposición de agua al ciclo
- Sistema de agua desmineralizada
- Sistema de calentadores agua vapor
- Sistema de drenajes y venteos
- Sistema de dosificación química al ciclo
- Sistemas de vapor:
 - Sistema de vapor principal
 - Vapor recalentado (frio y caliente)
 - Vapor auxiliar
- Sistema de aire de instrumentos y aire de servicios
- Sistemas de refrigeración
- Sistema de muestreo
- Sistemas de bypass de turbina

Los calentadores de agua-vapor y las bombas del ciclo deben estar operativos y haber finalizado su comisionado para que la caldera pueda operar en las condiciones de funcionamiento requeridas durante las operaciones de soplado.

El sistema de agua de alimentación a caldera debe encontrarse en operación.

El sistema de aire gases de caldera debe encontrarse totalmente operativo, lo cual implica que los ventiladores de tiro forzado y tiro inducido, los precalentadores de aire y todos los conductos de conexión deben estar listos para funcionar.

Los sistemas de protección de la caldera y el sistema de gestión de quemadores (BMS, Burner Management System), incluido el programa de purga de la caldera, deben encontrarse totalmente operativos

Los sistemas de sobrepresión de las tuberías de vapor deben encontrarse operativos.

Evidentemente los lazos de control no pueden haber sido ajustados dadas las condiciones en las que la planta ha trabajado, sin la turbina de vapor y sin exportación de energía, por lo que habrá que prestar especial atención a los caudales y niveles durante las operaciones de soplado.

Antes de comenzar el soplado de vapor con los parámetros de soplado dados, se deben realizar soplados de vapor de prueba de los tramos de alta y baja presión HP y LP, utilizando unas condiciones de presión y temperatura más bajas.

Se realizarán dos soplados de prueba aumentando gradualmente la presión inicial. Se realizarán con una presión inicial de 24 bar (g) y luego a 49 bar (g). Las tuberías y su soportación deben inspeccionarse detalladamente para verificar su integridad después de los soplados de prueba

El generador de vapor se pondrá en marcha de acuerdo con las instrucciones de funcionamiento del fabricante. Se asume que los operadores y el personal encargado de realizar las maniobras de soplado con vapor conocen y están familiarizados con este tipo de operaciones.

El precalentamiento de la tubería crítica y temporal debe realizarse teniendo en cuenta los gradientes de temperatura máximos permitidos.

El soplado se realizará de acuerdo con el párrafo 6.10 del reglamento VGB mencionado antes, en concreto con los apartados 6.10.1 “Soplado de vapor en varias ráfagas” de la citada norma. Durante estas actividades de soplado, se observará el funcionamiento y control de la caldera. Dependiendo del resultado del primer soplado en términos de reacción de la caldera se determinará si se continúa con este método o se cambia al método alternativo según VGB 6.10.3 “Soplado de vapor a presión deslizante modificada con acumulación de presión” para reducir la duración total del proceso de soplado.

La decisión final respecto a qué modo de soplado se llevará a cabo la tomará la dirección de las pruebas de acuerdo con el equipo de proyecto y en último caso con el cliente si así queda establecido en el contrato.

En la norma VGB se establecen dos tipos principales de soplado discontinuo, el denominado “a ráfagas” y el designado como “presión deslizante” con o sin acumulación de presión.

En el método “a ráfagas” el agua de la caldera se calienta de acuerdo con una relación constante de la combustión. Las válvulas temporales de soplado se utilizan para controlar la presión de vapor principal del siguiente modo. Cuando se alcanza la presión de soplado, se apaga la caldera y a continuación la válvula temporal de soplado se abre hasta conseguir los valores requeridos - factor k y velocidad. Durante el soplado el vapor fluye a la atmósfera circulando a través de la tubería temporal y finalmente descargando a través del silenciador. Justamente después de que se abre la válvula de soplado de vapor, la presión de la caldera disminuye rápidamente y el caudal de vapor aumenta al valor requerido. El factor de perturbación especificado se logrará a la presión y caudal requeridos durante unos segundos. Cuando la presión disminuya a un valor del 50% de la presión con la que se inició el soplado, la válvula temporal de soplado de vapor se cerrará. Después de completar cada soplado, la caldera debe despresurizarse y enfriarse

En el método de soplado a presión deslizante modificada con acumulación de presión, el proceso es idéntico al de varias ráfagas, pero cuando se alcanza la presión objetivo de soplado, a diferencia del modo anterior, el fuego de caldera no se apaga, y se mantiene un quemador de gasoil encendido. Además se debe mantener el caudal de agua de alimentación a la caldera y la bomba de recirculación de la caldera debe permanecer en funcionamiento, prestando especial atención al nivel de agua en el calderín y a la operación de la bomba de recirculación de caldera.

En este método, al igual que en el soplado con vapor a ráfagas, la válvula temporal de soplado de vapor se abre hasta conseguir los valores requeridos de factor k y velocidad del vapor. Con la válvula de soplado abierta el vapor circula a través de la tubería temporal para descargar a través del silenciador a la atmósfera con lo que la presión de la caldera cae rápidamente y el caudal de vapor aumenta al valor de soplado. El factor de perturbación especificado se logrará a la presión y el caudal requeridos durante unos segundos. A continuación la posición de la válvula temporal de soplado se cerrará hasta aproximadamente el 50% de la presión inicial a la que se ha realizado el soplado del circuito.

Una vez cerrada la válvula de soplado, la presión en la caldera aumentará de nuevo hasta alcanzar la presión objetivo de soplado y se reinicie de nuevo el proceso de soplado. Esta secuencia se repetirá aproximadamente 5 veces al día y luego se apagará el fuego para que se enfríe durante la noche.

El número de soplados que se pueden realizar varía en función de la cantidad de agua disponible en los tanques y la capacidad de producción y reposición así como de los acuerdos entre el contratista principal y el propietario de la planta con respecto a la exposición al ruido.

Este proceso se realizará hasta que se logre la limpieza de acuerdo con los impactos en la placa testigo

En el Anexo 3 se proporciona el proceso detallado que ha servido de base para la aplicación del método de análisis de riesgos propuesto.

En el ejemplo, se ha seleccionado el más completo, soplado a presión deslizante modificada con acumulación de presión.

A continuación se incluye la documentación básica necesaria para realizar el análisis de riesgos con el método propuesto con las suficientes garantías.

- Procedimientos de pruebas de los sistemas en estudio
- P&IDs marcados con los circuitos de soplado previstos así como las necesidad de instalaciones temporales, valvulería, conexiones, etc.
- Disposición en planta de los equipos y de las instalaciones temporales, indicando donde deben ser ubicados en términos de operación y seguridad de las operaciones.
- Modelo 3D de las tuberías temporales y planos isométricos así como todos aquellos planos necesarios para realizar las instalaciones de manera correcta. Aquí se deberán incluir las listas de materiales necesarias para la instalación.
- Procedimientos de inspección y Programa de Puntos de Inspección (PPI), así como reportes de pruebas. Aquí se indicarán los resultados obtenidos y se incluirán hojas para la firma de los responsables.
- Exposición de métodos y análisis de riesgos RAMS, que incluye una evaluación de riesgos de al menos de las operaciones principales y los medios de mitigación previstos.
- Alcance de los trabajos de cada parte incluyendo la división de responsabilidades. Aquí se definirán en función de si se dispone de una tercera parte para la realización de los trabajos, o no, distinguiendo entre el contratista principal, cliente y subcontratas.
- Hojas de datos de los equipos principales, de modo que se disponga de documentación suficiente para poder operar los distintos equipos que conforman la instalación.
- Diagramas eléctricos y de control necesarios para la realización de las temporalidades por el equipo de pruebas.
- Valores de ajuste a ser modificados en los sistemas de control para alarmas y protecciones, teniendo en cuenta las condiciones de operación de la caldera y de los sistemas mecánicos durante las operaciones de soplado.

En el Anexo 3 se ha incluido el procedimiento de soplado y no se han incluido el resto de los documentos que si se han incluido parcialmente en el caso de la limpieza química.

7.2.2 Aplicación del procedimiento

El procedimiento de trabajo para realizar las actividades de soplado que se ha incluido en el Anexo 3 se ha dividido en bloques de trabajo, algunos de los cuales se realizarán para cada circuito a soplar. Por ejemplo, la maniobra de inserción de la placa testigo o el propio proceso de soplado se analiza solo una vez y el resultado del análisis será aplicable a todos los tramos y circuitos de soplado que se establezcan. Así, la revisión de seguridad se ha aplicado a cada bloque de la siguiente manera:

1. Actividades iniciales antes de las operaciones de soplado. Supervisión requerida. Aquí se analizan aspectos relacionados con la seguridad de la zona de soplado, la instalación de los elementos de medida necesarios para supervisar las operaciones o la evacuación del personal de la zona de soplado.
2. Operación de insertado de la placa testigo. Aquí se evalúan las operaciones relacionadas con la inserción de la placa testigo en los lugares previstos para la lectura de los impactos en la placa, con objeto de medir el grado de limpieza alcanzada con los sopladors en los diferentes circuitos. La operación más delicada es la que se refiere a la retirada de la placa con las condiciones de temperatura y presión que se ha alcanzado durante la maniobra de soplado. También resulta peligrosa la maniobra de inserción de la placa testigo antes de la apertura de la válvula de soplado. Refiérase a los resultados del apartado siguiente para encontrar las recomendaciones para reducir la peligrosidad de estas operaciones.
3. Condiciones previas al encendido de la Caldera. Las operaciones rutinarias si no se ejecutan correctamente pueden producir situaciones de riesgo. Deberá prestarse especial atención a la realización de la purga del combustible antes del encendido de modo que se pueda asegurar que la atmosfera en el interior del hogar es inerte y no puede producir explosiones al realizar el encendido. Para este caso, la disponibilidad operativa de los sistemas de protección y gestión de quemadores es determinante, por ello debe asegurarse que los sistemas han sido probados y que están correctamente programados con los ajustes adecuados. La caldera a pesar de trabajar fuera de sus condiciones habituales debe disponer de las condiciones de operación y protecciones adecuadas.
4. Encendido de Caldera. El encendido de la caldera involucra diversos equipos y sistemas, tanto de la propia caldera, sistemas de combustible, sistema de aire gases y sistemas de vapor, como sistemas de agua de alimentación y condensado que de modo parcial, trabajan también durante las operaciones de soplado fuera de sus condiciones de trabajo habituales. Se deberá garantizar que no existe agua en el interior de las tuberías, para lo cual, los drenajes de las líneas de vapor deben permanecer abiertos y las temperaturas de los gases aguas arriba del sobrecalentador no superan los valores establecidos, para no superar las condiciones de diseño de los internos de la caldera. Las rampas de calentamiento y los gradientes de temperatura deben ser respetados, así como el calentamiento de la tubería temporal de soplado antes de proceder con las ráfagas de vapor. Asegurar que los sistemas de control operan adecuadamente y su programación es

la correcta resulta determinante en esta fase de las operaciones. También es muy importante garantizar que los operadores disponen del entrenamiento adecuado para responder a las situaciones que se pueden producir durante las operaciones.

5. Soplado con vapor. En esta maniobra, la cual solo se revisa de modo genérico, se identifican dos maniobras especialmente peligrosas, que la temperatura del vapor no supere los valores establecidos y que en el momento requerido los quemadores se apaguen, de modo que no puedan producirse presiones o temperaturas por encima de los valores máximos permitidos.
6. Parada del suministro de vapor. Los procedimientos establecen como realizar esta maniobras y no se observan riesgos potenciales en estas maniobras, teniendo en cuenta que los sistemas de disparo operarán en caso de necesidad.

El detalle necesario para la aplicación del procedimiento es idéntico en este segundo caso que en el primero. En el caso 1 se ha visto con mucho detalle cómo se realiza el análisis de riesgo en cada parte en la que se divide el procedimiento. Así, para cada paso del procedimiento se evaluará de acuerdo con las palabras guía el escenario resultante de la aplicación de las preguntas clave “¿qué pasa si...?” o ¿Cómo podría...?”, afectar la omisión de un paso al proceso, realizar incorrectamente el paso al proceso, o los otros supuestos, si la presión o la temperatura obtenida o regulada en el paso es mayor o menor de la prevista. A continuación, se establecerá de acuerdo con una criterio simple de categorización la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias en una escala de 1 a 5 tal como muestran las Tablas 6.2. y 6.3, según se ha explicado con detalle tanto en el capítulo 3, como en el caso 1.

Con la evaluación de riesgos realizada para los pasos de secuencia del procedimiento, el equipo procede entonces a evaluar el detalle de aquellos escenarios identificados de riesgo medio y alto despreciando aquellos que tienen riesgo bajo, los de color verde.

En el Anexo 4, se muestra el resultado de la aplicación del método al procedimiento de soplado de la central seleccionada para todos los pasos del procedimiento.

7.2.3 Resultados

Los resultados de la aplicación del método se encuentran incluidos en el Anexo 4.

En la Tabla 7.2.1 se muestra un resumen de las recomendaciones principales para aplicación en el sistema con objeto de reducir el nivel de riesgo de determinadas operaciones.

Ítem	Desviación	Recomendación
1.1	Barreras de seguridad en posición Caso: Paso no ejecutado Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Incluir Lista de tareas con check list particular para verificación y comprobación de que el paso ha sido realizado. 2.- Definir equipo de revisión independiente en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso. 3.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables.
2.2	Verificar la correcta operación del insertador de la placa testigo. Caso: paso no ejecutado Caso: paso ejecutado en orden incorrecto	1.- Incluir instrucciones de operación detalladas del insertador automático. 2.- Incluir check list 2.- Para insertador neumático, asegurar: a.-Limitador de presión máxima b.-Presión de diseño de las mangueras temporales igual a la del compresor de aire. c.- Instalar dispositivos de amarre de seguridad del tipo "whip check safety cable" o similar.

