



TESIS DOCTORAL

2015

**SISTEMA Y MÉTODO DE CONTROL AVANZADO
PARA LA MEZCLA DE MATERIALES**

Francisco Javier Riesco Ruiz
Ingeniero Industrial

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control

Director
Juan Manuel Martín Sánchez

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

SISTEMA Y MÉTODO DE CONTROL AVANZADO
PARA LA MEZCLA DE MATERIALES

Francisco Javier Riesco Ruiz
Ingeniero Industrial

Director
Juan Manuel Martín Sánchez

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, en mayor o menor medida, me han animado y apoyado en el desarrollo de este doctorado. De entre esas personas, se merece unas palabras especiales mi director de Tesis, y amigo, Juan Manuel Martín Sánchez, por lo continuos ánimos, esfuerzos y orientaciones bien dadas para llegar a la meta, y como no, por su enorme valía técnica.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, y muy especialmente también a ADEX S.L. y las personas que lo forman por el interés y capacidad de todos ellos. Especialmente a José Javier, Antonio Gómez, Antonio Nevado y Juan Francisco.

Por otra parte, no habría llegado a escribir estas líneas sin el constante apoyo inquebrantable de mi esposa, Gema, de mis queridísimos padres y hermano, sin los ratos agradables con Ricardo, Quique, Iñaki y tantas otras valiosísimas amistades, y, aunque él no lo sabe, o quizás sí, gracias al constante aliento desde hace nueve meses de Pablo.

Índice General

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1 Introducción a los procesos de mezcla de materiales	14
1.1.1 La importancia de los procesos de mezcla en la industria	15
1.1.2 El proceso de mezcla en la producción de cemento.....	17
1.1.3 Obtención de la mezcla de materias primas	18
1.1.4 Procesos posteriores a la mezcla	20
1.1.5 Importancia de un control optimizado de la mezcla	22
1.2 Materiales, óxidos y módulos de calidad	23
1.3 Análisis de la composición de la mezcla	26
1.3.1 Técnicas de laboratorio	26
1.3.2 Analizadores en línea	28
1.3.2.1 Tecnología de Fluorescencia de rayos-X.....	28
1.3.2.2 Tecnología PGNAA	29
1.3.2.3 Comparación de características.....	31
1.4 Dinámica del proceso de mezcla y planteamiento del problema.....	33
1.4.1 Caso ideal	33
1.4.2 Variación de la composición química de los alimentadores	35
1.4.3 Retardos	37
1.4.4 Ruidos de medida.....	39
1.4.5 Ruidos de proceso	40
1.4.6 Número ilimitado de alimentadores	42
1.4.7 Deficiencias de composición y uso de alimentadores correctivos	43
1.4.8 Alimentadores no controlables y atascos en los alimentadores	44
1.4.9 Planteamiento del problema real del control de la mezcla de materiales	45
1.5 Estado de la técnica.....	46
1.5.1 Sistemas de control convencional	46
1.5.1.1 Soluciones basadas en la realimentación negativa.....	46

1.5.1.2 Matriz de ganancias relativas de Bristol y Técnica de maximización de la ganancia integral.....	47
1.5.1.3 Soluciones que incluyen Lógica Borrosa	49
1.5.2 Sistemas de alta frecuencia basados en la identificación de las fuentes	52
1.5.2.1 Estimación adaptativa de la composición de los alimentadores	52
1.5.2.2 Descomposición en valores simples	55
1.5.2.3 Módulos de calidad en rangos y prioridades.....	57
1.5.3 Análisis crítico	58
1.6 Motivación y objetivos de la Tesis	61
1.7 Estructura.....	64

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE CONTROL OPTIMIZADO

ADAPTATIVO	65
2.1 Introducción	66
2.2 Control predictivo y necesidad de adaptación	66
2.3 Formulación básica del control adaptativo predictivo	69
2.4 Estrategia extendida de control predictivo.....	72
2.5 Control optimizado adaptativo	73
2.6 Sistema y estrategia de control optimizado de procesos.....	74
2.7 Sistema de control optimizado adaptativo	75
2.8 Control adaptativo predictivo experto (ADEX).....	76
2.8.1 Implementación de controladores ADEX en el caso multivariable.....	78
2.8.2 Descripción de los Operadores ADEX	79
2.9 Sistemas ADEX de control optimizado adaptativo	82

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA

DE CONTROL OPTIMIZADO ADAPTATIVO.....	85
---------------------------------------	----

3.1	Introducción	86
3.2	Descripción conceptual de la solución metodológica.....	87
3.2.1	Número ilimitado de alimentadores y necesidad de formalización	93
3.3	Estrategia de Control.....	94
3.3.1	Fuente de Compuesto y Fuente de Módulo de Calidad.....	94
3.3.2	Deficiencias de composición y uso de alimentadores correctivos	96
3.4	Interacción entre proceso de mezcla y sistema de control.....	97
3.4.1	Retardos	99
3.5	Operación del sistema de control de la mezcla de materiales.....	99
3.5.1	Adquisición de la composición	99
3.5.2	Cálculo de los módulos de calidad.....	100
3.5.3	Cálculo de las señales de control avanzado	100
3.5.4	Verificación de las condiciones de diagnóstico de deficiencias de composición	102
3.5.5	Cálculo del caudal de las fuentes de compuesto	104
3.5.5.1	<i>Fuente conductora</i>	105
3.5.6	Distribución del caudal entre los alimentadores	105
3.5.6.1	<i>Caudal de los alimentadores correctivos</i>	106
3.5.7	Envío de las consignas de caudal a los controladores de caudal.....	108
3.6	Aplicación del sistema en la industria del cemento	109
3.6.1	Fuentes de compuestos y fuentes de módulos de calidad	110
3.6.2	Secuencia de operaciones.....	112
3.6.2.1	<i>Cálculo de las consignas de caudal</i>	115
3.6.3	Control de 2 módulos	120
3.6.4	Atascos en las fuentes	122
3.6.5	Caso de Fuente Conductora	124
3.6.5.1	<i>Fuente de CaO</i>	124
3.6.5.2	<i>Fuente de SiO₂</i>	126
3.6.5.3	<i>Fuente de Al₂O₃</i>	127

3.6.5.4 Fuente de Fe_2O_3	128
3.6.6 Diagnósis de deficiencias de composici3n	129
3.6.6.1 Aplicaci3n de alimentadores correctivos	132
3.6.7 Control de C_3S , SM y C_3A	134
CAPÍTULO 4: INTEGRACI3N, IMPLEMENTACI3N Y	
CONFIGURACI3N DEL <i>MIX ADEX CONTROLLER</i> ..	
137	
4.1 Introducci3n	138
4.2 Integraci3n del MAC en una planta industrial	139
4.3 Diseño del software de control del MAC.....	140
4.3.1 Jerarquía de objetos de la interfaz.....	142
4.3.1.1 Objeto Control.....	142
4.3.1.2 Colecci3n Modules y objeto Module	144
4.3.1.3 Colecci3n Sources y objeto Source.....	146
4.3.1.4 Colecci3n Composition y objeto Oxide	149
4.3.1.5 Colecci3n Coefficients y objeto Coefficient.....	149
4.4 Diseño del configurador.....	150
4.4.1 Configuraci3n y monitorizaci3n	151
4.4.1.1 Bloque Element Sources.....	154
4.4.1.1.1 Parámetros de control	155
4.4.1.1.2 Parámetros de diagnósis	156
4.4.1.1.3 Parámetros de límite.....	156
4.4.1.2 Bloque de Controladores ADEX de los Módulos de Calidad.....	157
4.4.1.3 Parámetros del MAC.....	162
4.4.2 Escenarios de control de la mezcla	163
4.4.3 Descripci3n de la operaci3n	164
4.4.4 Diagnósis y uso de alimentadores correctivos	166
4.5 Controladores ADEX de los módulos de calidad	169
4.5.1 Creaci3n y ejecuci3n.....	172

4.5.2 Configuración.....	173
CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL <i>MIX PROCESS SIMULATOR</i>	181
5.1 Diseño del MPS.....	182
5.1.1 Bloque de simulación del proceso.....	183
5.1.1.1 Configuración de un alimentador.....	185
5.1.1.2 Parámetros comunes de la simulación.....	187
5.1.1.3 Cambios predefinidos en las composiciones y valores actuales	189
5.1.1.4 Alimentador correctivo.....	191
5.1.1.5 Múltiples fuentes y múltiples alimentadores por fuente	193
5.1.2 Bloques de caudal de mezcla, analizador y módulos de calidad.....	194
5.2 Escenarios de procesos de mezcla	195
5.3 Descripción de la operación	195
5.3.1 Arranque, parada y finalización	195
5.3.2 Condición de fallo	197
5.3.3 Fuente Incontrolable – Fuente Conductora	198
5.4 Monitorización y resultados del proceso de mezcla	200
5.4.1 Monitorización gráfica y curvas de evolución	201
5.4.2 Análisis gráfico	203
5.4.3 Índices de rendimiento	204
CAPÍTULO 6: RESULTADOS EN SIMULACIÓN	215
6.1 Introducción	216
6.2 Ejemplo 1: Cambios de consigna y variación de la composición.....	216
6.2.1 Definición del proceso simulado.....	216
6.2.2 Cambios de consigna y variación de las composiciones.....	219
6.2.3 Descripción y análisis de los resultados.....	221
6.2.4 Análisis estadístico y conclusiones	224
6.3 Ejemplo 2: Deficiencias de composición y	

alimentadores correctivos.....	225
6.3.1 Definición del proceso simulado	225
6.3.2 Deficiencias de composición	226
6.3.3 Uso de alimentadores correctivos	229
6.3.4 Influencia de los ruidos de medida y de proceso	234
6.3.5 Influencia de los retardos	234
6.4 Ejemplo 3: Fuente conductora y atascos	236
6.4.1 Fuente conductora.....	236
6.4.2 Atascos en las fuentes	239
6.4.2.1 Atasco en la fuente de CaO	239
6.4.2.2 Atasco en la fuente de SiO_2	241
6.4.2.3 Atasco en la fuente de Al_2O_3	242
6.4.2.4 Atasco en la fuente de Fe_2O_3	243
6.5 Ejemplo 4: un desafío industrial	244
6.5.1 Descripción de la simulación	245
6.5.2 Datos de las composiciones de las fuentes	246
6.5.3 Escenario 1: Evolución secuencial de la composición de las fuentes	248
6.5.4 Escenario 2: Evolución aleatoria de la composición de las fuentes	249
6.5.5 Resultados obtenidos.....	250
6.5.5.1 Escenario 1.....	250
6.5.5.2 Escenario 2.....	251
6.5.6 Análisis de los resultados	265
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	269
BIBLIOGRAFÍA.....	273
ANEXOS.....	281

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales procesos en la fabricación de cemento.....	24
Figura 2. Ubicación de la toma de muestras en una fábrica de cemento.....	33
Figura 3. Esquema de la reacción nuclear de captura electrónica	36
Figura 4. Componentes de un Analizador PGNAA	37
Figura 5. Módulo de análisis de la composición.....	37
Figura 6. Proceso de mezcla típico en la industria del cemento	40
Figura 7. Variaciones aleatorias y discontinuas en la composición de los alimentadores	43
Figura 8. Valor medido y valor real de la composición de la mezcla	46
Figura 9. Consignas de caudal de caliza y caudal realmente aplicado.....	48
Figura 10. Proceso de mezcla con múltiples alimentadores y alimentadores correctivos.	48
Figura 11. Control PI de la mezcla	52
Figura 12. Máxima sensibilidad, margen de fase y frecuencias de corte	52
Figura 13. K_p y K_i como función de K_d , M_s para los controladores de LSF y SM	52
Figura 14. Controlador PI con parámetros fijados por lógica difusa para LSF, SM e IM.	54
Figura 15. Funciones de pertenencia del controlador de lógica difusa	52
Figura 16. K_p y K_i proporcionadas por el controlador de lógica difusa	52
Figura 17. Diagrama de bloques de RAMOS	58
Figura 18. Estructura de lazo interior y exterior de QCX/BlendExpert.	59
Figura 19. Esquema de prioridades para los módulos de calidad	62
Figura 20. Operación de un sistema de control que requiere el conocimiento preciso de las composiciones de los alimentadores.....	64
Figura 21. Configuración general de los controladores predictivos.....	71
Figura 22. Configuración general de los controladores adaptativos-predictivos.	73
Figura 23. Configuración general de los controladores adaptativos-predictivos.	77
Figura 24. Configuración general de los controladores ADEX.	83
Figura 25. Operadores ADEX.....	86
Figura 26. Ejemplo conceptual de mezcla de caudales de agua.....	96
Figura 27. Emisión de diagnóstico en la mezcla de caudales de agua	96
Figura 28. Ejemplo conceptual de mezcla de materiales en la industria del cemento	96
Figura 29. Esquema de control para el ejemplo de la mezcla de materiales en la industria del cemento 96	
Figura 30. Diagnóstico para el ejemplo de la mezcla de materiales en la industria del cemento.....	96
Figura 31. Interacción entre proceso de mezcla y sistema de control.	96
Figura 32. Operación del sistema de control de la mezcla de materiales.....	99
Figura 33. Ejemplo de proceso de mezcla en la industria del cemento.....	99
Figura 34. Cálculo de las consignas de caudal de las fuentes	114
Figura 35. Aplicación del sistema en la industria el cemento	114
Figura 36. Control de LSF y SM	123
Figura 37. Control de LSF e IM.....	123
Figura 38. Control de SM e IM.....	123
Figura 39. Control de C_3S , SM y C_3A	123
Figura 40. Integración del MAC en una planta industrial real	123

Figura 41. Jerarquía de objetos de la interfaz del MAC	126
Figura 42. Interfaz gráfica del MAC	139
Figura 43. Login a MAC	140
Figura 44. Declaración de una fuente de compuesto	141
Figura 45. Configuración de la fuente de CaO	142
Figura 46. Fuentes de compuestos y alimentador correctivo de Aluminio.....	145
Figura 47. Módulos de calidad bajo control	146
Figura 48. Configuración del LSF.....	148
Figura 49. Configuración del C ₃ S.....	148
Figura 50. Configuración del SM	149
Figura 51. Configuración del IM.....	149
Figura 52. Configuración del C ₃ A	150
Figura 53. Escenario de control de mezcla	152
Figura 54. Modo manual de operación	153
Figura 55. Modo automático de operación	154
Figura 56. Deficiencia de composición en la fuente de Al ₂ O ₃	157
Figura 57. Uso de un alimentador correctivo de Al ₂ O ₃	158
Figura 58. Estructura software de ADEXCOP v.1	158
Figura 59. Creación, configuración y ejecución de los controladores ADEX	158
Figura 60. Controladores ADEX de los módulos de calidad en ADEXCOP v.1	158
Figura 61. Controlador ADEX del LSF – Dominio AP-C.....	158
Figura 62. Controlador ADEX del LSF – Dominio EX-U	158
Figura 63. Controlador ADEX del LSF – Dominio EX-L	158
Figura 64. Controlador ADEX del SM – Dominio AP-C.....	158
Figura 65. Controlador ADEX del IM – Dominio AP-C	158
Figura 66. Controlador ADEX del C ₃ S – Dominio AP-C	158
Figura 67. Controlador ADEX del C ₃ A – Dominio AP-C.....	158
Figura 68. Comunicación MPS – MAC	160
Figura 69. Interfaz inicial del MPS	161
Figura 70. Selección y configuración de los alimentadores de CaO	163
Figura 71. Límites de caudal de los alimentadores.....	165
Figura 72. Evolución aleatoria de los óxidos en los alimentadores	165
Figura 73. Configuración de cambios predefinidos en las composiciones	167
Figura 74. Valores actuales de la composición de la fuente	169
Figura 75. Selección de las fuentes de CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y Fe ₂ O ₃	169
Figura 76. Múltiples alimentadores por fuente y alimentador correctivo.....	169
Figura 77. Almacenamiento-Recuperación de escenarios de procesos de mezcla	173
Figura 78. Simulación de un proceso de mezcla en ejecución	174
Figura 79. Configuración de la simulación de un atasco en la fuente de CaO	176
Figura 80. Simulación del funcionamiento de la fuente de CaO como fuente conductora.....	178
Figura 81. Utilización de las capacidades gráficas y estadísticas de Matlab	179
Figura 82. Curvas de evolución del experimento en simulación	179
Figura 83. Curvas de evolución completas al final de la simulación.....	179
Figura 84. Módulos de calidad y setpoints	179
Figura 85. Evolución de la composición química de la mezcla.....	179
Figura 86. Consignas de caudal generadas por el MAC.....	179
Figura 87. Señales de control: porcentaje de la fuente de compuesto en la fuente del módulo	179

Figura 88. Cambios de composición frente a consignas de caudal	179
Figura 89. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de CaO.....	179
Figura 90. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de SiO ₂	179
Figura 91. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de Al ₂ O ₃	179
Figura 92. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de Fe ₂ O ₃	179
Figura 93. Valores reales y medidos de la composición de la mezcla	179
Figura 94. Consignas de caudal de las fuentes y caudales reales aplicados.....	179
Figura 95. Índices de rendimiento del LSF.....	179
Figura 96. Índices de rendimiento del SM.....	179
Figura 97. Índices de rendimiento del IM.....	179
Figura 98. Índices de rendimiento del “rolling value” del LSF	179
Figura 99. Índices de rendimiento del “rolling value” del SM	179
Figura 100. Índices de rendimiento del “rolling value” del IM	179
Figura 101. Condiciones generales de la comprobación.....	185
Figura 102. Composiciones iniciales del proceso de mezcla simulado, fuentes de módulos de calidad y fuentes de compuestos	186
Figura 103. Datos del Ejemplo 1: cambios discontinuos de composición y de setpoint	188
Figura 104. Evolución de los módulos de calidad	190
Figura 105. Consignas de caudal calculadas por MAC	190
Figura 106. Evolución de las composiciones de las fuentes	190
Figura 107. Datos del Ejemplo 2: deficiencias de composición	188
Figura 108. Módulos de calidad y consignas de caudal	197
Figura 109. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla	197
Figura 110. Datos del Ejemplo 2: uso de alimentadores correctivos	199
Figura 111. Módulos de calidad y consignas de caudal.....	202
Figura 112. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla	202
Figura 113. Módulos de calidad y consignas de caudal.....	204
Figura 114. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla	204
Figura 115. Módulos de calidad y consignas de caudal.....	206
Figura 116. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla	206
Figura 117. Simulación de fuente de CaO incontrolable	208
Figura 118. Declaración de la fuente de CaO como fuente conductora	209
Figura 119. Control de LSF, SM e IM con modo Leading Source en la fuente de CaO.....	210
Figura 120. Control en presencia de atasco en la fuente de CaO.....	213
Figura 121. Control en presencia de atasco en la fuente de SiO ₂	213
Figura 122. Control en presencia de atasco en la fuente de Al ₂ O ₃	214
Figura 123. Control en presencia de atasco en la fuente de Fe ₂ O ₃	214
Figura 124. Evolución secuencial de las calizas	214
Figura 125. Evolución secuencial de las margas	214
Figura 126. Evolución de los módulos de calidad - Experimento 1 del Escenario 1	214
Figura 127. Evolución de las consignas de caudal - Experimento 1 del Escenario 1	223
Figura 128. Evolución de la composición de la Caliza – Exp. 1 del Escenario 1	224
Figura 129. Evolución de la composición de la Marga – Exp. 1 del Escenario 1	224
Figura 130. Evolución de la composición medida en la mezcla para el óxido de Ca y su valor filtrado - Experimento 1 del Escenario 1.....	225
Figura 131. Evolución del caudal de la fuente de caliza con y sin ruido de proceso - Experimento 1 del Escenario 1	225