Ítem	Desviación	Recomendación
	Caso: acción ejecutada incorrectamente	3.- Garantizar la instalación del panel local del insertador a una distancia segura del lugar de inserción. Proporcionar plano de localización 4.- Comprobar conexiones de todas las mangueras antes de la prueba. Incluir hoja de firmas. 5.- Se realizará una prueba de operación en vacío previa a la inserción de la placa testigo. Incluir hoja de firmas. 6.- Utilizar escudo de protección en caso de ser necesario.
2,3	Comprobar apriete de los pernos del insertador. Caso: paso no ejecutado Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.- Establecer procedimiento de verificación del apriete de los pernos. Incluir hoja de firmas y verificación. 2.- Proporcionar valores e instrucciones de operación detalladas.
2,11	Retirar la placa testigo después de que el flujo de vapor y la presión sean aceptables (<200 °C) para abrir la tapa del insertador de testigos. Caso: paso no ejecutado Caso: paso ejecutado en orden incorrecto Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.- Instalar dispositivo de bloqueo o alarma que impida y alerte de una maniobra de apertura con condiciones inadecuadas. Con temperatura (T<200°C ==> P y Q adecuados). Alarma T>200°C. 2.- Recomendada alarma al DCS. 3.- Recomendado dispositivo de bloqueo con llave y etiquetado (lockout/tagout).
3.2.3	El caudal de agua de alimentación debe estar en todo momento controlado para que el nivel del calderín se encuentre en su nivel de operación normal Caso: paso no ejecutado Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.- Asegurar entrenamiento del operador para responder a situaciones de emergencia y transitorios cuando el lazo de control no opera en auto. 2.- Establecer valores de ajuste temporales en el DCS para control de nivel correcto. Asegurar temporalidades en el sistema de control. 3.- Disponer de operadores de campo que verifiquen la correcta operación del sistema de manera local. 4.- Incluir check list para los operadores de campo. 5.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones.
3.2.4	Realizar la Purga de caldera de acuerdo con las instrucciones de purga Caso: paso no ejecutado Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Disponer de los resultados de las pruebas y puesta en marcha de los sistemas de control y protección ESD, BMS y DCS. Protocolo firmado. Analizar y evaluar los pendientes y su afección a los sistemas de seguridad implicados. 2.- Asegurar capacitación de los operadores para responder a las situaciones de emergencia. 3.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. 4.- Evaluar la necesidad de realizar un C-HAZOP previo al arranque. Seleccionar los sistemas a los que realizarlo.
4,3	Aumentar la relación de combustión al 10% en aproximadamente 20 minutos utilizando 3 quemadores de gasoil Caso: Mas / menos relación de combustión / tiempo Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.-Asegurar valores de ajuste en los sistemas de control DCS y protección ESD. 2.- Verificar que los sistemas se encuentran totalmente operativos y con la programación correcta desde las estaciones de operación donde se lleva a cabo el ajuste de la relación de combustión. Incorporar verificaciones y pruebas previas que garanticen la programación. (protocolos firmados) 3.- Garantizar trazabilidad y ajuste de lógicas temporales en caso de ser necesarias. 4.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones.
4,4	Vigilar que la temperatura de los gases de combustión aguas arriba del sobrecalentador no supera los 520 °C Caso: Omisión del paso Caso: Mas / menos relación de combustión / tiempo Caso: acción ejecutada incorrectamente	1.- Asegurar entrenamiento del operador para responder a situaciones de emergencia si el lazo de control no opera en auto. 2.- Asegurar que los valores de ajuste en el DCS son los adecuados para poder controlar el lazo en auto y en manual. Verificar la operación desde las estaciones de operación. 3.- Disponer de operadores de campo que verifiquen la correcta operación del sistema localmente verificando temperaturas locales en el turno. 4.- Incluir check list para los operadores de campo. 5.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. 6.- Asegurar que se han realizado las pruebas y ajustes para la operación de los equipos y componentes involucrados. (Protocolos firmados)
4,12	Calentar la tubería temporal a 400 °C Caso: paso no ejecutado Caso: Mas / menos apertura lo que proporciona más o menos temperatura Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.-Verificar aprietes y montaje adecuado de los elementos temporales antes de hacer circular vapor por la tubería temporal. 2.- Verificar operación en vacío válvula temporal de soplado. 3.- Verificar operación de los disparos de emergencia (pulsadores) y su conexión a los sistemas de protección para garantizar parada segura en caso de actuación. 4.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. 5.- Vigilar la rampa de temperatura para el calentamiento. 6.- Preparar lista de verificación específica para las actividades locales y las relacionadas con aprietes y comprobación de operaciones locales (disparos de pulsadores, etc.).
5,2	Precalear la tubería de salida del vapor de soplado. Para ello	1.-Asegurar valores de ajuste en los sistemas de control DCS y protección ESD. 2.- Verificar que los sistemas se encuentran totalmente operativos y con la programación correcta.

Ítem	Desviación	Recomendación
	<p>abrir parcialmente la válvula de soplado temporal y válvulas de drenaje. Si las condiciones de presión disminuyen, proceder con el incremento de la relación de combustión hasta el 15%</p> <p>Caso: Más / menos apertura Caso: Antes/después Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>3.- Garantizar trazabilidad y ajuste de lógicas temporales en caso de ser necesarias. 4.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. 5.- Garantizar que se han realizado las pruebas en campo de los equipos y componentes involucrados que asegura la correcta operación de los equipos de la operación de soplado. Verificación del protocolo firmado.</p>
5.5	<p>Mantener la caldera en operación con el sistema de agua de alimentación y las bombas recirculación de caldera en operación.</p> <p>Caso: Omisión del paso Caso: Mas / menos nivel Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.- Asegurar entrenamiento del operador para responder a situaciones de emergencia si el lazo de control no opera en auto. 2.- Asegurar que los valores de ajuste en el DCS son los adecuados para poder controlar el lazo en auto y en manual. Verificar la operación desde las estaciones de operación. 3.- Disponer de operadores de campo que verifiquen la correcta operación del sistema localmente verificando el nivel local en campo. 4.- Incluir check list para los operadores de campo. 5.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. 6.- Asegurar que se han realizado las pruebas y ajustes para la operación de los equipos y componentes involucrados. (protocolos firmados).</p>
5.6	<p>Insertar la placa testigo cuando las condiciones de operación se alcancen. Ver pasos 2.1 a 2-8.</p> <p>Dependiendo del circuito a soplar las condiciones cambian (ver tabla de condiciones)</p> <p>Caso: Mas / menos presión o temp. Caso: Antes/después Caso: Acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.-Preparar procedimientos específicos para cada circuito a soplar e incluir las condiciones de presión, temperatura y todas aquellas a verificar antes de la inserción de la placa testigo. 2.- Incorporar listas de verificación con firmas de los responsables.</p>
5.7	<p>Abrir la válvula temporal de soplado e iniciar el soplado con vapor</p> <p>Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.-Verificar operación adecuada de la válvula temporal de soplado. 2.- Verificar operación en vacío válvula temporal de soplado. Incorporar instrucciones de desbloqueo (Abrir-cerrar) 3.- Para el cambio de condiciones de ruido y nube de vapor, coordinar un "Plan de comunicaciones" específico para cubrir las nuevas condiciones.</p>
5.9	<p>Cuando la presión inicial del soplado alcance el 50 % de su valor, cerrar la válvula temporal de soplado</p> <p>Caso: paso no ejecutado Caso: Más / menos presión Caso: Antes/después Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.-Asegurar valores de ajuste en los sistemas de control DCS y protección ESD. Incorporar lógicas temporales que consideren este escenario. 2.- Verificar que los sistemas se encuentran totalmente operativos y con la programación correcta. 3.- Garantizar trazabilidad y ajuste de lógicas temporales en los sistemas de control. 4.- Asegurar sistema de alarmas operativo de acuerdo con especificaciones. Incluir alarmas temporales en el ESD y DCS para tener en consideración estos nuevos escenarios de riesgo.</p>

Tabla 7.2.1.- Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos soplado con vapor.

Se pueden establecer los siguientes grupos de recomendaciones:

1. Recomendaciones relacionadas con la instalación de dispositivos y equipamiento de protección adecuados para garantizar la reducción de los niveles de riesgo de determinadas operaciones. Entre estas se han identificado las siguientes más relevantes:
 - a) Garantizar la instalación del panel local del insertador de la placa testigo a una distancia segura del lugar de inserción. Proporcionar plano de localización, así como el uso de escudo de protección en caso de ser necesario.

- b) Durante la maniobra de retirada de la placa testigo se han proporcionado algunas recomendaciones, como son la instalación de un dispositivo de bloqueo/alarma que impida y alerte de una maniobra de apertura con condiciones inadecuadas, como es para una temperatura ($T < 200^{\circ}\text{C} \implies P$ y Q adecuados) con alarma $T > 200^{\circ}\text{C}$. Se ha recomendado que dicha alarma se incorpore además en el sistema de control DCS. Además se ha recomendado la instalación de un dispositivo de bloqueo con llave y etiquetado (lockout/tagout) en el equipo de inserción.
 - c) Para evitar la operación incorrecta de las maniobras de soplado, se ha propuesto evaluar la incorporación tanto de la señalización como el enclavamiento/alarma temporal en DCS de los finales de carrera entre las válvulas temporales de soplado.
 - d) Verificar operación de los disparos de emergencia (pulsadores) y su conexión a los sistemas de protección para garantizar parada segura en caso de actuación durante las maniobras de subida de temperatura de la tubería temporal de soplado antes de la ráfaga de vapor.
2. Recomendaciones relacionadas con la operación y el nivel de formación y entrenamiento de los operadores que se harán cargo de las maniobras de soplado:
- a) Asegurar que el operador seleccionado para realizar las maniobras de soplado está capacitado para responder a situaciones de emergencia y transitorios cuando los lazos de control no operan en modo automático o las desviaciones de la condición normal de la operación de la planta lo requieren. Asegurar la selección y capacitación de los operadores es un tema muy complejo que involucra a organizaciones diferentes y puede ser motivo de disputas y conflictos.
 - b) Disponer de operadores de campo que verifiquen la correcta operación del sistema localmente tomando datos de variables locales durante el turno. Los operadores de turno para la supervisión local debe estar garantizada en todos los casos, incluso cuando las operaciones se realizan en turnos de noche.
3. Recomendaciones relativas al estado operativo de los sistemas de control, con el estado real en el que se encuentran después de las pruebas y ajustes realizadas en las fases previas, asegurando la trazabilidad de los resultados y el estado de los puntos pendientes que impidan las operaciones seguras:
- a) Disponer de los resultados de las pruebas y puesta en marcha de los sistemas de control y protección ESD, BMS y DCS. Analizar y evaluar los pendientes y su afeción a los sistemas de seguridad implicados. Verificar que los sistemas se encuentran totalmente operativos y con la programación correcta. Pruebas en campo realizadas con los correspondientes protocolos firmados por los responsables requeridos. Incorporar en los procedimientos de verificación y seguridad del equipo de pruebas una lista de verificación de los ajustes requeridos para las maniobras y la programación real existente en los sistemas de control. Estas check list permiten evaluar la condición de seguridad de los sistemas antes de las operaciones.
 - b) Asegurar valores de ajuste en los sistemas de control DCS y de protección ESD. Garantizar la correcta implementación de los ajustes temporales en los sistemas de control en caso de ser requeridos. Garantizar la trazabilidad y ajuste de lógicas temporales en su caso.

Preparar procedimiento específico de gestión de temporalidades en Sistemas de control. Existen recomendaciones que sugieren la implementación de alguna lógica adicional a la existente para garantizar la seguridad de la maniobra (véase como ejemplo el paso 5.9, con objeto de evitar una presión más alta en el sistema de la requerida y de este modo reducir el riesgo de dicha operación. En operación normal este valor de presión requerido no lo consideran las especificaciones al no trabajar la planta en este escenario, por lo que la implementación de una lógica temporal sería muy recomendable).

- c) Asegurar que el sistema de alarmas se encuentra operativo de acuerdo con las especificaciones. Las alarmas que afectan a las operaciones involucradas deben encontrarse operativas. Aquellas alarmas que no se encuentran todavía revisadas y garantizadas se deben inhibir antes de las operaciones. Es probable que se deban desarrollar procedimientos y protocolos Ad-hoc para cumplir con este requerimiento.
 - d) Evaluar la necesidad de realizar un C-HAZOP para las actividades requeridas previo al arranque. Seleccionar los sistemas a los que realizarlo.
4. Igual que en la limpieza química, se proporcionan también recomendaciones relacionadas con el aseguramiento de la ejecución de tareas. Entre estas se encuentran:
- a) Incluir lista de tareas con lista de verificación asociada que garantice la revisión de la realización del paso asegurando su correcta ejecución.
 - b) Establecer un equipo independiente de revisión en campo que compruebe de manera detallada que el paso se ha ejecutado de manera correcta. Se ha definido como doble verificación, la que realiza por un lado el operador de campo cumplimentando la lista de verificación requerida y la que lleva a cabo un segundo equipo que verifica las operaciones realizadas.
 - c) La verificación del equipo independiente de campo debe incorporar la correspondiente hoja de firmas tanto para el operador que realiza la tarea como para el operador u operadores que la comprueban.
5. Otras recomendaciones de carácter más general, como son:
- a) El aseguramiento de la disposición en planta de los necesarios repuestos y equipamiento adecuado para no retrasar las operaciones y no impactar en el cronograma de pruebas.
 - b) Recomendaciones relacionadas con la inclusión de mayor grado de detalle en los manuales y en las instrucciones de operación, véase como ejemplo la necesidad de disponer de los circuitos detallados para cada tramo a soplar, perfectamente identificados y regulados, tal como se solicita en el paso 5.6.
 - c) Recomendaciones relacionadas con la seguridad industrial, como son aquellas que aseguran la disposición adecuada de los espacios o las relacionadas con los vertidos y drenajes.

El sistema temporal presentado en este caso 2, tiene características especiales respecto de otros sistemas temporales que se presentan en este trabajo ya que requiere de algunos factores determinantes diferenciadores. Por un lado, la planta se encuentra con el montaje prácticamente finalizado y en condiciones muy cercanas a las pruebas funcionales de sistemas y de prestaciones. Precisamente la limpieza de tuberías se realiza antes de la introducción del primer vapor a la

turbina, por lo que muchos equipos de la planta se encuentran en condiciones plenamente operativas aunque se encontrarán trabajando fuera de sus condiciones normales, requiriendo en algunos casos, operaciones transitorias especiales o ajustes específicos para poder, precisamente, llevar a cabo las operaciones fuera de rango requeridas. Por otro lado, para poder realizar las actividades de soplado, se requiere instalar en planta tuberías y equipos no permanentes que permitan realizar las limpiezas requeridas. Estas instalaciones temporales operan en condiciones de caudal, presión y temperatura que son peligrosas intrínsecamente a los que se les podría aplicar las técnicas habituales de seguridad de los procesos similares al resto de la planta. Aplicar un método flexible, rápido y potente que permita detectar las posibles debilidades en la ejecución de las tareas permite asegurar los niveles de seguridad requeridos para estas instalaciones temporales, cuando por razones diversas no ha sido aplicables dichas técnicas de análisis de riesgos. Como se vio en el capítulo 6 se han propuesto algunas metodologías alternativas para la fase de comisionado que conjugan precisamente estos argumentos con objeto de considerar los factores de riesgo que se producen en estas actividades.

Las recomendaciones que se realizan después de la aplicación del método en algunos pasos del procedimiento abren otros campos de trabajo para la mejora de los niveles de seguridad, sobre todo si se atiende a los protocolos y procedimientos más usuales que se vienen aplicando en las operaciones de comisionado de estos sistemas temporales. Así, se pueden abrir nuevas líneas de trabajo relacionadas con la gestión de las temporalidades en otras áreas o especialidades diferentes a la de proceso, como son aquellas relacionadas con las temporalidades en los sistemas de protección y control, así como las relacionadas con la aplicación de técnicas innovadoras en ergonomía y factores humanos durante este tipo de actividades.

7.3 Caso 3.- Sistema de limpieza de aceite lubricación Turbina

7.3.1 Descripción del caso y documentación base para el análisis

El último caso que se presenta utiliza los propios equipos, componentes, instalaciones y fluidos del sistema permanente para ejecutar las actividades de limpieza de los circuitos, requiriendo también de instalaciones temporales que permitan evitar la contaminación de los equipos al circular a su través el fluido de limpieza. Existen otros sistemas temporales que utilizan procedimientos de limpieza de tuberías y equipos que en mayor o menor grado utilizan los propios componentes y equipos del sistema permanente, pero se ha seleccionado este como uno de los más representativos en la planificación de la construcción de una central térmica. Adicionalmente aunque las instalaciones temporales que se requieren en este sistema pueden ser consideradas “menores” en comparación con la infraestructura requerida en los casos anteriores, también resultan determinantes para alcanzar niveles de seguridad aceptables.

Las condiciones de la planta cuando se ejecutan las actividades de limpieza de las tuberías de aceite son muy diferentes al caso 2, seguramente la planta se encuentra en situación similar a la que se encuentra para el caso 1, es decir, la central se encuentra en fase de montaje electromecánico, los equipos principales se encuentran instalados en su lugar definitivo y el montaje de tuberías, bandejas y cables se encuentra a pleno rendimiento, lo que hace que coexistan actividades de comisionado con actividades de montaje en las mismas áreas de trabajo.

Para la realización de las actividades de este sistema, se ha incluido en el Anexo 3 el procedimiento de limpieza y la secuencia paso a paso que será necesario realizar para completar el proceso de modo que las condiciones del aceite cumplan con la norma y los requisitos específicos del fabricante de la máquina. En el anexo se han marcado las temporalidades y los diferentes circuitos de lavado que será necesario configurar para realizar las operaciones. Los circuitos que se han incluido se basan en los P&ID del sistema de aceite de lubricación y sistema hidráulico de la turbina de vapor. Se ha considerado que para la circulación del fluido a través de las tuberías se utilizarán las bombas que son utilizadas por el sistema durante su operación normal en el circuito que se va a lavar. Se han definido tres circuitos principales para la limpieza de cada circuito, designados como sigue:

- a) Lavado tuberías aceite de lubricación.
- b) Lavado tuberías aceite elevación.
- c) Lavado tuberías aceite hidráulico.

También se incluyen los circuitos completos y los P&IDs del Skid de aceite donde se encuentran el tanque de aceite y las bombas y componentes principales del sistema.

Destacar que las condiciones de operación de las bombas de aceite hidráulico (225 barg) exceden las condiciones de diseño de las líneas temporales (15 barg), por lo que existe un riesgo potencial de sobrepresurización de las líneas temporales en caso de que pueda obstruirse la salida. Por ello la propuesta incluye la regulación de presión hasta condiciones seguras utilizando la válvula autorreguladora de presión situada en la descarga de las bombas de modo que pueda ser limitada

de manera efectiva la presión máxima en las líneas temporales. Para la limpieza de aceite hidráulico se ha visto que la presión que proporcionan las bombas de aceite hidráulico también es muy superior a las condiciones de diseño de las mangueras temporales, pero no hay modo de realizar la regulación en el colector, por lo que se propone instalar un línea que conecte con la descarga de las bombas de aceite de lubricación, de manera que la limpieza se realice a través de esta línea temporal evitando superar las condiciones en las líneas temporales. Sin embargo es necesario vigilar que las condiciones en las líneas de retorno no superen las condiciones de presión prevista ya que se encuentran en el límite si se produce algún tipo de bloqueo o atasco y la presión aumenta en dichas líneas de retorno.

Hay que prestar especial atención a la colocación y soportación de las mangueras flexibles para el bypass durante el lavado, ya que soportarán un peso considerable cuando estén llenas de aceite. También es conveniente asegurar que en todo su recorrido no puedan sufrir cortes por fricción en sus bordes.

Durante las operaciones de lavado se puede utilizar el skid de filtros dúplex de manera que el aceite se filtre durante el lavado. Es necesario retirar la válvula de control de temperatura y reemplazarla por una pieza en T. Respecto de los intercambiadores de calor, en las operaciones iniciales, donde el grado de suciedad es mayor deben ser evitados instalando el correspondiente bypass, luego una vez que el sistema se considere "seguro", se utilizarán los intercambiadores siempre que se garantice que se han tomado las precauciones de limpieza previa durante el montaje. Se pueden utilizar medios auxiliares temporales para el control de temperatura del aceite durante el lavado para garantizar que los intercambiadores no sufren y se encuentran en perfectas condiciones en las pruebas de prestaciones de la planta. Todos los cojinetes / sellos de turbinas y generadores deben ser bypassados. Por último el virador de la turbina estará fuera de servicio durante el lavado.

En el Anexo 3 se han incluido las configuraciones necesarias en las conexiones de las líneas de lubricación y aceite hidráulico que deben ser realizadas para evitar la introducción de aceite sucio y con impurezas en los componentes internos de la turbina y el generador.

Antes de la ejecución del lavado será necesario inspeccionar y limpiar el tanque de aceite garantizando que no es una fuente de suciedad para el sistema. Además se verificará la instalación del filtro interno del tanque, que está instalado después de la conexión de la línea de retorno ya que será utilizado durante el lavado para reducir la contaminación del tanque. La válvula para control de temperatura del skid de aceite de lubricación debe ser reemplazada por una pieza de las mismas dimensiones y un disco ciego que se pueda colocar en cualquiera de las tres bridas. Durante las primeras fases de lavado (cuando hay máximo de suciedad), se instalará una brida ciega en la "conexión T" del lado del intercambiador. La idea es proteger el cambiador de daños durante los ciclos más intensivos de limpieza y suciedad. El uso posterior de los intercambiadores se decidirá por el equipo de pruebas.

Respecto al aceite de elevación en el procedimiento se proponen dos medios para limpiar el sistema, aislarla en las primeras fases y luego proceder con la limpieza, o instalar una conexión temporal para limpiar inicialmente el sistema con las bombas de aceite de lubricación, para luego

proceder con la limpieza del sistema regulando la presión mediante la válvula autorregulada ya mencionada antes. En el procedimiento se ha seleccionado esta segunda opción por considerarla más habitual que la primera.

Las mismas alternativas se proponen para el circuito de aceite hidráulico.

Es muy conveniente que antes de la circulación de aceite por las tuberías, se realice una prueba de presión del circuito y de las conexiones temporales con aire comprimido y una vez se haya instalado toda la tubería temporal. Con esto se persigue detectar las posibles fugas antes del arranque de las bombas y mejorar significativamente la seguridad y el tiempo requerido para estabilizar el sistema de aceite de lubricación en las operaciones de lavado (lecciones aprendidas de instalaciones anteriores). Adicionalmente, mientras que el sistema esté presurizado con aire, es conveniente realizar un soplado con aire utilizando el aire almacenado en el sistema. Esto es especialmente adecuado para las líneas de aceite de elevación donde los diámetros son pequeños, aunque también es adecuado para las líneas de aceite de lubricación (aquí sería necesario instalar un carrete en las conexiones de la línea de drenaje del aceite de lubricación cerca del tanque de aceite).

Antes de proceder con el inicio de las operaciones de lavado se procederá con un paseo para inspección final. Durante este paseo se prestará especial atención a algunos aspectos que han sido motivo de problemas y accidentes en otras instalaciones:

- Se asegurará que la tubería de venteo de vapores de aceite está dirigida a lugar seguro. En caso de no poderse asegurar por el estado de montaje de la planta, se instalará una manguera flexible temporal dirigida hacia el exterior.
- La documentación del Paquete Transferencia Parcial (TOP) del sistema esta correctamente realizada y se puede proceder con dicha transferencia. En ocasiones este sistema temporal forma parte de las responsabilidades del contrato de construcción y montaje, por lo que no siempre se realiza la transferencia del sistema. Atender a las responsabilidades de las compañías implicadas con objeto de mejorar la seguridad de las operaciones.
- Se verificará la correcta iluminación para la operación nocturna, el acceso seguro a las válvulas de descarga, la limpieza del área, así como los pulsadores de parada de bombas y la señalización de advertencia de riesgo de fugas y de alta temperatura.
- Se verificará también que se encuentran emitidos los permisos de trabajo requeridos y que los kits de fugas están disponibles.
- Finalmente se comprobará que los extintores de incendios se encuentran disponibles en aquellos lugares seleccionados y que se dispone de los contactos en caso de emergencia, de las instrucciones de lavado en lugar visible, etc.

El lavado de los sistemas de aceite generalmente se realizará de forma continua durante aproximadamente una semana. Después, habitualmente en la segunda semana, se realiza la fase de validación del sistema, donde se realizan las pruebas para detectar partículas hasta su parada final una vez que se ha confirmado que está listo y limpio para su operación normal.

Antes de realizar la limpieza se verificará que todo el equipo principal esté conectado a tierra y que el control local temporal así como los pulsadores de disparo de emergencia se encuentran probados y operativos.

La limpieza de las tuberías de aceite se realiza mediante la puesta en servicio de al menos una bomba de aceite de CA con solo una válvula de derivación abierta (todas las demás derivaciones deben estar cerradas para prestar especial atención a que la línea esté abierta). Si hay una válvula disponible en el colector de aceite, inicialmente se cerrará y luego se abrirá progresivamente para aumentar gradualmente el flujo y la presión en el sistema; Luego se aumentará gradualmente el caudal de aceite y la presión en la línea abriendo completamente la válvula, verificando al mismo tiempo que no hay fugas en el sistema. Se debe anotar cualquier pequeña fuga, vibración anormal y cualquier otro problema que pueda ser destacable. En caso de funcionamiento anormal, parar el sistema y solucionar los problemas detectados. Para cada línea de lavado, verificar la presión de la bomba y la corriente del motor (tomar lecturas de los valores de acuerdo con el plan de lavado).

Es conveniente realizar antes del lavado un lavado inicial, que se ha denominado lavado grosero o basto con el que se procede con la limpieza inicial de todo el sistema. Los circuitos de lavado se realizan mediante el denominado lavado secuencial que consiste en lavar los sistemas de lubricación, el sistema de elevación y el de aceite hidráulico en fases diferentes, de manera que se pueda para optimizar el caudal en las líneas. Se procede primero a limpiar los circuitos de aceite de lubricación, a continuación el sistema de elevación y finalmente el circuito hidráulico.

Mencionar, finalmente que la documentación de referencia necesaria para la realización de la limpieza y que debe así mismo, ser usada como documentación de apoyo por el equipo de revisión para el análisis de riesgos es la que se menciona en el Anexo 3:

- Plan HSE del Proyecto
- Plan de garantía de calidad del proyecto
- Directrices de limpieza de aceite de lubricación del fabricante de la turbina de vapor.
- P&ID del sistema de aceite de lubricación de la turbina de vapor.
- Descripción del Sistema de aceite de lubricación de turbina de vapor.
- P&ID del sistema de suministro hidráulico de la turbina de vapor.
- Manuales, guías de instalación e instrucciones de montaje de la turbina de vapor.
- Plan de calidad del sitio.
- Requisitos de calidad para subcontratistas de construcción.

7.3.2 Aplicación del procedimiento

Igual que en los casos anteriores, en el caso 3 se aplican los mismos procesos descritos en el capítulo 6. Aquí solo se describen los procesos relacionados con la propia revisión de seguridad ya que se ha supuesto que tanto la documentación como el estado de la planta se encuentra en disposición para realizar las actividades. Ya se ha comentado antes que tanto en la limpieza química como en el lavado de tuberías de aceite, el estado de la planta durante estas operaciones es muy diferente a como se encuentra durante el soplado de tuberías de vapor. Aquí coexisten simultáneamente las actividades de montaje y construcción con las actividades de lavado de aceite.

Como en casos anteriores la estructura de la revisión es por bloques de trabajo los cuales corresponden con la división de actividades de los pasos del procedimiento. En este caso, como en otros, se ha propuesto un procedimiento de ejecución que permita establecer con claridad los diferentes pasos y etapas en las que se divide el sistema temporal en estudio.

En el anexo 4 se muestran los resultados del análisis de riesgos realizado como aplicación directa de la metodología propuesta. El análisis se ha realizado de manera idéntica a como se ha descrito con mucho detalle en el primer caso de estudio de este capítulo por lo que no procede detallar como se ha realizado dicho análisis. Se puede deducir de la lectura de los resultados presentados como se ha realizado la tormenta de ideas y cuáles son las salvaguardas previstas por el diseño del sistema y en qué casos las barreras de protección no parecen lo suficientemente adecuadas. En esos casos se han realizado una serie de recomendaciones , las cuales se detallan y resumen en el apartado siguiente.