Figura 132. Evolución de la composición de la mezcla – Exp. 1 del Escenario 1.....	226
Figura 133. Evolución de LSF e índices de rendimiento - Exp 1 del Escenario 1.....	227
Figura 134. Evolución de control PID de LSF en aplicación real en planta	227
Figura 135. Evolución de SM e índices de rendimiento - Exp 1 del Escenario 1	226
Figura 136. Evolución secuencial de las calizas.....	214
Figura 137. Evolución secuencial de las margas	214
Figura 138. Evolución de los módulos de calidad - Exp 1 del Escenario 2.....	214
Figura 139. Evolución de las consignas de caudal – Exp 1 del Escenario 2.....	214
Figura 140. Evolución de la composición de la Caliza - Exp 1 del Escenario 2	214
Figura 141. Evolución de la composición de la Marga - Exp 1 del Escenario 2	214
Figura 142. Evolución de LSF e índices de rendimiento - Exp 1 del Escenario 2.....	214
Figura 143. Evolución de SM e índices de rendimiento - Exp 1 del Escenario 2.....	214
Figura 144. Evolución de los módulos de calidad - Exp 2 del Escenario 2.....	214
Figura 145. Evolución de las consignas de caudal en el Exp 2 del Escenario 2.....	214
Figura 146. Evolución de la composición de la Caliza - Exp 2 del Escenario 2	214
Figura 147. Evolución de la composición de la Marga - Exp 2 del Escenario 2	214
Figura 148. Evolución de LSF e índices de rendimiento - Exp 2 del Escenario 2.....	214
Figura 149. Evolución de LSF e índices de rendimiento - Exp 2 del Escenario 2.....	235

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de variación de las Setpoints de los Módulos de Calidad	31
Tabla 2. LSF, SM e IM aportado por cada alimentador.....	41
Tabla 3. Desviación estándar máxima de un analizador PGNAA para la medida de los óxidos principales en periodos de análisis de un minuto	47
Tabla 4. LSF, SM e IM aportado por cada alimentador – Múltiples alimentadores.	41
Tabla 5. Setpoints de módulos de calidad en consigna y en rango	63
Tabla 6. Diagnóstico de deficiencias de composición en la industria del cemento y utilización de alimentadores correctivos	192
Tabla 7. Condiciones para la reducción de la utilización de alimentadores correctivos.....	203
Tabla 8. Análisis estadístico de la precisión	192
Tabla 9. Ruidos de medida en los experimentos de las secciones 6.3.3 y 6.3.4.....	203
Tabla 10. Ruidos de proceso en los experimentos de las secciones 6.3.3 y 6.3.4	203
Tabla 11.1 Análisis de la Caliza (1-10) de planta industrial	216
Tabla 11.2 Análisis de la Caliza (11-20) de planta industrial	217
Tabla 12 Análisis de la Arena de planta industrial	217
Tabla 13.1 Análisis de la Marga (1-10) de planta industrial	218
Tabla 13.2 Análisis de la Marga (11-20) de planta industrial	218
Tabla 14. Índices de rendimiento del control de LSF	223
Tabla 15. Índices de rendimiento del control de SM	223
Tabla 14. Cuatro Niveles de Ruido de Proceso.....	239

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción a los procesos de mezcla de materiales

El proceso de mezcla de materias primas es típico de ciertas industrias tales como la del cemento, la petroquímica, la de la energía y otras. Los materiales procedentes de distintos alimentadores son dosificados con el fin de conseguir que ciertos índices o módulos de calidad de la composición de la mezcla alcancen y se mantengan en valores deseados. Dichos módulos de calidad son función del porcentaje de ciertos compuestos contenidos en la mezcla. Y dichos compuestos están contenidos en los diferentes materiales que se mezclan, aunque en proporciones diferentes para cada uno de los materiales de los diferentes alimentadores.

Utilizando un sistema de medida de la composición de la mezcla, se obtiene periódicamente una medida de los porcentajes de dichos compuestos en la mezcla, a partir de la cual el sistema de control de la mezcla debe calcular los caudales a obtener de cada uno de los alimentadores. Generalmente, el sistema de control de la mezcla envía dichos caudales calculados como consignas a los correspondientes controladores locales de caudal de cada uno de los alimentadores.

Bajo condiciones ideales, el problema de determinar el caudal de cada uno de los alimentadores para conseguir el valor deseado de los módulos de calidad de la composición de la mezcla sería relativamente fácil de resolver si conociéramos con precisión la composición del material en cada uno de los alimentadores, ya que, de forma simplificada, se reduciría a resolver un sistema de ecuaciones lineales, compatible determinado (Swain, 1995). Sin embargo, la composición de dichos materiales es generalmente desconocida y varía con el tiempo de forma aleatoria e incluso discontinua. Por otra parte, los módulos de calidad son funciones no lineales del porcentaje de dichos compuestos en la mezcla, lo que adicionalmente complica el problema de control, existiendo además retardos, ruidos de medida y de proceso (Berg, 1999). Adicionalmente, se producen con frecuencia condiciones anormales en la fabricación, tales como atascos en las fuentes, arranques y paradas de alimentadores o cambios de consigna en la producción total (Tokkesdal & Kemmerer, 2001).

Todo ello hace que el control fino de la mezcla sea un problema no trivial, siendo posiblemente el caso de la mezcla de materiales en la industria del cemento uno de los más ilustrativos, por aparecer en él todas las características mencionadas anteriormente. Es por ello que en la presente tesis nos centraremos en el proceso de mezcla de materias primas en la industria del cemento. Es más, en la industria del cemento, además del proceso de mezcla de materias primas propiamente dicho, existe un proceso más, “la premezcla”, que también es susceptible de recibir la aplicación del sistema y método objeto de la tesis. Es ésta la razón que justifica que en el presente trabajo se haga referencia constantemente a la mezcla de materiales en la industria del cemento como ejemplo ilustrativo de aplicación del método, si bien, éste no queda limitado a esa aplicación, sino que es susceptible de aplicación a cualesquiera otros procesos de mezcla con las características que se especifican en este capítulo 1, tales como, por ejemplo, el proceso de mezcla en la industria del carbón a partir de diferentes tipos de carbón (Whitacre, Schellenberg & Iorio, 2014) o el proceso de fabricación de materiales termoplásticos a partir de una mezcla de cauchos, petróleos y polipropilenos (Muteki, MacGregor & Ueda, 2007).

1.1.1 La importancia de los procesos de mezcla en la industria

La mezcla es un proceso crítico debido a que la calidad del producto final y sus características y atributos dependen de la calidad de dicha mezcla. Una mezcla inadecuada da lugar a un producto no homogéneo, que carece de consistencia en cuanto a los atributos finales deseados tales como, composición química, capacidad calorífica, contenido de emisiones, color, textura, sabor, reactividad o tamaño de partícula.

La gran variedad y complejidad creciente de los procesos de mezcla que se encuentran en las aplicaciones industriales requieren un diseño y selección extremadamente cuidadosa del proceso de mezcla, al objeto de que éste sea eficaz. Una mejora en la eficacia del proceso de mezcla conduce a menores tiempos de procesamiento y sustanciales ahorros en costes de operación.

Con respecto a la mezcla de materiales en la fabricación de cemento, el crudo procedente del proceso de mezcla se quema en el horno obteniéndose el llamado clínker, ocurriendo que la estabilidad en la composición química de la harina que alimenta el horno permite llevar a cabo un mejor control del horno y minimizar las condiciones límites en el mismo para la producción de un clínker de calidad. Sin dicho control fino de la composición química de la mezcla, el control preciso del horno se hace prácticamente imposible (Mohamed & Hesham, 2010).

Por tanto, aunque casi todas las plantas productoras de cemento son únicas de alguna forma en la producción, en las limitaciones exógenas o los recursos de que disponen, aun así, todas ellas comparten un objetivo común: mantener una consigna para la alimentación al horno con baja variabilidad, dando lugar por tanto, a una mayor producción del horno, un menor consumo de energía y un tiempo de vida del refractario mayor.

Las pilas de pre-mezcla, la mezcla de materias primas y los silos de homogeneización después de los molinos, que son los pasos tradicionales del conjunto del proceso para alcanzar el objetivo, suelen ser tratados como tres componentes separados del proceso de producción de cemento, cada uno con su propio conjunto de limitaciones y objetivos: las pilas de pre-mezcla para eliminar la variabilidad a largo plazo, la mezcla de materias primas para alcanzar el objetivo químico de la mezcla total y minimizar las variaciones a corto plazo y, los silos de post-homogeneización para reducir aún más la mencionada variabilidad a corto plazo.

Sin embargo, debido a que el material pasa sucesivamente de un componente al siguiente, los tres componentes están acoplados en términos de limitaciones y rendimiento. Es por ello que la capacidad del componente de mezcla de materias primas afecta a los requerimientos impuestos a la premezcla (o prehomogeneización) y a la homogeneización en silos posterior a los molinos de crudo (Berg, 1999).

1.1.2 El proceso de mezcla en la producción de cemento

El cemento es un material inorgánico, no metálico, finamente molido, que cuando se mezcla con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece. Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados, como resultado de una reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico lo ha convertido en un material básico de construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras. Dentro del cemento, el llamado cemento portland es el aglomerante hidráulico de mayor importancia. Se obtiene por adición de yeso, agente regulador de la velocidad de fraguado, al clínker, el cual se obtiene por cocción mayoritaria de arcillas y caliza (Gomá, 1979).

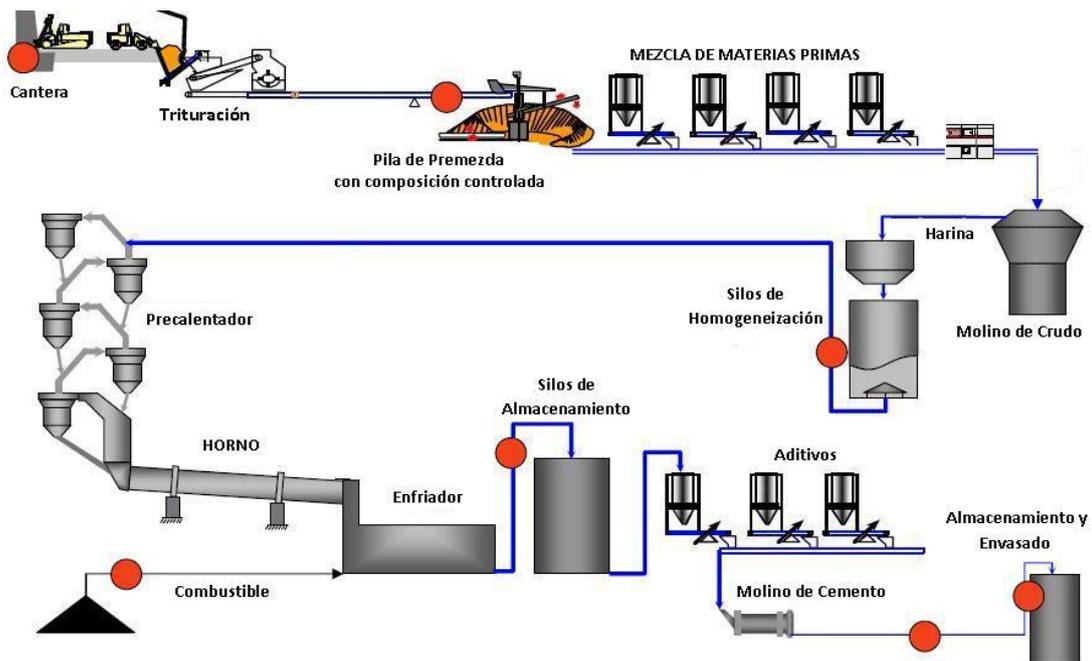


Figura 1. Principales procesos en la fabricación de cemento

Para comprender más a fondo la ubicación del proceso de mezcla en la producción de cemento, y su influencia e interacción con las demás etapas del proceso de fabricación de cemento, es necesario conocer dicho proceso en su conjunto.