Conviene destacar algunas cuestiones relacionadas con el análisis realizado:

- Los circuitos no se encuentran lo suficientemente detallados. Esto ya ha ocurrido en el caso 2, frente a lo detallado de los circuitos y materiales empleados en el caso 1. Es lo habitual en este tipo de procedimientos, por lo que algunas recomendaciones abundan en asegurar que los circuitos, equipos y componentes se encuentran bien alineados para realizar las operaciones.
- Tanto el análisis como los resultados se presentan de modo que puedan ser fácilmente usados, se ha preferido esta solución a una solución con mayor grado de detalle que podría complicar tanto los escenarios como las conclusiones y recomendaciones.
- La documentación que se ha incluido en este caso es mucho menos detallada que la del caso 1. Por ejemplo aquí no se ha incluido las hojas de datos de los elementos temporales, como si se hizo en la limpieza química. Puede ser debido a que este sistema utiliza los equipos permanentes como medios principales de limpieza, frente al caso 1 donde tanto las bombas como otros equipos (Caldera auxiliar, tanques de recogida, incluso colectores temporales) son no permanentes.
- La documentación auxiliar eléctrica y de control también es muy escasa en la documentación soporte del fabricante y del contratista que realizará las actividades el cual emite la exposición de métodos.
- En este ejemplo se han detectado algunas situaciones peligrosas que han motivado proponer cambiar el procedimiento propuesto, como se verá en el apartado siguiente.
- La restauración del sistema solo puede analizarse en términos generales, dada la escasa documentación de detalle proporcionada

7.3.3 Resultados

Los resultados de la aplicación del método se encuentran incluidos en el Anexo 4.

En la Tabla 7.3.1 se muestra un resumen de las recomendaciones principales para aplicación en el sistema con objeto de reducir el nivel de riesgo de determinadas operaciones.

Capítulo 7- Aplicación de la metodología. Casos de estudio

Ítem	Desviación	Recomendación
1.1	Preparación de los skids de aceite Caso: Paso no ejecutado Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Incluir Check list detallado, incluyendo todos los aspectos de las instrucciones de la exposición de métodos. 2.- Definir equipo de revisión independiente en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso. 3.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables.
1.4	Ajustar el valor de presión en la válvula autorregulada MAV40-DP001 Caso: Paso no ejecutado Caso: Más presión que la prevista Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Instalar dispositivo temporal adicional de alivio de presión adecuado aguas arriba del dispositivo. 2.- Incluir alarma y disparo de bombas en caso de sobrepresión para evitar alcanzar la presión de diseño del sistema temporal de bypass. 3.- Incluir check list y firmas de los responsables con equipo de verificación en campo (doble chequeo).
1.5	Llenar el tanque de aceite de lubricación Caso: Más / menos nivel de aceite Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Proporcionar medios de llenado que eviten derrames o llenado excesivo. 2.- Incluir check list y firmas de los responsables con equipo de verificación en campo (doble chequeo).
2.1	Configuración del circuito de limpieza de aceite de lubricación Caso: Paso no ejecutado Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Incluir Check list detallado, incluyendo todos los aspectos a comprobar. 2.- Incluir P&IDs detallados numerando circuitos y posiciones de válvulas (abierta / cerrada) 3.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución del paso, incluyendo firma de los responsables y estado en el que queda el sistema para su reposición posterior de manera segura. 4.- Definir equipo independiente de revisión en campo que compruebe en detalle la ejecución del paso.
3.1.4	Arrancar sistema de aire comprimido Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Asegurar maniobras temporales del sistema de aire comprimido cuando se utiliza para fines de limpieza. 2.- Garantizar sistema de comunicación en planta 3.- Incluir sistema de bloqueo (local o a través del sistema de protección o de control) que permita el arranque por desbloqueo manual del operador para el arranque de los compresores de aire.
3.1.5	Verificar que no existen fugas. Reparar en caso necesario Caso: Paso no ejecutado Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Proporcionar instrucciones detalladas para la realización de las pruebas circuito a circuito. 2.-Incluir check list y firmas de los responsables con equipo de verificación en campo (doble chequeo) que compruebe sobre el mismo check list la correcta ejecución de las conexiones. 3.- Incluir reportes de las reparaciones realizadas en caso de fugas, dónde se ha detectado y cómo se ha corregido.
3.1.6	Realizar soplado con aire para expulsar material grueso antes del lavado Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Incluir instrucciones detalladas de operación para la apertura y cierre de la válvula de soplado. 2.- Identificar los circuitos de soplado y el alineamiento del sistema para cada circuito a soplar, numerándolos y marcando en P&IDs las posiciones de válvulas y equipos.
3.1.7	Reponer el sistema a la condición de operación de lavado Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Identificar los circuitos de soplado y el alineamiento del sistema para cada circuito a soplar, numerándolos y marcando en P&IDs las posiciones de válvulas y equipos para poder reponer el sistema adecuadamente. 3.- Incluir check list y firmas de los responsables con equipo de verificación en campo (doble chequeo) que compruebe sobre el mismo check list la correcta ejecución de la reposición.
4.3	Verificar que se ha realizado la instalación y pruebas de los pulsadores temporales de operación local y pulsadores de disparo. Caso: Paso no ejecutado	1.- Incluir procedimiento de pruebas específico para la verificación de los pulsadores temporales de operación local y pulsadores de disparo. 2.-Detallar los circuitos a probar y las maniobras a realizar. Establecer las condiciones para la prueba. 3.- Incorporar hoja de firmas de la ejecución de las pruebas, incluyendo firma de los responsables y estado en el que queda el sistema para su reposición posterior de manera segura.
5.1.4	Disponer el equipo de limpieza en lugares estratégicos comunicados por radio. Caso: Paso no ejecutado. Caso: Acción ejecutada incorrectamente.	1.- Preparar plan de comunicaciones para las pruebas incluyendo estudio de pruebas a realizar y necesidades de recursos. 2.-Detallar los equipos y recursos requeridos para la ejecución segura de las pruebas. 3.- En el plan de pruebas será necesario incluir detalles de turnos y personal necesario en cada localización. Incluir planos y schedule de turnos.
5.3.2	Ajustar la presión de trabajo con el regulador de presión y comprobar ajustes de las válvulas de alivio y seguridad Caso: Paso no ejecutado. Caso: Mas presión de la requerida. Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente	1.- Disponer de elementos de enclavamiento local o en DCS que impidan la operación por encima de los valores de diseño de los elementos no-permanentes de la instalación. Incluir alarmas de presión. 2.-Estudiar alternativas para el lavado de las tuberías que no necesite más presión de la presión de diseño de los elementos temporales. 3.- Asegurar que la presión de diseño de los elementos temporales siempre es superior a la de los componentes y equipos permanentes.

Ítem	Desviación	Recomendación
5.3.7	<p>Verificar el flujo de aceite. Abrir válvulas de lavado y comprobar el flujo. Verificar fugas y reparar si es necesario</p> <p>Caso: Paso no ejecutado. Caso: Más/menos apertura de válvulas Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto. Caso: Acción ejecutada incorrectamente.</p>	<p>1.- Incluir instrucciones detalladas del orden a seguir para la revisión de los circuitos marcando P&IDs y numerando el alineamiento de válvulas para cada prueba de cada circuito.</p> <p>2.- Incluir check list con firmas de los responsables.</p> <p>3.- Incluir reportes de las reparaciones realizadas en caso de fugas, dónde se ha detectado y cómo se ha corregido.</p>
5.5.2	<p>Alinear los circuitos a lavar de manera secuencial</p> <p>Caso: Paso no ejecutado. Caso: Más/menos apertura de válvulas Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto. Caso: Acción ejecutada incorrectamente.</p>	<p>1.- Incluir circuitos de limpieza marcados en P&IDs con alineamiento de válvulas y equipos y numeración de todos ellos para evitar errores.</p> <p>2.- Cada circuito de limpieza debe disponer de hojas de registro de datos y verificaciones realizadas durante las operaciones de limpieza.</p>
5.5.4	<p>Validar finalización del lavado de acuerdo con valores de referencia y norma ISO</p> <p>Caso: Acción ejecutada incorrectamente.</p>	<p>1.- Proporcionar instrucciones detalladas para realizar las operaciones de toma de muestra.</p>
5.6.1	<p>Verificar presión de trabajo del sistema, ajuste del setting de presión en válvula MAV40-DP001</p> <p>Caso: Paso no ejecutado. Caso: Más presión de la requerida. Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.- Disponer de elementos de enclavamiento local o en DCS que impidan la operación por encima de los valores de diseño de los elementos no-permanentes de la instalación. Incluir alarmas de presión.</p> <p>2.-Estudiar alternativas para el lavado de las tuberías que no necesite más presión de la presión de diseño de los elementos temporales.</p> <p>3.- Asegurar que la presión de diseño de los elementos temporales siempre es superior a la de los componentes y equipos permanentes.</p>
5.7.2	<p>Alinear los circuitos a lavar de manera secuencial</p> <p>Caso: Paso no ejecutado. Caso: Más/menos apertura de válvulas Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto. Caso: Acción ejecutada incorrectamente.</p>	<p>1.- Incluir circuitos de limpieza marcados en P&IDs con alineamiento de válvulas y equipos y numeración de todos ellos para evitar errores.</p> <p>2.- Cada circuito de limpieza debe disponer de hojas de registro de datos y verificaciones realizadas durante las operaciones de limpieza.</p>
6.1	<p>Restauración mecánica del sistema</p> <p>Caso: Paso no ejecutado Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.- Las operaciones de restauración deben ser realizadas por especialistas en montaje limpio para evitar contaminaciones adicionales que puedan dañar la turbina.</p> <p>2.- Se ha sugerido la preparación de un P&ID detallado numerando e identificando de manera inequívoca los componentes y equipos a ser retirados/repuestos para las instalaciones temporales. Su edición y uso en este apartado es determinante para evitar situaciones de riesgo para las personas, los equipos y el medioambiente.</p> <p>3.- Preparar un Check list específico con hojas de firmas de los responsables.</p> <p>4.- Es recomendable indicar las operaciones a ser realizadas de manera inequívoca mediante la preparación de un procedimiento secuencial que evite errores.</p>
6.2	<p>Restauración eléctrica del sistema</p> <p>Caso: Paso no ejecutado Caso: Paso ejecutado en orden incorrecto Caso: Acción ejecutada incorrectamente</p>	<p>1.- Las operaciones de restauración deben ser realizadas idealmente por equipos de montaje especializado para asegurar su reposición adecuada.</p> <p>2.- Preparar un Check list específico con hojas de firmas de los responsables asegurando qué circuitos y alimentaciones eléctricas han sido modificadas a su estado original.</p> <p>3.- Es recomendable indicar las operaciones a ser realizadas de manera inequívoca mediante la preparación de un procedimiento secuencial que evite errores.</p>

Tabla 7.3.1.- Resumen de recomendaciones del análisis de riesgos del lavado aceite de turbina.

Como en los casos anteriores, se pueden establecer los siguientes grupos de recomendaciones:

1. Recomendaciones relacionadas con la instalación de dispositivos y equipamiento de protección adecuados para garantizar la reducción de los niveles de riesgo de determinadas operaciones. Entre estas se han identificado las siguientes más relevantes:
 - a) Para la regulación de presión en el cabezal de descarga de las bombas de aceite de elevación (paso 1.4.), se ha recomendado instalar un dispositivo temporal adicional a la

propia válvula de alivio de presión adecuado aguas arriba del dispositivo para garantizar que no hay riesgo por sobrepresión. También se ha propuesto la inclusión de una alarma y lógica de disparo de bombas en caso de sobrepresión para evitar alcanzar la presión de diseño del sistema temporal de bypass.

Acción alternativa: En el paso 5.6.1., se ha comprobado que el rango de operación de la válvula autorregulada de presión en el cabezal de descarga de las bombas es muy superior a la presión de regulación a la que debe disminuirse por lo que se ha propuesto como método alternativo mantener la configuración inicial del sistema que incluye un bypass temporal para la limpieza inicial del sistema de aceite de elevación, de modo que la limpieza definitiva se realice a través de esta configuración de manera que no se precise ajustar la presión de trabajo en la válvula autorregulada, dadas las dificultades reales para conseguir dicha presión de trabajo.

- b) Para el soplado con aire comprimido se requiere incluir un sistema de bloqueo (local o a través del sistema de protección o de control) que permita el arranque por desbloqueo manual del operador para el arranque de los compresores de aire.
 - c) Disponer de elementos de enclavamiento local o en DCS que impidan la operación por encima de los valores de diseño de los elementos no-permanentes de la instalación. Incluir alarmas de presión (recomendación del paso 5.3.2).
2. Igual que en los casos anteriores, se proporcionan también recomendaciones relacionadas con el aseguramiento de la ejecución de tareas. Entre estas se encuentran:
- a) Incluir lista de tareas con lista de verificación asociada que garantice la revisión de la realización del paso asegurando su correcta ejecución.
 - b) Establecer un equipo independiente de revisión en campo que compruebe de manera detallada que el paso se ha ejecutado de manera correcta. Se ha definido como doble verificación, la que realiza por un lado el operador de campo cumplimentando la lista de verificación requerida y la que lleva a cabo un segundo equipo que verifica las operaciones realizadas.
 - c) La verificación del equipo independiente de campo debe incorporar la correspondiente hoja de firmas tanto para el operador que realiza la tarea como para el operador u operadores que la comprueban.
 - d) Requerir un equipo especializado en montaje “limpio” que realice las tareas de reposición de una manera adecuada garantizando que la limpieza realizada no se ve contaminada por acciones o maniobras incorrectas.
3. Otras recomendaciones de carácter más general, como son:
- a) Se ha detectado que en este sistema no se proponen hojas de registro para cada circuito de limpieza. Se recomienda disponer de hojas de registro de datos y verificaciones realizadas durante las operaciones de limpieza, toma de datos en campo y lista de variables a controlar/monitorizar.
 - b) El aseguramiento de la disposición en planta de los necesarios repuestos y equipamiento adecuado para no retrasar las operaciones y no impactar en el cronograma de pruebas.
 - c) Recomendaciones relacionadas con la inclusión de mayor grado de detalle en los manuales y en las instrucciones de operación, véase como ejemplo la necesidad de identificar los

circuitos de soplado con aire comprimido así como el correcto alineamiento del sistema para cada circuito a soplar, numerando y marcando en P&IDs las posiciones de válvulas y equipos para cada tramo, perfectamente identificados y regulados, tal como se solicita en el paso 5.6.

- d) Recomendaciones relacionadas con la seguridad industrial, como son aquellas que aseguran la disposición adecuada de los espacios o las relacionadas con los vertidos y drenajes o aquellas que requieren medios adicionales para garantizar que las operaciones se realizan de una manera adecuada, por ejemplo medios adecuado para el llenado del tanque de aceite.
- e) Recomendaciones relacionadas con el plan de comunicaciones y la dotación de personal para cubrir las necesidades en todo el recorrido y posiciones estratégicas.

Capítulo 8. Conclusiones

Los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica han ido incorporando a lo largo de los últimos años las metodologías de identificación de peligros y análisis de riesgos que en otros sectores se han estado desarrollando e implementando durante décadas. Hasta que los cambios tecnológicos del sector eléctrico no han evolucionado a otras tecnologías como las relacionadas con el uso de fuentes renovables y los mercados eléctricos se han abierto de una manera definitiva, el sector ha mantenido los estándares y metodologías de trabajo que históricamente han proporcionado resultados suficientes como para no necesitar implementar o desarrollar mejoras que, aparentemente, podrían no ser de aplicación en sus proyectos. De hecho, tan alto grado de consolidación metodológica en el terreno del análisis de riesgos ha podido constituir una autentica barrera a algunas técnicas de análisis de riesgos que venían siendo implantadas con una cierta fluidez en sectores industriales que, por sus circunstancias específicas de peligrosidad, avanzaban en la mejora continua de la seguridad en las instalaciones y en los procesos químicos que las configuran. El sector eléctrico, en términos generales, muestra una cierta rigidez y poca flexibilidad a la incorporación en su metodología de las nuevas técnicas de análisis de riesgos que si son incorporadas de manera continua en otros sectores industriales.

Las centrales de generación eléctrica alcance de este estudio, basan su sistema productivo en la conversión de la energía química del combustible en energía mecánica mediante la aplicación de los ciclos termodinámicos en los que basan su tecnología, por lo que los procesos fisicoquímicos empleados en la producción eléctrica deben considerar los riesgos asociados a dichos procesos como parte de su sistema de gestión de riesgo.

Se ha podido comprobar que actualmente en términos generales, los proyectos de construcción de plantas de generación eléctrica incluyen en su sistema de gestión un sistema basado en riesgos, el cual es incorporado en las distintas etapas de su ciclo de vida. Atienden a los cuatro pilares aceptados como básicos para el sistema de gestión. Incorporan en su sistema de gestión la seguridad del proceso, la comprensión de los peligros y los riesgos, la gestión continua de los riesgos y el aprendizaje de la experiencia a través de un sistema de lecciones aprendidas. Sin embargo, si se profundiza en aquellos estudios y análisis de riesgos que se realizan en cada una de las etapas que forman parte del ciclo de vida del proyecto y se comparan con los que se vienen realizando históricamente en otros sectores industriales, el resultado puede decirse que ni es tan claro ni es tan satisfactorio como inicialmente puede parecer.

En las etapas de ingeniería incorporan selectivamente los estudios de riesgos de aplicación a cada fase del proyecto. Así, en la fase de definición conceptual de la instalación realizan los estudios de identificación de peligros que se requieren para garantizar la viabilidad de las inversiones y el cumplimiento normativo. Del mismo modo, durante las etapas de ingeniería básica y de detalle desarrollan los estudios que complementan los realizados en las etapas iniciales incorporando

adicionalmente los estudios de riesgos de proceso más comunes. En las etapas de construcción y comisionado utilizan las herramientas, técnicas y estudios que vienen siendo habituales en estas actividades, limitando al máximo la aplicación de otras técnicas algo más novedosas.

La incorporación de prácticas de diseño inherentemente seguro deberían incorporarse de manera rigurosa y protocolizada en etapas tempranas del proyecto. La incorporación de informes justificativos y estudios específicos que atiendan al diseño inherentemente seguro contribuiría de manera significativa a la incorporación de estas técnicas a las etapas de diseño del ciclo de vida del proyecto. Incorporar un método riguroso que establezca una metodología de análisis sobre una de las cuatro principales categorías estratégicas (inherente, pasiva, activa y procedimental), puede contribuir de manera determinante a la adopción de técnicas novedosas que contribuyan a la reducción del riesgo en las diferentes etapas que constituyen la construcción de centrales térmicas.

La implantación de análisis de factores humanos para revisar los riesgos y problemas relacionados con los factores humanos, respecto de la ergonomía física, el potencial del error humano y problemas tales como la priorización de alarmas, etiquetado, señalización, ruido e iluminación proporcionarían mejoras notables en todos aquellos aspectos relacionados con la respuesta del operador durante la operación normal de la planta y ante situaciones de emergencia. Sistematizar la elaboración de un estudio específico de factores humanos sería muy bien recibido por los interesados en la construcción de este tipo de plantas. La incorporación de la figura del coordinador de ingeniería de factores humanos como parte del equipo de HSE del proyecto, el cual entre otros cometidos tendría la elaboración del Plan de ingeniería de factores humanos contribuiría de manera eficaz a la generalización de los factores humanos como parte determinante de la seguridad.

Asimismo, la adecuación a las especificidades propias del sector eléctrico y la incorporación estandarizada de estudios específicos para los sistemas de parada de emergencia y sistemas instrumentados de seguridad incorporaría la seguridad de los sistemas de control y seguridad a los estándares más rigurosos. Actualmente este tipo de estudios se lleva a cabo sin la necesaria adaptación a las particularidades de los sistemas instalados en estas plantas transponiendo directamente directivas y normas de otros sectores, lo que en ocasiones dificulta la correcta aplicación de los estándares a las especificidades y particularidades del sector. Los promotores de las plantas deberían asumir el liderazgo de estos estudios incorporando los estándares de la norma a las plantas, de manera que los criterios de aplicación fuesen tan directos y claros como en otros sectores industriales.

Esta poco extendida la participación del equipo de construcción en las etapas de ingeniería. Desde el punto de vista de la seguridad, sería muy conveniente que los especialistas que dirigen las actividades de construcción en el sitio participen de algún modo en alguna fase de diseño aportando su punto de vista, el cual es muy diferente al que tiene la ingeniería en gabinete. Existen diversas formas de participación y algunos contratistas y tecnológicos piden en determinados momentos su asistencia. Hay algunas formas de realizar esto, bien mediante la participación del equipo de construcción en los estudios de operabilidad en alguna sesión específica dedicada a ello,

o bien, realizando un estudio de operabilidad específico para construcción, el cual se viene desarrollando en otros sectores.

La incorporación de estudios de operabilidad aplicados a los sistemas de control para llevar a cabo el análisis de seguridad y confiabilidad de dichos sistemas mejoraría la seguridad de los procesos que intervienen en la producción de electricidad. Estos estudios se pueden realizar de varias maneras y con distintos objetivos en función de los resultados esperados. Se puede realizar un análisis de operabilidad de los sistemas de control para completar los estudios de análisis de riesgos para los sistemas de proceso o se puede enfocar el estudio en la confiabilidad de los sistemas de control implicados en la producción de la planta. El elevado grado de automatización de las centrales eléctricas ha sido históricamente una característica tecnológica determinante de su base productiva, entre otras razones por la compleja interacción entre los diferentes equipos y componentes de la instalación y la necesidad de consumir la energía eléctrica producida de manera instantánea en la red. Participar y liderar los avances en materia de seguridad de los sistemas de control que gobiernan los procesos productivos del sector debería ser atendido con la máxima naturalidad por los implicados, sin embargo por el momento no se incorporan estas prácticas entre los estándares de aplicación en los proyectos, lo que resulta del todo incomprensible.

Se ha podido comprobar también, que para los sistemas temporales, los cuales se encuentran en la frontera de sistemas que se implementan en la última etapa de la construcción y en las primeras fases de las etapas de la puesta en marcha de la planta (precomisionado y comisionado), se vienen tratando con consideraciones similares a las que se le dan a las tareas y trabajos de la etapa de construcción. Proporcionar la exposición de métodos o un análisis de seguridad en el trabajo, puede resultar suficiente para la realización de actividades propias de la construcción, sin embargo para los sistemas temporales, los cuales también manejan sustancias y condiciones de operación peligrosas en determinadas circunstancias, no todos los peligros pueden ser correctamente identificados si no se realizan análisis como los que se vienen realizando para otros peligros de proceso. Las condiciones diferentes de presión, caudal y temperatura que manejan estos sistemas, deberían tener una consideración similar a la que se dan en el resto de los sistemas de proceso de la planta. Si se tiene en cuenta además, la práctica habitual de subcontratación externa de los mencionados sistemas temporales favorece la falta de disponibilidad y dedicación de los especialistas de seguridad involucrados en los análisis de riesgos de proceso que si participan en los estudios del resto del proyecto.

Disponer de una herramienta flexible, ágil y robusta que permita realizar un análisis de riesgos identificando los peligros de proceso que de otro modo podrían pasar desapercibidos ha sido uno de los objetivos del presente trabajo, teniendo en cuenta además los condicionantes mencionados antes. Hay otras metodologías que abordan el problema e incorporan diferentes enfoques en los métodos de análisis durante la fase de pruebas y puesta en servicio, pero ninguno aborda específicamente las particularidades y especificidades que se dan en los mencionados sistemas temporales. La metodología propuesta en esta tesis conjuga la flexibilidad y adaptación con el rigor necesario para garantizar que los niveles de riesgo se reducen a la categoría de aceptables.

El método propuesto basa su metodología en el éxito de otros métodos de análisis de riesgos e identificación de peligros similares que a lo largo de los años han proporcionado resultados satisfactorios. El método también se basa en la formación de equipos de trabajos especializados que a través de talleres y reuniones grupales ponen en marcha la técnica de la tormenta de ideas a través de preguntas con palabras guía predefinidas.

La constitución de un comité de seguridad que asista a los especialistas en la etapa de puesta en marcha, participe y dirija la aplicación del método de manera coordinada con el equipo de dirección del comisionado, es una práctica muy recomendable para la prevención de riesgos durante la ejecución de las pruebas y, específicamente para la aplicación de la metodología propuesta. Entre las funciones de este comité estaría la decisión de la selección de los sistemas sobre los que aplicar el método propuesto.

El método propuesto se ha aplicado a tres sistemas temporales con alcances diferentes, desde un sistema que utiliza muchas instalaciones, equipos y componentes externos a la instalación permanente, como es el caso de la limpieza química, hasta un sistema que emplea pocos componentes no permanentes, como es el caso del sistema de lavado de tuberías de aceite, pasando por un sistema de características muy especiales ya que emplea los sistemas de caldera y la propia caldera para la generación del vapor usado para el soplado de las tuberías de vapor que alimentarán a la turbina, utilizando por lo tanto la instalación en una situación previa al primer vapor a turbina. Los resultados obtenidos en los tres casos pueden ser considerados excelentes ya que en todos ellos se detectaron algunas mejoras importantes que mejoran notablemente la seguridad del sistema, evitando accidentes y daños a las personas.

En los resultados de la aplicación del método se encuentran propuestas de mejora relacionadas con la instalación de dispositivos y equipamiento de protección adecuados que garanticen la seguridad de las operaciones. Se proponen enclavamientos locales, instalación de equipamiento adicional, como válvulas de alivio térmico y de presión o la incorporación de alarmas y lógicas adicionales en los sistemas de control involucrados, que permitan reducir los niveles de riesgo de determinadas operaciones. Otro grupo de recomendaciones es el relativo al estado operativo de los sistemas de control, con el estado real en el que se encuentran, después de las pruebas y ajustes realizadas en las fases previas de comisionado, asegurando la trazabilidad de los resultados, verificando asimismo, el estado de los pendientes de tal manera, que las operaciones sean seguras. En ocasiones se proponen métodos alternativos de la configuración del sistema para evitar situaciones peligrosas que pueden provocar accidentes o fallos de equipos y componentes que pueden trabajar en condiciones de diseño muy ajustadas o al límite. En otros casos, se realizan recomendaciones que garanticen el nivel de formación y entrenamiento de los operadores que se harán cargo de las maniobras en aquellos casos en los que la complejidad y experiencia lo requieran. Es general, la búsqueda del aseguramiento de la ejecución de tareas, por lo que reiteradamente se busca asegurar mediante la recomendación de la preparación de listas de verificación, que las tareas que se requieren son realizadas de manera efectiva por los operadores. Se propone en ocasiones la doble verificación en campo. También se encuentran recomendaciones de carácter más general, como es el aseguramiento de repuestos y equipamiento adecuado para no retrasar las operaciones o recomendaciones relacionadas con la seguridad industrial,

Se puede afirmar que tras el estudio detallado que se ha realizado sobre un número suficientemente representativo de proyectos del estado del arte en referencia al análisis de riesgos que se desarrolla en cada una de las etapas del ciclo de vida del proyecto, dentro del alcance de esta tesis, el sector eléctrico ha incorporado los principales estudios de análisis de riesgos en los proyectos de construcción de centrales eléctricas. Si quiere seguir evolucionando adaptando los mejores estándares de calidad y normativa, debería incorporar sin demora las nuevas técnicas que se vienen desarrollando en los últimos años en relación con los sistemas de seguridad y los factores humanos. Retrasar su incorporación como históricamente ha ocurrido con otras técnicas de análisis sin llevar a cabo su adaptación a las especificidades del sector, no proporcionará ventajas significativas.

El método propuesto para la mejora de la seguridad de las operaciones de las actividades realizadas en las etapas de construcción y comisionado con los sistemas temporales ha proporcionado resultados satisfactorios. Es un método ágil, flexible y de rápida y fácil implementación, por lo que se recomienda su incorporación en todos los proyectos de construcción de centrales eléctricas similares a las estudiadas en esta tesis.

Capítulo 9.

Trabajos futuros

La presente tesis ha abordado dos aspectos diferenciados entre sí. Por un lado ha proporcionado un estudio detallado del estado del arte de los análisis de riesgos que se realizan habitualmente en los proyectos de construcción de las centrales térmicas dentro del alcance. Ha proporcionado un estudio no realizado hasta la fecha, por lo que aporta una visión global desconocida hasta la fecha. Se ha proporcionado un visión novedosa de los sistemas temporales que se emplean en las etapas finales de la construcción y durante el comisionado, requiriendo un tratamiento relacionado con los riesgos de proceso. Como resultado se ha propuesto una metodología de análisis de riesgos, que en si misma constituye una aportación al conocimiento.