La Figura 1 muestra esquemáticamente los principales procesos que componen el proceso total de fabricación de cemento. Pasamos a describirlos brevemente (Gomá, 1979), (García, 2007): Extracción de materias primas de la cantera; Trituración; Prehomogeneización; Mezcla de materias primas; Molienda del crudo; Homogeneización; Cocción en horno; Enfriamiento; Incorporación de adiciones; Molienda de cemento; y Envasado.

1.1.3 Obtención de la mezcla de materias primas

Extracción de materias primas de la cantera

La composición del crudo de cemento portland está formada esencialmente por silicatos cálcicos ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Por tanto, sus materiales de partida estarán formados por calizas con un título superior a un 85 % en CaCO_3 y por productos aportadores de sílice, como las arcillas y las margas, que a su vez aportan alúmina y hierro. La apertura de las canteras de caliza se efectúa a cielo abierto, llevando a cabo un desmontado previo de las zonas que, según el plan previsto, han de ser las del comienzo de la explotación. A continuación se abren plataformas escalonadas, según la topografía específica del terreno, mediante voladuras sucesivas, dando lugar a perforaciones y al arranque del material (Herrera, 2005).

Trituración

El material depositado en la base de la cantera después del arranque es transportado a la operación de trituración para producir una granulometría conveniente para su manejo en la prehomogeneización. Esta trituración se divide en dos etapas: primaria y secundaria. La primera etapa se efectúa con trituradoras de mandíbulas o de conos, y los materiales son reducidos a diámetros comprendidos entre los 10 y 20 cm. En una segunda etapa se consigue una nueva reducción de tamaño, hasta aproximadamente 1 cm de diámetro. Se emplean trituradoras de martillo, o bien de impactos cuando el material no tiene plasticidad (Álvarez, 2007).

Prehomogeneización

Elegidas las materias primas provenientes de la cantera, conviene que el material calizo, que es el mayoritario, sea técnicamente constante en el transcurso de su producción. Esto se consigue mediante sistemas de prehomogeneización que permiten apilar este material calizo en stocks –llamados pilas de premezcla o de prehomogeneización- de la siguiente manera: una cinta transportadora móvil deposita constantemente material, del tamaño granulométrico derivado de la trituración secundaria, desplazándose, a su vez, mediante un sistema de raíles por toda la longitud del almacenamiento que se forma y retrocediendo alternativamente al llegar al final de cada extremo. Se forma así un depósito de material formado por capas en sentido longitudinal.

Cuando el almacenamiento se ha terminado, mediante una rueda de cangilones se empieza a extraer material del depósito en forma transversal y, por tanto, perpendicular a la dirección de su formación para compensar al máximo sus variaciones de composición. Después se vierte el material a una cinta transportadora para situarlo en la siguiente operación (Bond, Coursaux, & Worthington, 2000).

Mezcla de materias primas

Además de la caliza, las otras materias que forman parte del crudo como componentes minoritarios o “correctores” son, generalmente, arcillas, areniscas y piritas.

Reunidas las materias que formarán el crudo cerca de las instalaciones de molienda mediante los correspondientes sistemas de transporte, se procede a la mezcla de estas materias primas o “etapa de dosificación del crudo”. Se lleva a cabo mediante básculas de dosificación que regulan las cantidades de los materiales para obtener la mezcla de alimentación al molino de crudo con las proporciones de los componentes previamente establecidas por los cálculos de dosificación. La optimización de este proceso es el objeto de esta tesis.

1.1.4 Procesos posteriores a la mezcla

Molienda del crudo

La molturación, generalmente conjunta, de estos materiales que forman el crudo, dará lugar a una harina con la granulometría adecuada para su clinkerización. Generalmente, tiene un rechazo sobre tamiz de luz de 90 μ de un 15 % a un 20 %. Los molinos empleados son molinos de bolas provistos de sistemas “secadores” con aires precalentados por intercambiador, con objeto de evitar el efecto perjudicial de su eventual contenido de humedad (Álvarez, 2007).

La molienda, dosificación y mezcla pueden realizarse además en medio acuoso, con alimentación también de agua, o bien con los materiales desecados previamente (“vía húmeda” y “vía seca”, respectivamente). La vía húmeda tiene la ventaja de que el barro obtenido permite mejores homogeneizaciones, aunque es a costa de tener que evaporar esa agua en el horno, con el correspondiente gasto de combustible.

Homogeneización

En el proceso continuo de producción de una misma harina surge la dificultad de conseguir la constancia de la composición. La uniformidad de ésta es necesaria para obtener luego una clinkerización regular, ya que la temperatura requerida depende de la composición de la harina. Esta uniformidad se logra mediante la homogeneización en silos adecuados, con inyección de aire a presión.

Cocción en horno

La harina obtenida con una composición regular es introducida por transporte neumático por el extremo superior del precalentador, cuyo objeto es aumentar la temperatura del crudo antes de su entrada al horno. El precalentador consiste en un sistema vertical de ciclones por los que la harina desciende a contracorriente de los gases de combustión, aumentando su temperatura hasta unos 900°C a la entrada del horno. El horno rotatorio consiste en un tubo cilíndrico alargado, revestido interiormente con dos capas de material refractario. La longitud de los hornos con precalentador oscila entre los 60 y 90 m. Los diámetros, entre 3 y 6 m. Y las pendientes para conseguir el avance del material por rotación, varían entre el 2 % y

el 5 %. La harina cruda introducida en el horno avanza así en sentido de la inclinación, hasta que a unos 1400 °C se obtiene un punto incipiente de fusión del material, formándose pequeños nódulos o bolas incandescentes, de 3 a 4 cm de diámetro, que se denominan clínker.

En el extremo de salida del horno es donde se encuentra el quemador, alimentado generalmente con fuel o carbón como combustible. El quemador atraviesa el cabezal de cierre del horno y posee, además, la entrada de aire para la combustión: aire primario, o aire frío, con tiro forzado; y aire secundario precalentado, procedente del enfriador del clínker.

Enfriamiento

El clínker formado se enfría a continuación en sistemas de parrilla, que permiten que la entrada de aire frío atraviese las capas de clínker que avanzan sobre parrillas de acero inoxidable. El aire resultante precalentado sirve, a su vez, para la combustión en el horno.

Incorporación de adiciones

Una vez enfriado, el clínker de cemento es depositado en silos. Posteriormente se le incorpora una adición de yeso del orden del 10 %, agente que permite regular la velocidad de fraguado, obteniéndose así el cemento portland. Para otros tipos de cemento se podrán agregar otros materiales, como por ejemplo puzolanas, pero en todos los casos siempre se añadirá un contenido mínimo de yeso de entre el 5 % y el 6 %.

Molienda de cemento

La molienda de este clínker junto con las adiciones da lugar al cemento acabado. Los molinos empleados son cilindros de acero austenítico al manganeso, generalmente con tres compartimentos separados por rejillas de paso, llenados aproximadamente a un tercio de su volumen con bolas de tres tamaños granulométricos. Cuanto menor es el diámetro y proporción de las bolas en el último compartimento, mayor grado de finura se obtiene en el cemento. Para un mayor grado de finura corresponde una

mayor superficie de exposición a las reacciones de hidrólisis y, por tanto, un mayor desarrollo de resistencias y poder hidráulico.

Envasado

El cemento acabado y ya molido es ensilado para efectuar luego la distribución en la forma conveniente en cada caso. La conservación del cemento acabado requiere su preservación de la humedad ambiental para evitar una anticipada reacción con el agua en el momento de su puesta en obra. Ello supondría una pérdida de calidad gradual, con grave peligro si no es detectada previamente.

1.1.5 Importancia de un control optimizado de la mezcla

Sin un control fino de la composición química de la mezcla, el control preciso del horno, en el proceso de cocción de la harina en un horno rotatorio, se hace prácticamente imposible, por las siguientes razones:

- Los cambios en la composición química de la alimentación al horno crean desviaciones en los niveles térmicos del mismo, afectando de forma adversa a la estabilidad del proceso y a la calidad del producto acabado.
- Los sistemas de control del horno más avanzados llevan el nivel térmico a su consigna cuando eventualmente se producen desviaciones, pero no pueden prevenir las mismas.
- Los cambios en la composición química de la harina crean oscilaciones en el horno.
- Ningún sistema de control del horno compensa completamente la variabilidad de la composición química de la harina.

El significado e interés del control preciso del proceso de mezcla de materias primas en una planta de cemento radica en que éste da lugar a una sustancial reducción en los costes de operación y a un aumento en la producción de la planta. En concreto, el empleo conjunto de un analizador en línea y de un sistema de control avanzado para

la mezcla, permite obtener los siguientes resultados (Tran, Nguyen & Martín Sánchez, 2000):

- Aumento de la productividad de la planta de cemento entre 1 % y 3 %, por variación de las condiciones límites para la producción de clínker de calidad.
- Reducción de la energía específica en la molienda de cemento entre el 1 % y 2,5 %, por la calidad más consistente del clínker.
- Reducción del consumo de combustible en el horno entre 2 % y 6 %, por disminución de la temperatura requerida en él para una harina de mejor calidad.
- Reducción del consumo de refractario entre 10 % y 20 % en el horno, por la estabilidad de temperaturas.
- Reducción de costes de operación y mantenimiento por la eliminación de parte, o de la totalidad, del sistema de prehomogenización (pilas de prehomogenización), así como de su equipo de funcionamiento asociado.
- Eliminación de la necesidad de nuevos silos para almacenamiento y homogenización de la harina, así como de su equipo de funcionamiento asociado.