La tesis, abre por tanto, nuevas líneas de trabajo y desarrollo, como son:

- Identificar instalaciones temporales en plantas de energía renovable termosolar y aplicar la metodología, por ejemplo para sistemas de almacenamiento térmico en plantas termosolares, los cuales probablemente requieran de elementos propios dadas las características de las sales. Por ejemplo los procesos de fusión de sales o los procesos de llenado de tanques de sales, así como maniobras específicas que garanticen los estándares de seguridad de estas instalaciones.
- Aplicar la metodología con las necesarias adaptaciones a las plantas que utilizarán hidrogeno como combustible ya sea en instalaciones similares a las descritas aquí, a las pilas de combustible o en aquellas que se encuentran actualmente en desarrollo.
- Extender la aplicación de la metodología propuesta a otras disciplinas, como por ejemplo a los sistemas temporales eléctricos, adaptarla en su caso y estudiar las palabras guía más adecuadas, las listas de verificación que se requieran en base a los nuevos sistemas encontrados, puede ampliar y mejorar el método propuesto.
- Desarrollar un procedimiento específico para gestión de modificaciones temporales en los sistemas de instrumentación y control, en concreto preparar un método similar al propuesto aquí para la gestión eficiente en términos de incremento de la seguridad para los sistemas de control y protección de la central. La gestión de las temporalidades en los sistemas de control resulta determinante para evitar accidentes. Téngase en cuenta el elevado grado de automatización de que disponen estas instalaciones, por lo que la gestión adecuada del software y hardware temporal es fundamental para una gestión eficiente de la seguridad.
- Adaptar los estudios y técnicas de análisis de riesgos a las particularidades del sector eléctrico. Debería profundizarse en la aplicación de la normativa IEC 605011 y normativa relacionada con los estudios SIL a las particularidades de la construcción de las plantas de producción de energía eléctrica. Aquí es muy determinante como incorpora la normativa en sus instalaciones en todo el ciclo de vida de la planta los propietarios y explotadores de la central.

- Incorporar los estudios C-HAZOP como parte de la metodología de análisis de riesgos. No se entiende que con el elevado grado de automatización de estas instalaciones no se realicen este tipo de estudios. Al menos debería ir incorporándose paulatinamente, igual que lo están incorporando otros sectores industriales. Estudiar detalladamente su incorporación al sector eléctrico, podría resultar de interés.
- Profundizar y proporcionar métodos de trabajo ágiles en la incorporación de los estudios de factores humanos aplicados al sector eléctrico.

Aunque otros sistemas mecánicos ya disponen de metodologías similares, como es el caso de Piping HAZOP, extender la técnica propuesta en otras disciplinas puede resultar de interés.

Referencias

- [1] IEC/ISO 31000, *UNE-ISO 31000 Gestión del riesgo. Directrices*. España: AENOR, 2018.
- [2] España Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*. España, 2015, pp. 97531–97567.
- [3] Unión Europea, *Directiva 2012/18/UE relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*, no. 2. pp. 1–37.
- [4] David Jones., *Nomenclature for hazard and risk assessment in the process industries*, 2nd editio. Institution of Chemical Engineers, 1992.
- [5] Joaquim Casal - Helena Montiel Eulàlia Planas - Juan A. Vílchez., *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Edicions UPC, 1999.
- [6] A. Muñoz, J. Rodríguez, and J. Martínez, *La Seguridad Industrial Fundamentos y Aplicaciones*. Ministerio de Industria y Energía, 2006.
- [7] T. G. M. J.M Storch de Gracia, *Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*, 2ª Edición. Instituto Superior de la Energía, 2008.
- [8] P. Burgherr and S. Hirschberg, ‘Severe accident risks in fossil energy chains: A comparative analysis’, *Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 538–553, 2008.
- [9] S. G. and D. R. Hirschberg S., *Severe Accidents in the Energy Sector*, First edit. Paul Scherrer Institut, 1998.
- [10] EU, ‘European Commission MARS. Statistics’, 2020. [Online]. Available: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/statistics/statistics>.
- [11] Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, ‘Accidents related to incorrect circuit positioning. Understanding causation to prevent re-occurrence’, 2018.
- [12] ARIA, ‘Gas Boilers accidentology feedback’, 2008.
- [13] R. W. Johnson, ‘Risk management by risk magnitudes’, *Chemical Health & Safety*, 1998.
- [14] Protección Civil, ‘Guía Técnica. Análisis del riesgo en los establecimientos afectados de nivel inferior en el ámbito de seveso II’, 2004.
- [15] J. L. Hawksley, ‘Risk management practice in the process industries’, 2012.
- [16] Comisión de las Comunidades Europeas, *Decision de la Comisión por la que se establece el control de los riesgos inherentes a los accidentes graves, el formulario de declaración de accidente grave*. Diario Oficial de la Unión Europea, 2009, pp. 64–78.
- [17] A. Barrena Medina, ‘Comparativa Directiva 2012/18/UE por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE’, *Actualidad Jurídica Ambiental*. Ministerio del Interior. Protección Civil España, 2012.
- [18] N. Mitchison and S. Porter, ‘Guidelines on a Major Accident Prevention Policy and Safety Management System , Table of Contents’, *Institute for Systems informatics and*

- safety*, no. Seveso Ii, p. 17, 1996.
- [19] Gobierno de España, *7373 Orden PRE/1206/2014, de 9 de julio, por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*. 2014.
- [20] Ministerio del Interior, *Rd 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas*. 2003, pp. 36428–36471.
- [21] Gobierno de España, *10653 Real Decreto 1070/2012, de 13 de julio, por el que se aprueba el Plan estatal de protección civil ante el riesgo químico*. 2012.
- [22] AENOR, *UNE 192001:2011 Procedimientos de inspección en establecimientos afectados por la reglamentación de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*. 2011.
- [23] J. Ruiz Gimeno, A. Garcés de Marcilla Val, A. Miñana Aznar, E. González Ferradás, A. M. Cano Sarabia, and J. Martínez Alonso, *Casos prácticos de análisis de riesgos (en establecimientos afectados de nivel inferior, en el ámbito del Real Decreto 1254/1999 [Seveso II])*. Protección Civil España y Universidad de Murcia, 2005.
- [24] Protección Civil, ‘Guía Técnica para la comunicación de riesgos. Visión General’, 1994.
- [25] Dirección General de Protección Civil, ‘Guía Técnica. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos’, *Protección Civil España*, 1994.
- [26] Dirección General de Protección Civil, ‘Guía Técnica. Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos’, *Protección Civil España*, 1994.
- [27] Protección Civil, ‘Cuadernos de Legislación de Protección Civil. Riesgos Químicos y Medioambientales’, 2006.
- [28] Joint Research Center EU, ‘JRC publications repository’. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository>.
- [29] Z. Gyenes, M. H. Wood, and M. Struckl, *Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks, EUR 28518*. 2017.
- [30] Joint Research Centre EU, ‘A guide to the equipment , methods and procedures for the prevention of risks , emergency response and mitigation of the consequences of accidents : Part I’, 2018.
- [31] R. de E. y S. de Canarias, ‘Información a la población de los establecimientos afectados por Directiva Seveso’. [Online]. Available: <https://www.gobiernodecanarias.org/emergencias/seveso/index.html>.
- [32] Jefatura del Estado, *Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales*. BOE Legislación Consolidada, 2014, p. 9.
- [33] Boletín Oficial del Estado, ‘Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.’, *Boletín Oficial del Estado*, vol. 27, no. 31/01/1997, pp. 1–38, 1997.
- [34] E. R. Decreto *et al.*, ‘Orden TIN / 2504 / 2010 , de 20 de septiembre , por la que se desarrolla el Real Decreto 39 / 1997 , de 17 de enero , por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención , en lo referido a la acreditación de entidades especializadas como se’, pp. 1–26, 2015.

-
- [35] Boletín Oficial del Estado, *Guía Técnica Señalización de Seguridad y Salud en el Trabajo*. 1997.
- [36] Ministerio de Industria Turismo y Comercio, *Real Decreto 2267 / 2004 , de 3 de diciembre , por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales*, vol. 303, no. 21216. 2004, pp. 41194–41255.
- [37] Boletín Oficial del Estado, *Rd 393/2007 Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia*, vol. 4. 2012, p. 11.
- [38] Ministerio de la Presidencia, ‘Real Decreto 681/2003. La protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.’, *Boletín Oficial del Estado*, pp. 23341–23345, 2003.
- [39] Occupational Safety and Health Administration, *29 CFR part 1910 section 119 Process safety management of highly hazardous chemicals*. United States Of America.
- [40] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health, *OSHA 3132 2000 Process Safety Management (PSM)*. Occupational Safety and Health Act, 2000.
- [41] OSHA, *OSHA 3133 Process Safety Management Guidelines for Compliance*. 1994, p. 14.
- [42] Steve Arendt Don Lorenzo, L. V. H. Bill Bradshaw, and W. Frank, *Guidelines for Risk based process safety*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [43] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*, Third Edit. John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [44] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for integrating process safety into Engineering Projects*. New York, NY 10005: AIChE and John Wiley & Sons, Inc, 2019.
- [45] W. G. Bridges, A. M. Dowell, M. Gollin, W. A. Greenfield, J. M. Poulson, and W. Turetsky, *Layer of Protection Analysis SIMPLIFIED PROCESS RISK ASSESSMENT*. Center for Chemical Process Safety Layer of Protection Analysis Sub- committee, 2001.
- [46] ‘checklist and examples of CCPS Engineering projects’ . .
- [47] American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Performing Effective Pre-Startup Safety Reviews*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [48] American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 1173 Pipeline Safety Management System Requirements*, no. July. 2015.
- [49] American Petroleum Institute, ‘API-RP-750-Management-of-Process-Hazards’. 1990.
- [50] ISO 45001, ‘Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. ISO 45001:2018’, *Secretaría Central del ISO en Ginebra, Suiza*, 2018.
- [51] ISO 150008, *UNE ISO 150008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental*. España, 2008.
- [52] *IEC 61511 Safety Instrumented Systems for the Process Industry*. 2003.
- [53] IEC, ‘IEC 61508- Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems-Part 1: General requirements’, 2010.
- [54] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for initiating events and independent protection layers in Layer Protection Analysis*, American I. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
-

-
- [55] CCPS, *Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [56] American Chemistry Council (ACC), 'Responsible Care Management System® and Certification', 2013.
- [57] F. Crawley, *A Guide for Hazard Identification Methods*. Elsevier, 2021.
- [58] T. A. Kletz, 'Hazop & Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards, Fourth Edition'. p. 232, 1999.
- [59] C. Sam Mannan, PE, *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, Third Edit. Elsevier, 2005.
- [60] Daniel A. Crowl/Joseph F. Lowar, *Chemical Process Safety Fundamental with Applications*, Second Edi., vol. 16, no. 12. Prentice Hall PTR, 2012.
- [61] M. Rausand and S. Haugen, *Risk Assessment Theory, Methods, and Applications*, no. second edition. John Wiley & Sons, Inc, 2020.
- [62] P. K. Marhavilas, D. Koulouriotis, and V. Gemeni, 'Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*, vol. 24, no. 5, pp. 477–523, 2011.
- [63] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 'Seguridad inherente: rutas de síntesis y diseño de procesos', *Notas Técnicas de Prevención*, no. 1066, pp. 1–6, 2016.
- [64] S. Rathnayaka, F. Khan, and P. Amyotte, 'Risk-based process plant design considering inherent safety', *Safety Science*, vol. 70, pp. 438–464, 2014.
- [65] ASM Consortium, 'Anatomy of a Catastrophic Incident', *ASM Consortium web*, 2019. [Online]. Available: <https://www.asmconsortium.net/defined/challenges/Pages/default.aspx>.
- [66] P. Baybutt, 'Major Hazards Analysis: An Improved Method for Process Hazard Analysis', *Process Safety Progress*, vol. 22, N°1, no. March, pp. 21–26, 2003.
- [67] W. T. Fine, 'Mathematical evaluations for controlling hazards', *Naval Ordnance Laboratory*, 1971.
- [68] F. Martínez, 'Sistema de evaluación y propuesta del tratamiento de riesgos SEPTRI', *Gerencia de Riesgos Mafre*, vol. 7, no. 29, pp. 19–28, 1990.
- [69] F. S. de E. del R. de I. : M. MAFRE, 'Método Simplificado de Evaluación del Riesgo de Incendio : MESERI', *F Mafre*, vol. 64, pp. 17–29, 1998.
- [70] INSHT, 'NTP 100: Evaluación del riesgo de incendio. Método de Gustav Purt', p. 8, 1984.
- [71] National Fire Protection Association - NFPA, *NFPA 70. National Electrical Code (NEC)*. 2017.
- [72] J. P. Gupta, G. Khemani, and M. Sam Mannan, 'Calculation of Fire and Explosion Index (F & EI) value for the Dow Guide taking credit for the loss control measures', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, no. 4, pp. 235–241, 2003.
- [73] B. J. Tyler, 'Using the Mond Index To Measure Inherent Hazards.', *Plant/operations progress*, vol. 4, no. 3, pp. 172–175, 1985.
- [74] F. I. Khan and S. A. Abbasi, 'Multivariate Hazard Identification and Ranking System', *Process Safety Progress*, vol. 17, no. 3, pp. 157–170, 1998.
-

-
- [75] G. R. Mundt Art, 'Chemical exposure index', in *S2S consortium*, 2006, pp. 1–43.
- [76] A. J. Card, J. R. Ward, and P. J. Clarkson, 'Beyond FMEA: the structured what-if technique (SWIFT).', *Journal of healthcare risk management : the journal of the American Society for Healthcare Risk Management*, vol. 31, no. 4, pp. 23–29, 2012.
- [77] M. Bestratén Belloví, 'NTP 238 : Los análisis de peligros y de operabilidad en instalaciones de proceso', *Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*, p. 9, 1987.
- [78] J. Dunjón, V. Fthenakis, J. A. Vílchez, and J. Arnaldos, 'Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, no. 1–3, pp. 19–32, 2010.
- [79] M. A. de la O Herrera, A. S. Luna, A. C. A. da Costa, and E. M. B. Lemes, 'Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry', *Vigilância Sanitária em Debate*, vol. 6, no. 2, p. 106, 2018.
- [80] F. Crawley, M. Preston, and B. Tyler, 'HAZOP : Guide to Best Practice: Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries', *Elsevier*, p. 141, 2008.
- [81] P. R. Amyotte, F. I. Khan, and T. A. Kletz, 'Inherently safer design activities over the past decade', *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, no. 155, pp. 736–743, 2009.
- [82] C. M. M Bestraten, R. Orriols, 'NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos. AMFE', 2004.
- [83] M. Standard, 'MLI-STD-1629A Procedures for performing a Failure mode, effects and criticality analysis', Washington, DC 20301, 1980.
- [84] H. C. Liu, L. Liu, and N. Liu, 'Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review', *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 828–838, 2013.
- [85] A. N. Standard, *Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector – Part 1: Framework, Definitions, System, Hardware and Software Requirements*, no. September. ISA, 2004.
- [86] IEC, *IEC 61511-3:2003 Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector. Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels*, vol. 3. 2003.
- [87] W. G. Bridges, A. M. Dowell, M. Gollin, W. A. Greenfield, J. M. Poulson, and W. Turetsky, *Layer of Protection Analysis - Simplified Process Risk Assessment*, vol. 84. 2014.
- [88] D. P. Nolan, 'Specialized Reviews—CHAZOP, EHAZOP, Bow-Tie Analysis, Layers of Protection Analysis, Safety Integrity Level, Fishbone Diagram, and Cyber Security Vulnerability Analysis', in *Safety and Security Review for the Process Industries.*, Elsevier, Ed. 2015, pp. 17–27.
- [89] R. W. Johnson, 'Beyond-compliance uses of HAZOP/LOPA studies', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 6, pp. 727–733, 2010.
- [90] A. C. Torres-Echeverria, 'On the use of LOPA and risk graphs for SIL determination', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 41, pp. 333–343, 2016.
- [91] Swapan Basu, 'Quantitative Hazard Analysis', in *Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems.*, 2017, pp. 303–383.
- [92] Center for Chemical Process Safety, *Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2000.
- [93] H. Pasman and G. Reniers, 'Past, present and future of Quantitative Risk Assessment
-