1.2 Materiales, óxidos y módulos de calidad

Como hemos dicho, en el proceso de mezcla de una planta de cemento se mezclan materiales tales como caliza, arena, marga y pirita, que contienen, en distintas proporciones cada uno de ellos, óxidos de calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe).

Los módulos de calidad más utilizados para expresar la composición química de la mezcla son, generalmente, el Factor de Saturación de Cal (FSC, también conocido por LSF, del inglés *Limestone Saturation Factor*), el Módulo de Silicio (MS, o SM

en inglés, *Silica Module*) y el Módulo de Hierro (MH, en inglés IM, *Iron Module*), que se definen por medio de las siguientes ecuaciones (Gomá, 1979):

$$LSF = \frac{100 \cdot CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,65 \cdot Al_2O_3 + 0,35 \cdot Fe_2O_3}$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

en los que CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ representan la concentración en tanto por ciento de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en la mezcla, respectivamente.

Alternativamente, se pueden utilizar otros módulos de calidad, tales como:

$$C_3S = 4,071 \cdot CaO - (7,602 \cdot SiO_2 + 6,718 \cdot Al_2O_3 + 1,43 \cdot Fe_2O_3)$$

$$C_3A = 2,65 \cdot Al_2O_3 - 1,692 \cdot Fe_2O_3$$

en donde nuevamente CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ representan la concentración en tanto por ciento de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en la mezcla, respectivamente. Cuando se utilizan los módulos de calidad C₃S y C₃A, ellos reemplazan al LSF e IM, respectivamente. El C₃S hace referencia al silicato tricálcico (3CaO.SiO₂) mientras que el C₃A se refiere al aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃), siendo las expresiones anteriores sus esquemas válidos de cálculo.

Además, y dependiendo de la planta o de las condiciones de operación, los coeficientes multiplicadores de los óxidos en las cinco expresiones anteriores pueden variar ligeramente.

Por tanto, el objeto de un sistema de control del proceso de mezcla se puede decir que es controlar con precisión el valor de estos módulos de calidad en la mezcla mediante la actuación sobre los caudales de los dosificadores, de manera que el valor de estos módulos de calidad se ajuste y mantenga en los valores específicos (consignas, o setpoints en inglés) que marque la dirección de la planta.

Consignas usuales para estos módulos de calidad empleados en la práctica son, por ejemplo, LSF = 102; SM = 2,5; IM = 1,9. Cuando la planta quiere cambiar el tipo de cemento fabricado, lo que se hace es modificar los setpoints de los módulos de calidad, debiendo el sistema ajustarse a estos nuevos valores de referencia. En general, los setpoints, en función del cemento que se quiera producir, se suelen variar en los rangos que indica la Tabla 1.

Módulo de Calidad	LSF	C3S	SM	IM	C3A
Rango de variación de los Setpoints	90 - 105	45 - 705	2,0 – 3,5	1,4 – 2,5	3 – 10

Tabla 1. Rangos de variación de las Setpoints de los Módulos de Calidad

Aunque la fijación de las consignas depende de las características especiales del cemento que la planta quiere obtener, la influencia de los módulos de calidad sobre la resistencia es, en general, la siguiente (Gomá, 1979):

- El LSF mide el grado de formación de compuestos cálcicos. Oscila entre 90 y 105. Cuanto mayor es el LSF, mayor consumo de energía calorífica se requiere en el horno para la combustión del clínker y mayor es la resistencia del cemento producido (Swain, 1995).
- El SM tiene un límite de variación normal ente 2,0 y 3,5, y dentro de este límite, cuanto mayor sea, mayor potencial de resistencia a cualquier plazo.
- El IM no afecta a las resistencias a largo plazo, sino tan solo a las resistencias iniciales cuando es elevado. En el cemento portland ordinario su valor oscila entre 1,4 y 2,5, mientras que toma valores más bajos para la fabricación de cementos especiales resistentes a la acción agresiva de los sulfatos.

1.3 Análisis de la composición de la mezcla

Para reducir las variaciones a corto plazo en la composición química de la mezcla, es la capacidad del sistema de control de la mezcla de materias primas el elemento crítico. Y la capacidad de dicho sistema depende fundamentalmente de dos condiciones: de la integridad de las mediciones de la composición química que se proporcionan al algoritmo de control de la mezcla, y de la velocidad o frecuencia de medida. Son estos los dos criterios fundamentales que definen la selección de la técnica de análisis: integridad en las medidas y alta velocidad o frecuencia en la medida.

Aunque es claramente conocido por análisis estadísticos que estas dos características son inversamente proporcionales, es decir, no se puede mejorar una de ellas sin afectar negativamente algo a la otra. Si el sistema mide más frecuentemente, va a ser a costa de una ligera bajada en la calidad de la medida. Es por ello que en la práctica hay que llegar a un compromiso que sea aceptable a los fines del proceso. Sin embargo, interesa mucho tener un periodo de análisis pequeño, pues permite observar, y reaccionar, a perturbaciones de alta frecuencia, que con sistemas de mayor periodo de medida serían indetectables (Berg, 1999) (Bond, Coursaux, & Worthington, 2000).

1.3.1 Técnicas de laboratorio

En estas técnicas, la medición de los óxidos en el proceso de mezcla se basa en una técnica de muestreo y análisis en laboratorio por rayos-X. Esto da lugar a tiempos entre medida y medida no inferiores a una hora, lo cual hace imposible un control fino de la composición de la mezcla de materias primas.

Esta muestra se suele tomar de la harina cruda que entra a los silos de homogeneización, lo cual hace que dicha harina también contenga polvo de los secadores de que están provistos los molinos de crudo. Asimismo, puede contener

polvo de plantas anexas que existan en la fábrica, como ocurre, por ejemplo, cuando se dispone además una planta de aglomerantes.

La Figura 2 muestra la ubicación de la toma de muestras en la fábrica de cemento de Compagnie des Ciments Belges (CCB) (Glorieux, Lanz, & Woodward, 1990).

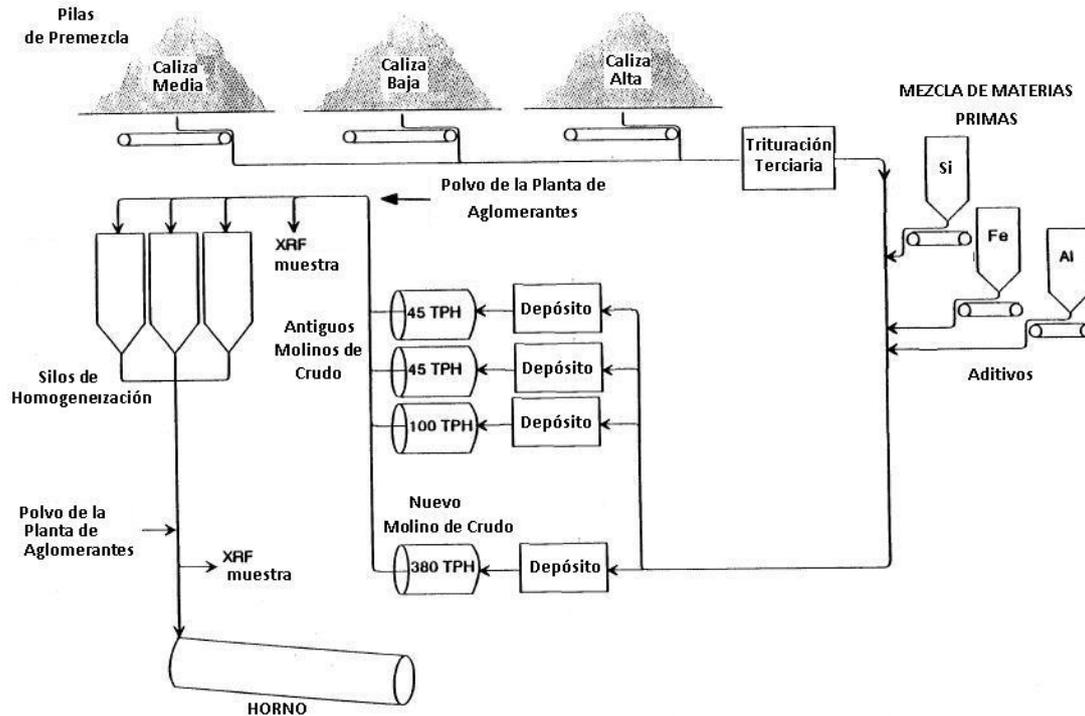


Figura 2. Ubicación de la toma de muestras en una fábrica de cemento
(Glorieux, Lanz & Woodward, 1990)

Las muestras tomadas son divididas y, sin molienda adicional, se preparan con ellas pellets (pequeñas bolitas) a presión, sin fundir, las cuales son analizadas por fluorescencia de rayos-X. Estas operaciones de laboratorio, así como los subsiguientes cálculos son realizados por el químico jefe responsable del laboratorio.

Estos métodos requieren la extracción y preparación de la muestra para posterior transporte y análisis en laboratorio, lo cual da lugar a tiempos de análisis no inferiores a 30 minutos en el mejor de los casos (Jacobs, & Regis, 2006).

1.3.2 Analizadores en línea

Debido a este requerimiento de alta frecuencia de análisis, se ha extendido el uso de los llamados analizadores en línea, es decir, analizadores en la proximidad del proceso de mezcla, que debido a ello dan lugar a tiempos de análisis pequeños, en el rango de 1 a 10 minutos. En la práctica existen dos tipos de analizadores en línea atendiendo a la tecnología que emplean (Berg, 1999):

- Analizadores en Línea del tipo que utilizan la tecnología PGNAA (*Prompt Gamma Neutron Activation Analysis*). Es decir, tecnología de Análisis de Rayos Gamma por Activación Neutrónica.
- Analizadores en Línea que utilizan la técnica de fluorescencia de Rayos-X (XRF).

1.3.2.1 Tecnología de fluorescencia de Rayos-X

El análisis espectrométrico por fluorescencia de rayos X está basado en la excitación del átomo hasta el nivel energético K con rayos X. La medida de la radiación secundaria producida, que oscila entre los 0,4 y 10 Å, permite la determinación cuantitativa de óxidos por comparación con espectros de composición conocida (Gomá, 1979).

Estos analizadores toman y preparan en línea una muestra, molida adicionalmente en algunos casos, la cual es analizada por fluorescencia de rayos X. Para ello el analizador dispone de una unidad de producción y preparación de la muestra, una unidad para producir pellets fundidos y rápidamente enfriados, y transportadores de muestras y de pellets. Para la toma de muestras se dispone, fuera del analizador, de

una torre de muestreo que recoge la muestra y se la envía a un homogeneizador, situado en la parte superior del analizador. Todos estos requisitos y componentes hacen que el periodo de análisis no sea nunca inferior a 5 minutos, además de necesitar una robótica avanzada (Jacobs, & Regis, 2006).

1.3.2.2 Tecnología PGNA

El analizador PGNA dispone de una fuente de neutrones, siendo estos neutrones adecuadamente activados. Los neutrones térmicos así activados excitan a su vez el núcleo de cada uno de los elementos componentes de la mezcla, los cuales, en consecuencia, emiten rayos gamma casi instantáneamente, de una forma tan rápida que el movimiento del material debido a la velocidad de la cinta no tiene efecto. El esquema de la reacción nuclear de la captura neutrónica es el mostrado en la Figura 3 (Leetham, 2008), (Zanabria, 2008). Y químicamente se expresa como:

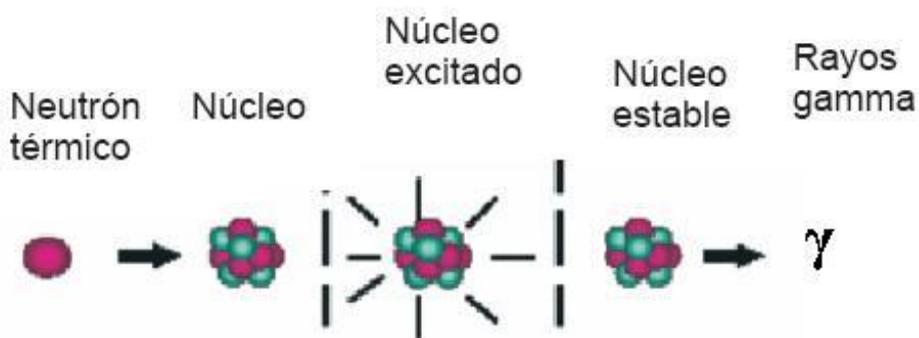
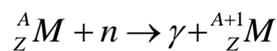


Figura 3. Esquema de la reacción nuclear de captura electrónica (Leetham, 2008)



en donde M es un átomo del elemento en cuestión, A es el número másico del átomo y Z es el número atómico, es decir, el número de protones del átomo.

Los rayos gamma se generan con un único conjunto de valores de energía para cada elemento y se convierten en fotones de energía proporcional dentro de los detectores

centelleantes de sodio yodado. Un tubo foto-multiplicador convierte a continuación los fotones en pulsos eléctricos, que también son proporcionales a los rayos gamma originalmente producidos. Los pulsos eléctricos del detector se amplifican, digitalizan y son procesados para generar un espectro de energías de rayos gamma. Este espectro de energías de rayos gamma se analiza para proporcionar la composición porcentual en peso.

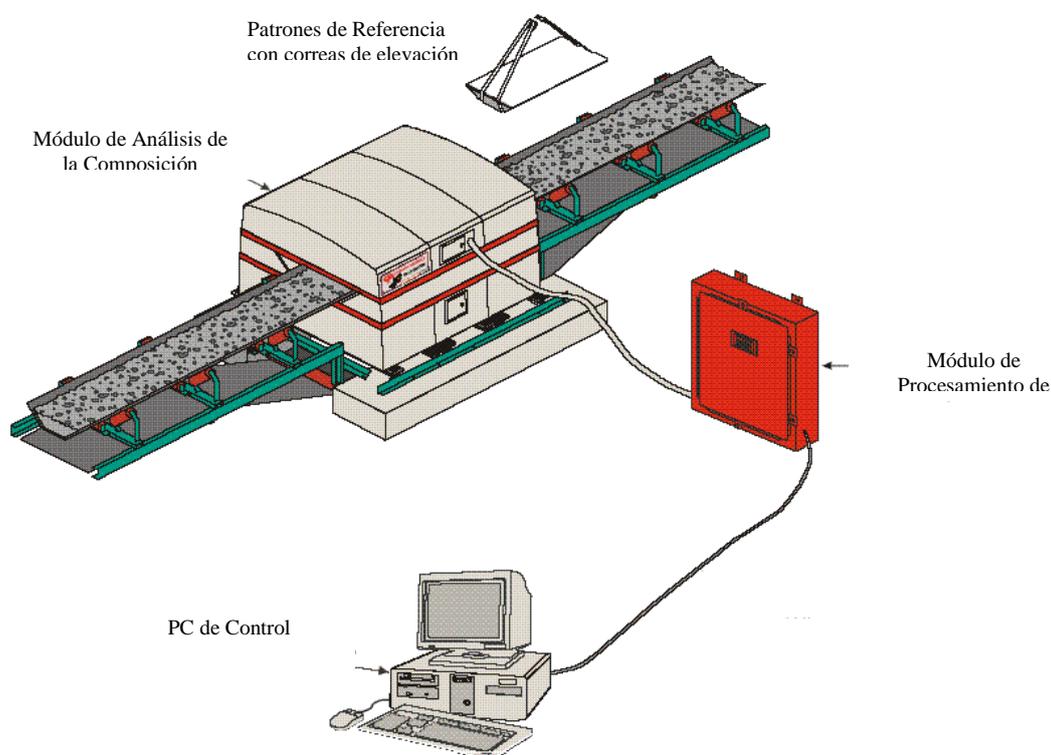


Figura 4. Componentes de un Analizador PGNAA. (<http://www.thermoscientific.com>)

La Figura 4 ilustra esquemáticamente los componentes de un analizador PGNAA, mientras que la Figura 5 ilustra los diferentes bloques del módulo de análisis de la composición (<http://www.thermoscientific.com>). El bloque central inferior contiene fuentes de neutrones radiactivas de Cf-252, y el bloque central superior contiene un dispositivo detector de rayos gamma que está protegido por una resistente coraza

metálica. Los módulos así enlazados aseguran niveles de radiación por debajo de los límites establecidos por la International Atomic Energy Association (IAEA).

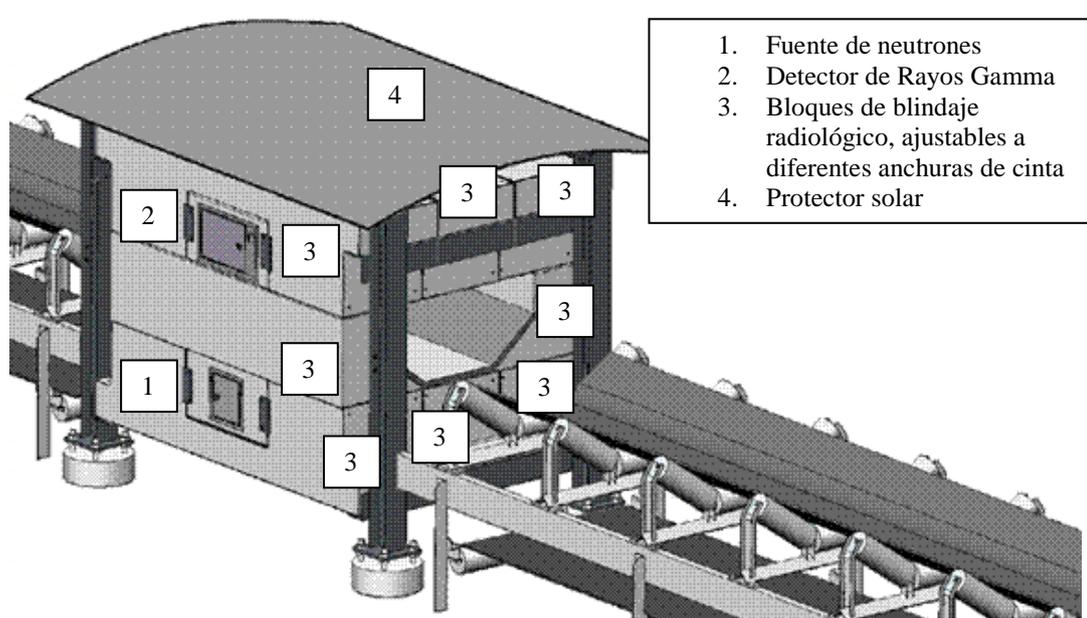


Figura 5. Módulo de análisis de la composición (<http://www.thermoscientific.com>)

1.3.2.3 Comparación de características

Periodo de análisis

El analizador PGNAA garantiza un periodo de análisis de un minuto, mientras que el analizador XRF ofrece un periodo nunca inferior a los 5 minutos, haciendo imposible, por tanto, el control de las perturbaciones de alta frecuencia.

Integridad de la medida

Cuando están correctamente calibrados, ambos tipos de analizadores proporcionan una precisión similar en la medición de los cuatro óxidos mayoritarios, es decir, CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃. El analizador PGNAA es capaz de medir también, minuto a minuto, óxidos secundarios.

En cuanto a los errores sistemáticos en la medida, en el caso de los analizadores PGNAA éstos se deben al diseño del sensor o, en general, de la instrumentación, mientras que en el caso de analizadores XRF son debidos a operaciones realizadas por otros subprocesos de la planta, como por ejemplo los errores sistemáticos de medida de los analizadores XRF debidos a la heterogeneidad del tamaño de las partículas consecuencia de la etapa de trituración. Esta posibilidad de desacoplar los errores sistemáticos en la medida del rendimiento de los otros subprocesos de la planta hace a los analizadores PGNAA más robustos.

Errores relativos al muestreo

El analizador PGNAA carece de errores relativos a representatividad y preparación de la muestra, ya que el analizador PGNAA analiza el caudal total de la mezcla que le atraviesa y no sólo una muestra. Los analizadores XRF, sin embargo, están sujetos a esta fuente de errores al requerir la selección y preparación de una muestra.