- (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP)', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 28, pp. 2–9, 2014.
- [94] J. S. Arendt and D. K. Lorenzo, *Evaluating Process Safety in the Chemical Industry*. 2000.
- [95] R. Ferdous, F. Khan, R. Sadiq, P. Amyotte, and B. Veitch, 'Fault and Event Tree Analyses for Process Systems Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations', *Risk Analysis*, vol. 31, no. 1, pp. 86–107, 2011.
- [96] D. P. Nolan, 'Specialized Reviews—Bow-Tie Analysis, Layers of Protection Analysis, and Safety Integrity Levels', in *Safety and Security Review for the Process Industries.*, Elsevier Inc., Ed. 2012, pp. 17–23.
- [97] J. D. Andrews and S. J. Dunnett, 'Event-tree analysis using binary decision diagrams', *IEEE Transactions on Reliability.*, vol. 49, no. 2, pp. 230–238, 2000.
- [98] CCPS and Energy Institute, *Bow Ties in Risk Management. A Concept Book for Process Safety*. American Institute of Chemical Engineers and the Energy Institute, 2018.
- [99] A. S. Markowski and A. Kotynia, "'Bow-tie" model in layer of protection analysis', *Process Safety and Environmental Protection.*, vol. 89, no. 4, pp. 205–213, 2011.
- [100] J. R. Buys and J. L. Clark, 'Events and Causal Factors Analysis', *Technical Research and Analysis Center. Scientech Inc.*, 1995.
- [101] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. American Institute of Chemical Engineers, 1998.
- [102] Health and Safety Executive (HSE), *Reducing risks, protecting people*. 2001.
- [103] CCPS and EPSC, 'Risk Analysis Screening Tool (RAST) and Chemical Hazard Engineering Fundamentals (CHEF)'. [Online]. Available: <https://www.aiche.org/ccps/resources/tools/risk-analysis-screening-tool-rast-and-chemical-hazard-engineering-fundamentals-chef>.
- [104] American Institute of Chemical Engineers, Ed., *Risk Analysis Screening Tool (RAST). RAST User's Manual Version: V 3.0*. 2020.
- [105] International Energy Agency, 'Key World Energy Statistics 2020', 2020.
- [106] P. Capros, A. De Vita, N. Tasios, P. Siskos, and M. Kannavou, *EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050*. 2016.
- [107] Dipak K. Sarkar, *Thermal Power Plant Design and Operation*, vol. 11, no. 3. Elsevier, 2015.
- [108] M. M. El-Wakil, *Power Plant Technology*, no. 2nd. McGraw-Hill International Editions, 1985.
- [109] P. Kiameh, *Power Generation Handbook Selection, Applications, operation and maintenance*, vol. 37, no. 6. McGraw-Hill, 2008.
- [110] P. Breeze, *Power Generation Technologies*. Elsevier, 2005.
- [111] L. Thierry *et al.*, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. European Commission's Joint Research Centre, 2016.
- [112] The Backcock & Wilcox Company, *Steam its generation and use Edition 41*, J.B. Kitto. Barberton, Ohio, U.S.A, 2005.

-
- [113] BHI-FW, 'A new generation of pulverized coal technology PC Boiler'. [Online]. Available: <http://www.bhifw.com/eng/pr/catalog.html>.
- [114] Mitsubishi Heavy Industries, 'Application of Leading-Edge High-Efficiency USC Lignite-Fired Power Plant in Turow , Poland', vol. 54, no. 3, pp. 2–5, 2020.
- [115] P. Basu, *Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation and Maintenance*, Springer. Halifax, Canada, 2015.
- [116] Central Electricity Generating Board., *Modern power plant station practice - Vol 3*, Elsevier L. Oxford: Pergamon Press, 1971.
- [117] D. C. P. M. K. R. D. Cornell, 'GER-4201 Structured Steam Turbines for the Combined-Cycle Market'. GE Power Systems Schenectady, NY.
- [118] N. (Siemens A. Henkel, E. (Siemens A. Schmid, and E. (Siemens A. Gobrecht, 'Operational Flexibility Enhancements of Combined Cycle Power Plants', *POWER-GEN Asia*, no. October, 2008.
- [119] 'No Title'. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2012-10-ge-natural-gas-flexefficiency-turbine.html>.
- [120] D. E. Brandt and R. R. Wesorick, 'GE Gas Turbine Design Philosophy', *GE Power Generation*. .
- [121] Siemens, 'We power the world with innovative gas turbines', *Siemens gas turbine portfolio*, p. 60, 2017.
- [122] Victory Energy, 'Combined Cycle utility HRSG'. [Online]. Available: <https://victoryenergy.com/heat-recovery/gt-hrsg-power-utility/>.
- [123] International Energy Agency IEA, Ed., *Fossil Fuel-Fired Power Generation Case Studies of Recently Constructed Coal- and Gas-Fired Power Plants*. OECD/IEA, 2007.
- [124] F. Morales, 'Análisis y Gestión de Riesgos y Oportunidades en Grandes Proyectos Industriales', UNED, 2015.
- [125] PMBOK Guide, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Fifth edit. Project Management Institute, Inc., 2013.
- [126] L. Klee, *International Construction Contract Law*, 2018 John. John Wiley & Sons, 2018.
- [127] D. Grimsey and M. K. Lewis, 'Public private partnerships: The worldwide revolution in infrastructure provision and project finance', *Public Private Partnerships: The Worldwide Revolution in Infrastructure Provision and Project Finance*, pp. 1–268, 2004.
- [128] A. Hernández Rodríguez, 'Los contratos internacionales de construcción «llave en mano»', *Cuadernos de derecho transnacional*, vol. 6, no. 1, pp. 161–235, 2014.
- [129] J. Pícha, A. Tomek, and H. Löwitt, 'Application of EPC Contracts in International Power Projects', *Procedia Engineering*, vol. 123, pp. 397–404, 2015.
- [130] Frederick S Merritt and J. T. Ricketts, *Building design and construction handbook*, Sixth Edit. McGraw-Hill, 2001.
- [131] R. K. A. Chandrana, 'Hazard Identification and Risk Assessment in Thermal Power Plant', *Journal of Information and Computational Science*, vol. 10, no. 4, 2020.
- [132] W. Safira Rahmania, H. Elvian Gayuh Prasetya, and F. Hesty Sholihah, 'Maintenance analysis of boiler feed pump turbine using failure mode effect analysis (fmea) methods', *IES 2020 - International Electronics Symposium: The Role of Autonomous and Intelligent*
-

Systems for Human Life and Comfort, pp. 54–59, 2020.

- [133] J. Buchta, A. Oziemski, and M. Oziemski, ‘Analysis of technical condition of lignite-fired power units as the way of reducing the operational risks’, *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019*, 2019.
- [134] A. H. A. Melani, C. A. Murad, A. Caminada Netto, G. F. M. de Souza, and S. I. Nabeta, ‘Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant’, *Energy*, vol. 147, pp. 767–781, 2018.
- [135] G. P. Putra and H. H. Purba, ‘Failure mode and effect analysis on power plant boiler’, *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [136] I. H. F. Ferreira, ‘Industrial Risk Management of a Combined Cycle Power Plant’. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Lisboa, Portugal, pp. 1–10.
- [137] Y. Gu, Z. Gao, X. Wang, K. Yang, and K. Chen, ‘Research on the construction of fault knowledge base for power plant equipments’, *World Automation Congress Proceedings*, 2012.
- [138] N. P. Alin Constantin MURARIU, Horia Ștefan MATEIU, Vencislav GRABULOV, ‘Risk assessment of thermal power plant’, *Revista Energetica*, vol. 57, no. December, pp. 627–630, 2009.
- [139] I. P. De Siqueira and B. A. De Souza, ‘Risk assessment of major accidents in large electric power plants’, *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*, 2010.
- [140] A. Zafra-Cabeza, M. A. Ridao, I. Alvarado, and E. F. Camacho, ‘Applying risk management to combined heat and power plants’, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 938–945, 2008.
- [141] R. Kumar, ‘Coal-fired power plant risk evaluation strategy’, *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012*, pp. 84–89, 2012.
- [142] S. Indrawati, K. N. Karunia Ningtyas, A. B. Khoirani, and R. C. Shinta, ‘Risk analysis of warehouse operation in a power plant through a Modified FMEA’, *MATEC Web of Conferences*, vol. 154, 2018.
- [143] I. Q. Al Saffar and A. W. Ezzat, ‘Qualitative risk assessment of combined cycle power plant using hazards identification technique’, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 43, no. 2, pp. 284–293, 2020.
- [144] M. Alrifayy, T. S. Hong, E. E. Supeni, A. As’arry, and C. K. Ang, ‘Identification and prioritization of risk factors in an electrical generator based on the hybrid FMEA framework’, *Energies*, vol. 12, no. 4, 2019.
- [145] A. Musyafa and H. Adiyagsa, ‘Hazard and Operability study in Boiler System of The Steam Power Plant’, *International Journal of Science and Technology (IJSTE)*, vol. 1, no. 3, pp. 1–10, 2012.
- [146] R. Rathod, G. D. Gidwani, and P. Solanky, ‘Hazard analysis and risk assesment in Thermal Power Plant’, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 177, no. 7, pp. 177–185, 2017.
- [147] W. Qi-quan, ‘Risk Analysis and Control Measure of Gas Power Generation Enterprise’, *International Journal of Science and Qualitative Analysis*, vol. 3, no. 2, p. 15, 2017.

-
- [148] A. C. Ahmad, I. N. M. Zin, M. K. Othman, and N. H. Muhamad, 'Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control (HIRARC) Accidents at Power Plant', *MATEC Web of Conferences*, vol. 66, pp. 1–6, 2016.
- [149] Y. Li, B. Sankaranarayanan, D. Thresh Kumar, and A. Diabat, 'Risks assessment in thermal power plants using ISM methodology', *Annals of Operations Research*, vol. 279, no. 1–2, pp. 89–113, 2019.
- [150] D. X. Gu, C. Y. Liang, I. Bichindaritz, C. R. Zuo, and J. Wang, 'A case-based knowledge system for safety evaluation decision making of thermal power plants', *Knowledge-Based Systems*, vol. 26, pp. 185–195, 2012.
- [151] Z. X. Yang, L. Song, C. Y. Zhang, C. Li, and X. B. Yuan, 'Mathematical safety assessment approaches for thermal power plants', *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, 2014.
- [152] Y. Wang, J. Yuan, and D. Zhang, 'Failure mode risk analyzing based on grey theory for power plant steam turbine proper', *IE and EM 2009 - Proceedings 2009 IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1234–1238, 2009.
- [153] L. Duan, D. Niu, H. Lv, and B. Kou, 'Risk assessment of thermal power plant project based on fuzzy analytic hierarchy process in the early operation', *2nd International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2009*, vol. 1, pp. 473–477, 2009.
- [154] X. Boyen and L. Wehenkel, 'Automatic induction of fuzzy decision trees and its application to power system security assessment', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 3–19, 1999.
- [155] M. Agarwal, 'Risk prioritization in a gas power plant using Fuzzy inference system', *IEEE*, vol. 6, pp. 753–757, 2018.
- [156] S. Ebrahimnejad, S. M. Mousavi, and S. M. H. Mojtahedi, 'A fuzzy BOT project risk evaluation model in iranian power plant industry', *2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2008*, pp. 1038–1042, 2008.
- [157] Y. J. Gu, K. L. Chen, and K. Yang, 'Fuzzy comprehensive evaluation method based on analytic hierarchy process for falt risk analysis of power plant equipment', *Proceedings - 5th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2008*, vol. 3, pp. 443–448, 2008.
- [158] D. Niu, Y. Wang, and M. Xiaoyong, 'Power plant construction project safety management evaluation with fuzzy neural network model', *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS*, vol. 21, no. 70671039, pp. 489–492, 2008.
- [159] D. Cinar and G. Kayakutlu, 'Scenario analysis using Bayesian networks: A case study in energy sector', *Knowledge-Based Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 267–276, 2010.
- [160] H. Kim and C. Singh, 'Power system probabilistic security assessment using Bayes classifier', *Electric Power Systems Research*, vol. 74, no. 1, pp. 157–165, 2005.
- [161] A. K. Sinha, 'Power system security assessment using pattern recognition and fuzzy estimation', *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 11–19, 1995.
- [162] C. Y. Zhang, P. Zhang, Z. X. Yang, and L. Song, 'Safety assessment modeling for thermal power plants using hierarchical SDG-HAZOP method', *Proceedings - 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, ICIS 2009*, vol.
-