Por todas estas razones, se puede decir que para la medida de la composición de la mezcla son preferidos los analizadores en línea de tipo PGNAA.

En cuanto a la selección del posicionamiento del analizador PGNAA dentro del proceso, éste se dispone sobre la cinta transportadora de alimentación al molino de crudo, como lo ilustra la figura 1 de principales procesos de fabricación de cemento; por tanto, antes de éste. Las razones fundamentales son dos:

- evitar la existencia de períodos de retardo adicionales debidos al tiempo de permanencia del crudo en el molino de crudo (Luyben, 1990), y
- evitar que la medida de la composición química de la mezcla se vea afectada por el polvo de los secadores, así como el posible polvo procedente de filtros de otras plantas, como ocurre, por ejemplo, cuando en la fábrica existe además una planta de aglomerantes, los cuales se añaden tras el molino de crudo.

1.4 Dinámica del proceso de mezcla y planteamiento del problema

1.4.1 Caso ideal

Un proceso de mezcla típico en la industria del cemento es como el representado en la Figura 6, en la que se observan cuatro alimentadores, si bien, dicho número varía de una planta a otra. La Figura 6 representa el proceso de mezcla considerado y muestra, dentro de cada uno de los alimentadores, sus composiciones iniciales, indicando en columna los respectivos porcentajes de los óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, cuya posición en cada columna se indica en la columna a la izquierda de los alimentadores.

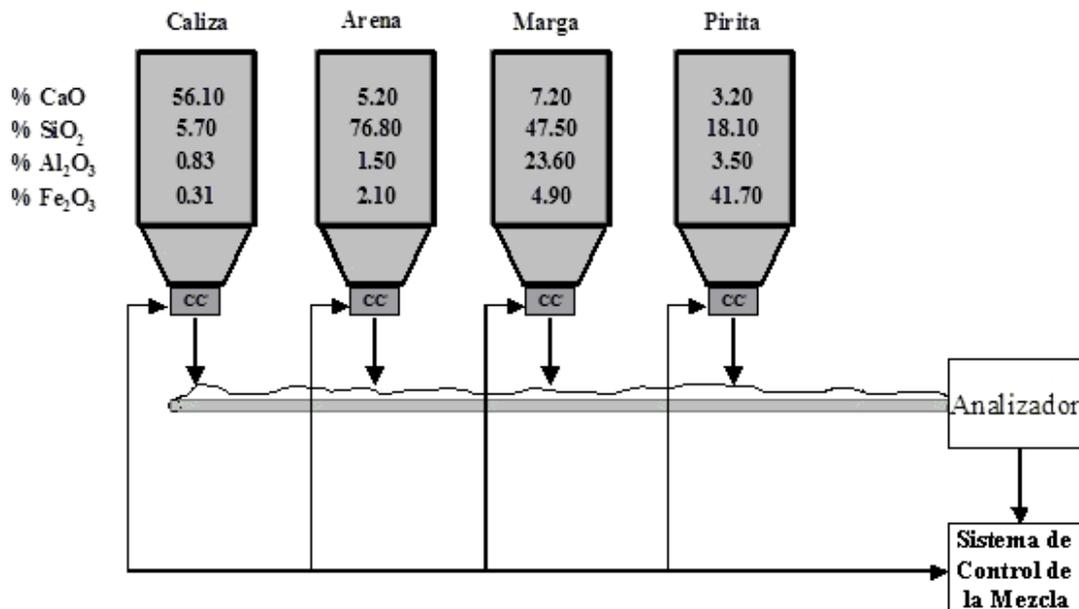


Figura 6. Proceso de mezcla típico en la industria del cemento

Como puede observarse, el material del primer alimentador es una caliza, y como tal, puede considerarse el suministrador principal de CaO, conteniendo un 56,1% de CaO, un 5,7% de SiO₂, un 0,83% de Al₂O₃ y un 0,31% de Fe₂O₃. El material del segundo alimentador es una arena, y como tal, suministrador de SiO₂, conteniendo un 5,2% de CaO, un 76,8% de SiO₂, un 1,5% de Al₂O₃ y un 2,1 % de Fe₂O₃. El material del tercer alimentador es una marga y es suministrador de Al₂O₃, conteniendo un

7,2% de CaO, un 47,5% de SiO₂, un 23,6% de Al₂O₃ y un 4,9% de Fe₂O₃. Por último, el material del cuarto y último alimentador es una pirita, como tal suministrador de Fe₂O₃, y contiene un 3,2% de CaO, un 18,1% de SiO₂, un 3,5% de Al₂O₃ y un 41,7% de Fe₂O₃.

Supongamos además que los módulos de calidad que se desean controlar son LSF, SM, IM, con los siguientes valores de consigna:

$$LSF = 94; SM = 2; IM = 2$$

Y que el caudal total demandado de mezcla es de 100 toneladas/hora.

Pues bien, como hemos dicho antes, bajo condiciones ideales y suponiendo que la composición del material en cada uno de los alimentadores es la conocida y no cambia; la determinación del caudal de cada alimentador para alcanzar los valores deseados de los módulos de calidad, en estado estacionario, sería tarea fácil. En efecto, para cada alimentador se puede calcular, a partir de su composición, el LSF, SM e IM que aporta. En el caso propuesto, los módulos de calidad de cada alimentador se muestran en la Tabla 2.

	Caliza	Arena	Marga	Pirita
LSF	327,29	2,38	4,39	3,91
SM	5	21,33	1,67	0,40
IM	2,68	0,71	4,82	0,08

Tabla 2. LSF, SM e IM aportado por cada alimentador

Y el valor de cada uno de los módulos de calidad en la mezcla será la suma ponderada de los módulos de calidad de cada uno de los alimentadores; es decir, se calculará multiplicando cada módulo de calidad de cada alimentador por su caudal relativo en tanto por uno, y extendiendo la suma a todos los alimentadores. Es decir,

$$LSF_{Caliza} * C_{caliza} + LSF_{Arena} * C_{Arena} + LSF_{Marga} * C_{Marga} + LSF_{Pirita} * C_{Pirita} = LSF_T$$

$$SM_{Caliza} * C_{caliza} + SM_{Arena} * C_{Arena} + SM_{Marga} * C_{Marga} + SM_{Pirita} * C_{Pirita} = SM_T$$

$$IM_{Caliza} * C_{caliza} + IM_{Arena} * C_{Arena} + IM_{Marga} * C_{Marga} + IM_{Pirita} * C_{Pirita} = IM_T$$

Sustituyendo los valores totales de los módulos de calidad por sus consignas, LSF_{SP} , SM_{SP} e IM_{SP} , y utilizando que la suma de los caudales en tanto por uno ha de valer 1, tendríamos el siguiente sistema lineal:

$$LSF_{Caliza} * C_{caliza} + LSF_{Arena} * C_{Arena} + LSF_{Marga} * C_{Marga} + LSF_{Pirita} * C_{Pirita} = LSF_{SP}$$

$$SM_{Caliza} * C_{caliza} + SM_{Arena} * C_{Arena} + SM_{Marga} * C_{Marga} + SM_{Pirita} * C_{Pirita} = SM_{SP}$$

$$IM_{Caliza} * C_{caliza} + IM_{Arena} * C_{Arena} + IM_{Marga} * C_{Marga} + IM_{Pirita} * C_{Pirita} = IM_{SP}$$

$$C_{caliza} + C_{Arena} + C_{Marga} + C_{Pirita} = 1$$

Resolviendo este sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, hallaríamos los cuatro caudales en tanto por uno, que multiplicados por el caudal total de la mezcla, nos permitirían hallar las consignas de caudal a aplicar a cada uno de los alimentadores en estado estacionario.

1.4.2 Variación de la composición química de los alimentadores

Ahora bien, la composición química de los alimentadores varía con el tiempo. Y la ganancia estática del sistema depende de estas composiciones de los alimentadores, así como de los setpoints de los módulos de calidad (Oliveira, Amrhein & Karimi, 2011). Aun así, si dispusiéramos de las medidas de la composición química de los alimentadores en tiempo real antes de proceder a la mezcla, el problema de la dosificación de los alimentadores sería una tarea relativamente fácil de llevar a cabo, que implicaría aplicar control feed-forward para compensar dichas variaciones en la composición química del material de los alimentadores (Berg, 1999), (Weiss, S & Gartner, E. 1986), (Luyben, 1990), (Tsamatsoulis, 2014).

Sin embargo, medir en línea la composición química de los alimentadores no es viable económicamente, de manera que únicamente se pueden intentar compensar las

desviaciones de los módulos de calidad, una vez que se mide la composición de la mezcla por medio del analizador.

Y esta variación en la composición puede ser aleatoria o discontinua. La variación aleatoria hace referencia a la oscilación aleatoria de cada óxido en el alimentador con respecto a su supuesto valor nominal. Esto se debe normalmente a una distribución continua de los minerales en la cantera, fuente principal de caliza, y en los materiales de los otros alimentadores.

Por otro lado, las variaciones discontinuas hacen referencia a saltos en escalón en un alguno de los óxidos de los materiales. Una posibles causa de estas variaciones es la segregación en la caliza durante el proceso de extracción/apilamiento en la fase de prehomogeneización, lo cual da lugar a la aparición periódica y puntual de altos contenidos en CaO (Berg, 1999) o bien el cambio discontinuo de material empleado en los restantes alimentadores.



Figura 7. Variaciones aleatorias y discontinuas en la composición de los alimentadores

La figura 7 ilustra estas variaciones aleatorias y discontinuas, mostrando la evolución de la composición del óxido principal en cada alimentador durante 300 minutos en el proceso de mezcla. Se observa que en los instantes 70, 110 y 150 se producen variaciones discontinuas del %Ca en el alimentador de caliza (línea azul), del %Si en el alimentador de silicio (línea verde) y del %Al en el alimentador de aluminio (línea roja), respectivamente. En el alimentador de hierro (línea rosa) no hay variaciones discontinuas de composición, sólo aleatorias. Las variaciones aleatorias se observan en los cuatro alimentadores durante los 300 minutos.

En ambos casos, se trata de perturbaciones de elevada frecuencia, las cuales requieren una acción de control más enérgica para contrarrestarla, lo cual, en consecuencia, hace al sistema de control menos robusto frente a ruidos de medida o de proceso (disminuye la robustez del sistema). Es decir, el equilibrio típico al que deben de llegar los sistemas de control: rendimiento frente a robustez.