- 3, no. 70671035, pp. 144–148, 2009.
- [163] ‘Loss Prevention in Thermal Power Plants’, *Fire Loss Prevention Forum of India*, 2018. [Online]. Available: http://www.flpfi.com/file-uploads/FLPFI_WHITEPAPER_NOV18_LR.pdf.
- [164] Combined Cycle Journal, ‘COMBINED CYCLE USERS GROUP: Users reveal their “softer” sides’, *The 2016 Combined Cycle Users Group (CCUG) conference (San Antonio, August 22-25)*, 2016. [Online]. Available: <https://www.ccj-online.com/combined-cycle-journal-number-50/combined-cycle-users-group-users-reveal-their-softer-sides/>.
- [165] T. HANSEN, ‘Power Plant Safety’, *Power Engineering*, pp. 20–30, 2005.
- [166] F. Durso, ‘The Making of a Standard’, *NFPA Journal*, 2011. [Online]. Available: <http://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2011/November-December-2011/Features/The-Making-of-a-Standard>.
- [167] Lauren Wilson Don Holmstrom and Dan Tillema, ‘CSB Public Meeting February 7, 2010, Natural Gas Explosion Kleen Energy Middletown, Connecticut’, 2010. [Online]. Available: https://www.csb.gov/assets/1/20/kleen_energy_public_meeting_presentation_6_28_10.pdf?13951.
- [168] D. Proctor, ‘Death Toll Rises to 43 in Wake of India Coal Plant Blast’, *Power*, 2017. [Online]. Available: <https://www.powermag.com/death-toll-rises-to-43-in-wake-of-india-coal-plant-blast/>.
- [169] V. Rathore, ‘Tragic accident: 5 people lost their lives at thermal power plant’, *NewsTrack*, 2020. [Online]. Available: <https://english.newstracklive.com/news/tamil-nadu-scuddalore-fourdead-13-injured-in-boiler-explosion-at-a-thermal-power-plant-mc23-nu870-ta294-1103528-1.html>.
- [170] American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*. John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [171] CAM, ‘Instrucciones Técnicas para el Análisis de Riesgos para la Salud Humana en el Ámbito del Real Decreto 9/2005 de 14 de Enero en la Comunidad de Madrid’, p. 103, 2011.
- [172] D. A. Moore, M. Hazzan, M. Rose, D. Heller, D. C. Hendershot, and A. M. Dowell, *Inherently safer chemical processes. A life cycle approach*, 2nd editio. CCPS (Center for Chemical Process Safety), 2010.
- [173] T. Kletz and P. Amyotte, *Process plants: A handbook for inherently safer design: Second edition*. 2010.
- [174] H. Diao and M. Ghorbani, ‘Production risk caused by human factors: a multiple case study of thermal power plants’, *Frontiers of Business Research in China*, vol. 12, no. 1, 2018.
- [175] James Brown & Michael Martin, ‘Comprehensive review of potential hazards and operational safety designed into power plants is becoming more common’, *Power Engineering*, pp. 156–162, 2008.
- [176] M. Clay, ‘Hazard identification – can power engineers learn from the process industries?’, *Loss Prevention Bulletin*, no. 253, pp. 23–26, 2017.
- [177] IEC, ‘Hazard and operability Studies (HAZOP studies) - Application Guide’, *IEC 61882*, 2016.
- [178] S. Lewis, ‘An Overview of Leading Software Tools for QRA.’, *In: American Society of Safety Engineers–Middle East Chapter (161), 7th Professional Development, Conference*

- & Exhibition, March 18-22, 2005 Kingdom of Bahrain, no. 7th Professional Development Conference & Exhibition, pp. 1–5, 2005.
- [179] P. U. de Haag and B. Ale, ‘Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book)’, *Committee for the Prevention of Disasters, The Hague*, no. Pgs 3, pp. 4–237, 2005.
- [180] National Institute of Public Health and the Environment, ‘Reference Manual Bevi Risk Assessments’, *RIVM, Centre for External Safety*. p. 189, 2009.
- [181] K. Tillander and O. Keski-Rahkonen, ‘The ignition frequency of structural fires in Finland 1996-99’, in *Fire Safety Science*, 2003.
- [182] F. Wang, S. Lu, and C. Li, ‘Analysis of fire statistics of China: Fire frequency and fatalities in fires’, in *Fire Safety Science*, 2005.
- [183] NUREG-2169 and EPRI-3002002936, ‘Nuclear Power Plant Fire Ignition Frequency and Non-Suppression Probability Estimation Using the Updated Fire Events Database: United States Fire Event Experience Through 2009’, no. January 2015, 2015.
- [184] Nuclear Energy Agency, ‘Collection and Analysis of Fire Events (2010-2013) – Extensions in the Database and Applications’, *Nea/Csni/R(2015)14*, no. December, p. 110, 2015.
- [185] I. Power and E. Society, *IEEE Guide for Substation Fire Protection Sponsored by the Substations Committee IEEE Power and Energy Society*, vol. 2012, no. November. 2012.
- [186] Flemish Government, ‘Handbook Failure Frequencies for drawing up a Safety Report, 2009’, 2009.
- [187] WS Atkins Consultants, ‘Assessment of benefits of fire compartmentation Assessment of benefits of fire compartmentation’, *Health and Safety Executive 2003*, 2003.
- [188] *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*. 1989.
- [189] HSE health and safety executive, ‘Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments (28/06/2012)’, *Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments (28/06/2012)*, pp. 1–102, 2012.
- [190] API, *Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Permanent Buildings API RECOMMENDED PRACTICE 752*, 3rd Editio. American Petroleum Institute, 2009.
- [191] IEC60079-10-1, *IEC 60079-10-1 Explosive atmospheres Part 10-1: Classification of areas* —. 2015.
- [192] R. Tommasini, E. Pons, and F. Palamara, ‘Area classification for explosive atmospheres: Comparison between European and North American approaches’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014.
- [193] M. Daneshvar, A. Soltanzadeh, and H. Mohammadi, ‘Analysis of Construction Safety Risk in House Power of a Power Plant Based on Bow-Tie Technique’, *Scientific research journal of Health System Research*, vol. 15, no. 2, pp. 87–93, 2019.
- [194] G. Carter and S. D. Smith, ‘Safety Hazard Identification on Construction Projects’, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 132, no. 2, pp. 197–205, 2006.
- [195] INSHT, ‘Evaluación de Riesgos Laborales INSHT’, *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, pp. 1–13, 2000.
- [196] INSHT, ‘NTP 576 : Integración de sistemas de gestión : prevención de riesgos laborales , calidad y medio ambiente’, *Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*, p. 8,

- 2004.
- [197] M. Bestralén, ‘NTP 386: Observaciones planeadas del trabajo’, *Notas Técnicas de Prevención*, p. 8, 1997.
- [198] INSHT, ‘NTP 330 : Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente’, *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, p. 7, 1993.
- [199] PMBOK Guide, *Construction Extension to the PMBOK® Guide*. Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc, 2016.
- [200] C. D. Reese and J. V. Eidson, *Handbook of OSHA Construction Safety and Health*, Second edi. Taylor & Francis Group, 2006.
- [201] D. Crowther, ‘Total project management of construction safety, health and environment 2nd edition’, *International Journal of Project Management*, 1996.
- [202] Alistair Gibb, Guido Simons, John Taylor, Mike Draper, Roy Greenslade, *Safety , Health & Environment (SHE) Management Guide (2nd Edition)*. Great Britain, 2013.
- [203] Combined Cycle Task Group, *Consensus on Pre-Commissioning Stages for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants*. The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2017.
- [204] M. Killcross, *Chemical and Process Plant Commissioning Handbook: A Practical Guide to Plant System and Equipment Installation and Commissioning*, First edit. Elsevier, 2012.
- [205] I. Sutton, *Engineering Minute 1 Prestartup Safety Reviews (PSSR)*, 1st Editio., no. February. Sutton Technical Books, 2007.
- [206] Dekra, ‘Pre-Startup Safety Review (PSSR) Checklist partial example’, *Pre-Startup Safety Review (PSSR)*. [Online]. Available: <https://media.dekra.com/media/dekra-pre-startup-safety-review-pssr-checklist-102-150420.pdf>.
- [207] S. Mozzani, ‘Last-Minute Risk Assessment’, *ProfessionalSafety*, no. February, 2017.
- [208] HSE Department Business Units Generation and Technology., ‘RWE Rules and code of conduct Last Minute Risk Analysis’, *RWE web*, 2018. [Online]. Available: www.rwe.com/web/cms/nl/3085022/rwe-generation-se/contractor/.
- [209] K. Rayner Brown, M. Hastie, F. I. Khan, and P. R. Amyotte, ‘Inherently safer design protocol for process hazard analysis’, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 149, pp. 199–211, 2021.
- [210] Dipak K. Sarkar, *Thermal Power Plant Pre-Operational Activities*, Elsevier S. Joe Hayton, 2017.
- [211] K. J. Shields, ‘Chemical Cleaning of Fossil Power Station Steam Generators; Past, Present and Future’, *14th International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto* , pp. 475–483, 2004.
- [212] VGB PowerTech, *VGB-R 513 e Internal Cleaning of Water-Tube Steam Generating Plants and Associated Pipework*. 2006.
- [213] Suez Water Technologies & Solutions, ‘Handbook of Industrial Water Treatment.- 15 Chemical Cleaning Of Steam Generator Systems’, *SUEZ*, 2021. [Online]. Available: <https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/chapter-15-chemical-cleaning-steam-generator-systems>.
- [214] Y. Noguchi, N.Tagami, K.Egawa, K.Ohkubo, Y.Yamabe, Y.Yokoyama, ‘Development of

- Chemical-Cleaning Technology Effective at Neutral pH and Ambient Temperature Condition enable Safety Improvement and Period Reduction of Maintenance of Power Generation Equipment', *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 55, no. 2, pp. 1–7, 2018.
- [215] V. (US) Robert D. Varrin, JR., Reston, VA (US); Michael J. Little, Ashburn, 'Chemical Cleaning method and system with steam injection', Patent Application Publication US 2011 /0303247 A1, 2011.
- [216] Prem Baboo, 'Boilers and Steam Lines Chemical Cleaning', *International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, no. 03, 2020.
- [217] Solarca, 'Limpieza química preoperacional / Mantenimiento'. [Online]. Available: <https://www.gruposolarca.com/servicios/limpieza-quimica-preoperacional-mantenimiento/>.
- [218] Pradip Chanda, Suparna Mukhopaddhyay, *Operation and Maintenance of Thermal Power Stations Best Practices and Health Monitoring*. Springer India, 2016.
- [219] GE Energy, 'GEK 110483b Cleanliness Requirements for Power Plant Installation , Commissioning , and Maintenance', © 2002 General Electric Company, 2004.
- [220] Adeptengineering, 'Rotomole cleaning'. [Online]. Available: <https://www.adeptengineering.in/rotomole-cleaning/>.
- [221] GE Power Systems, 'GEI 69688F.- Cleaning of Main Steam Piping and Provisions for Hydrostatic Testing of Reheater'. © 1989 General Electric Company, 2003.
- [222] S. Lingappa and M.C.Navindgi, 'Steam Blowing of Supercritical Thermal Power Plant 2x800 MW at YTPS Raichur', *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology.*, vol. 3, no. 10, pp. 78–88, 2016.
- [223] M. Herberg and Therm Service Gmbh, 'Operational cleaning and steam blow of large Thermal Power Plant boilers (Kostolac B2 experience)', 2014.
- [224] VEcom Group Technical Bulletin, 'Steam Blowing Procedures'. [Online]. Available: www.vecom-group.com.
- [225] A. Kumar, 'Steam Blowing / Steam Blowing Procedure'. [Online]. Available: <https://whatispiping.com/steam-blowing-part-1/>.
- [226] GE Power Systems, 'GER-3636A - Experience with Compresses Air Cleaning of Main Steam Piping'.
- [227] Rexroth Bosch Group, 'Hydraulic Oil Supply for Gas and Steam Turbines Technical Information', 2014. [Online]. Available: https://dc-ru.resource.bosch.com/media/ru/documents_181/brochures/re_08126_2014_03_web.pdf.
- [228] B. R. Sabador, 'NTP 446 : Components failure, valves.', *Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*, 1995.
- [229] M. Helander, *A Guide to Human Factors and Ergonomics*. Taylor & Francis Group, 2006.
- [230] G. Salvendy, *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [231] François Daniellou, 'Los factores humanos y organizativos en los proyectos de concepción de sistemas de riesgo', *FONCSI, Fundación para la Cultura de Seguridad Industrial*, 2015.
- [232] Report No: 454, 'Human factors engineering in projects', 2011.
- [233] James Reason, 'Human Error'. Cambridge University Press, 1990.

-
- [234] T. Kletz, *An engineer's view of human error*, Third edit. Institution of Chemical Engineers (IChemE), 2001.
- [235] D. Crowl *et al.*, *Human Factors Methods for improving performance in the process industries*. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [236] I. Sutton, *Plant Design and Operations*, Elsevier I. Gulf Professional, 2015.
- [237] Center for Chemical Process Safety (CPS), *Guidelines for preventing human error in process safety*. American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- [238] G. R. Ellis and A. Holt, 'A practical application of "Human-HAZOP" for critical procedures', *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, no. 155, pp. 434–439, 2009.
- [239] 'CORE TOPICS Core topic 3: Identifying human failures', *HSE*. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/core3.pdf>.
- [240] E. Cagno, F. Caron, and M. Mancini, 'Risk analysis in plant commissioning: The Multilevel Hazop', *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 77, no. 3, pp. 309–323, 2002.
- [241] J. C. Williams, 'Heart - a Proposed Method for Assessing and Reducing Human Error.', *Proceedings - Advances in Reliability Technology Symposium*, 1986.
- [242] System Reliability Center, 'Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)', pp. 1–3, 2005.
- [243] OREDA, 'Offshore Reliability Data Handbook', *OREDA, Norway*. 2002.

Anexos

Índice del Volumen II

Anexo 1.- Casos de Estudio y ejemplos	I-1
Caso 1. HAZID conceptual	I-2
Caso 2. HAZID detallado .	I-38
Caso 3. HAZID Detallado para un ciclo combinado	I-65
Caso 4. HAZOP para un ciclo combinado	I-77
Caso 5. HAZOP/SIL para un ciclo combinado.	I-90
Caso 6. E-HAZOP para un ciclo combinado	I-115
Análisis Histórico de Accidentes	I-136
Ejemplos RAMS Central Térmica	I-141
Anexo 2.- Formatos propuestos	II-1
Listas de Verificación	II-2
Evaluación de riesgos por palabras guía (parte 1)	II-5
Evaluación detallada de riesgos (parte 2)	II-6
Anexo 3.- Documentación de referencia capítulo 7	III-1
Caso 1.- Sistema de limpieza química	III-2
Caso 2.- Sistema de soplado con vapor	III-16
Caso 3.- Sistema de limpieza de aceite de lubricación	III-41
Anexo 4.- Resultados	IV-1
Caso 1.- Sistema de limpieza química	IV-2
Caso 2.- Sistema de soplado con vapor	IV-16
Caso 3.- Sistema de limpieza de aceite de lubricación	IV-31