1.4.3 Retardos

La minimización a corto plazo de la variabilidad de la composición química de la mezcla requiere un controlador “agresivo” (o digamos, rápido). Sin embargo, por otra parte, la capacidad de un controlador para responder rápidamente depende en gran parte de los retardos, es decir, del tiempo de transporte del material que cae de cada alimentador hasta el analizador.

Los sistemas de control basados en PGNAA no requieren ni transporte de la muestra ni preparación de la misma, y por ello los retardos asociados con estas etapas son nulos para estos sistemas. Además, en el caso de alimentadores automatizados, el retardo de comunicación es también despreciable.

Cuando en un lazo de control hay retardos presentes, las ganancias del controlador se deben reducir para mantener la estabilidad. La importancia de los retardos depende del orden de la escala de tiempos del proceso: cuanto mayor sea el retardo, mayor

reducción de la ganancia se requerirá. En la mayoría de los casos, esto da lugar a un rendimiento menor y a respuestas lentas.

Desde un punto de vista del control, tiempos de retardo mayores se traducen en menores márgenes de fase. El margen de fase es una medida de la estabilidad relativa de un sistema de control. Un margen de fase pequeño limita la velocidad con que el controlador puede responder a errores que provengan de las imprecisiones que existan en el modelo del controlador. El margen de fase que normalmente se persigue en un lazo cerrado va de 45° a 50°. El ángulo (ϕ) de fase para un retardo (θ_d) es:

$$\phi = -360^\circ \frac{\theta_d}{T_o}$$

en donde T_o es el periodo de oscilación (el periodo de la perturbación). Hay que destacar que el ángulo de fase no está limitado, una característica importante de los retardos que actúa en detrimento de la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado.

Para ilustrar el efecto de los largos periodos de retardo, consideremos un sistema de mezcla que debe minimizar la variabilidad de una mezcla en donde las variaciones de la química de los materiales que vienen de cantera se caracterizan por periodos del orden de 30 minutos. Si ignoramos el ángulo de fase debido al periodo de adquisición, el cual aumenta con periodos de muestreo crecientes, el límite superior para el periodo de retardo será de 11,25 minutos, el cual podemos suponer que se compone únicamente del retardo de transporte de material. Es decir,

$$\begin{aligned} \text{Mínimo margen de fase tolerable} &= \\ &= 45^\circ = 180^\circ + \phi = 180^\circ - 360^\circ \frac{\theta_d}{T_o} = 180^\circ \cdot \left(1 - \frac{2\theta_d}{30 \text{ min}}\right) \end{aligned}$$

de donde

$$\theta_d = 15 \cdot \left(1 - \frac{45}{180}\right) \text{ min} = 11,25 \text{ min}$$

1.4.4 Ruidos de medida

La repetitividad estática es una medida de la consistencia del analizador en análisis independientes y repetitivos sobre el mismo material. Esta repetitividad se ve afectada por un ruido estocástico (que se aproxima como gaussiano), dando lugar al ruido de medida.

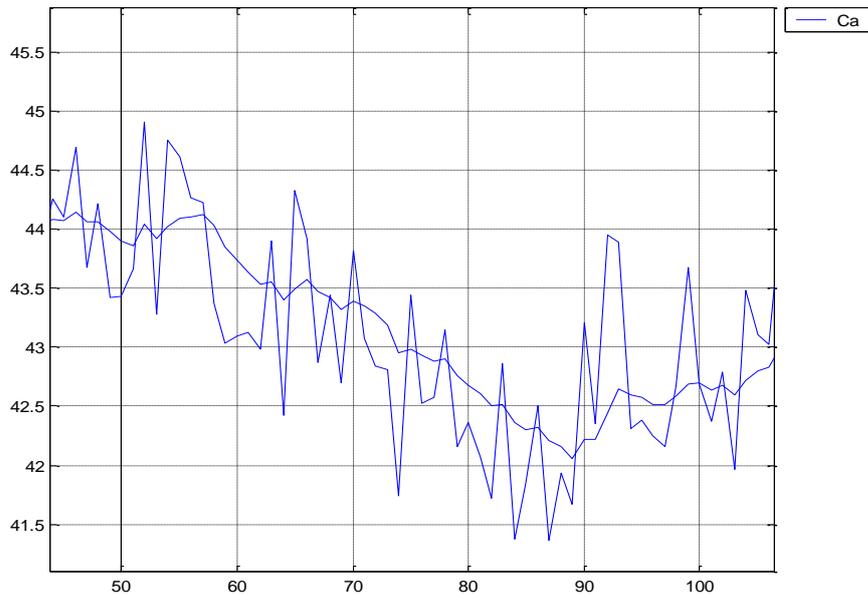


Figura 8. Valor medido y real de la composición de la mezcla

El efecto de esta falta de precisión en la medida, es que se el sistema de control recibe una medida de la composición ruidosa, tal y como se muestra en la Figura 8 para la medición del CaO. Esta falta de precisión en la medida o ruido de medida se caracteriza por la desviación estándar de una serie de análisis independientes y consecutivos de un mismo material en la zona de análisis del analizador, dependiendo dicha desviación estándar de la cantidad de datos (número de rayos gamma en el caso de sensores basados en PGNA), tal y como se muestra en la siguiente relación:

$$\sigma_m \leq \sigma_N \sqrt{\frac{N}{m}}$$

en donde m y N es el tamaño de la población para los cálculos estadísticos σ_m y σ_N , respectivamente. Por tanto, medidas más rápidas dan lugar a una repetitividad peor. Por ejemplo, una adquisición durante 1 minuto tiene un ruido de medida caracterizado por una desviación estándar que es $\sqrt{60} = 7,75$ veces mayor que la desviación estándar del ruido de medida correspondiente a una hora de adquisición (Berg, 1999), (Peña, 2008), (DeGroot, M. & Schervish, M., 2014).

Por tanto, los errores de medida de la composición del analizador se consideran como ruidos gaussianos, con una desviación estándar asociada. Las desviaciones estándar máximas garantizadas para los óxidos principales por los fabricantes de analizadores PGNAA para períodos de análisis de 1 minuto son las especificadas en la Tabla 3 (<http://www.thermoscientific.com>).

Óxido	Desviación Estándar (Cinta de 600 mm de ancho)	Desviación Estándar (Cinta de 1200 mm de ancho)
CaO	0,50 %	0,39 %
SiO ₂	0,41 %	0,22 %
Al ₂ O ₃	0,37 %	0,21 %
Fe ₂ O ₃	0,09 %	0,06 %

Tabla 3. Desviación estándar máxima de un analizador PGNAA para la medida de los óxidos principales en periodos de análisis de un minuto (<http://www.thermoscientific.com>)

1.4.5 Ruidos de proceso

Los ruidos de proceso hacen referencia a los errores de control de los controladores de caudal locales de cada uno de los alimentadores, errores que siempre están presentes debido a que en este lazos de control de caudal se suelen utilizar controladores PI, es decir, con acción proporcional e integral con respecto al error:

$$\text{Salida PID} = \text{bias} + K_p \cdot e(t) + \frac{1}{\tau_1} \int_0^t e(t) \cdot dt$$

En estos lazos de caudal se suele utilizar una baja ganancia proporcional, K_p , para reducir el efecto del ruido de la señal del caudalímetro debido al flujo turbulento. Asimismo, se emplea un tiempo integral bajo (por ejemplo, $\tau_1 = 0,1$ minutos por ciclo de control) para eliminar el error en estado estacionario tan rápido como sea posible. Aunque si se hace muy pequeño, el lazo se hace inestable, por lo que hay que llegar al ya mencionado compromiso entre rendimiento y robustez (Luyben, 1990).

Por tanto, las demandas de caudal generadas por el sistema de control de la mezcla no se aplican exactamente, sino que existe una falta de precisión en el controlador de caudal, que se puede considerar como un ruido gaussiano que se añade a la demanda. La figura 9 muestra las consignas de caudal de la caliza y el caudal de caliza realmente aplicado al proceso.

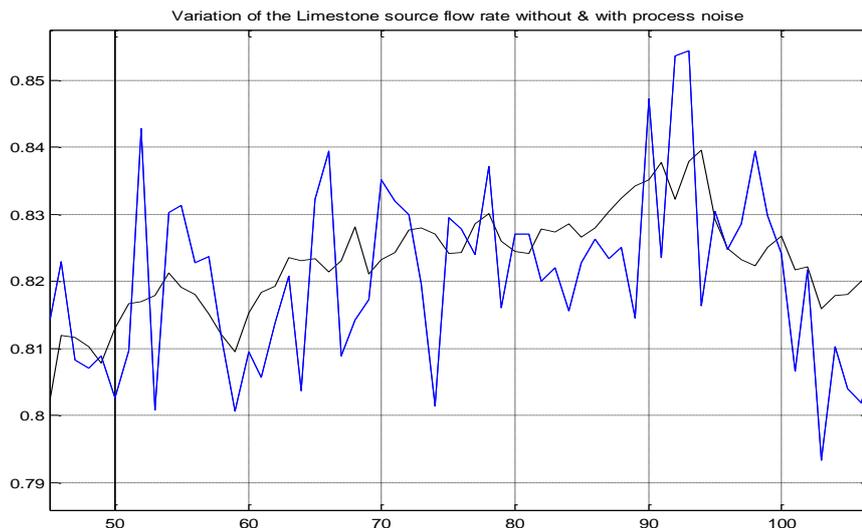


Figura 9. Consignas de caudal de caliza y caudal realmente aplicado

1.4.6 Número ilimitado de alimentadores

Como se ha podido comprobar en la sección 1.4.1 sobre el caso ideal, para el control de tres módulos de calidad, considerando que se ha de respetar un caudal total de mezcla, son 4 los alimentadores diferentes de los que se ha de disponer en planta. Sin embargo, otra característica real y frecuente de los procesos de mezcla que se encuentra en la práctica es que se dispone de más de 4 alimentadores, queriendo el cliente determinar ciertas restricciones, sobre la dosificación de algunos de ellos. Un ejemplo de esta situación lo ilustra la Figura 10, que muestra un proceso de mezcla con tres calizas, una arena, una marga, una arcilla y una pirita.

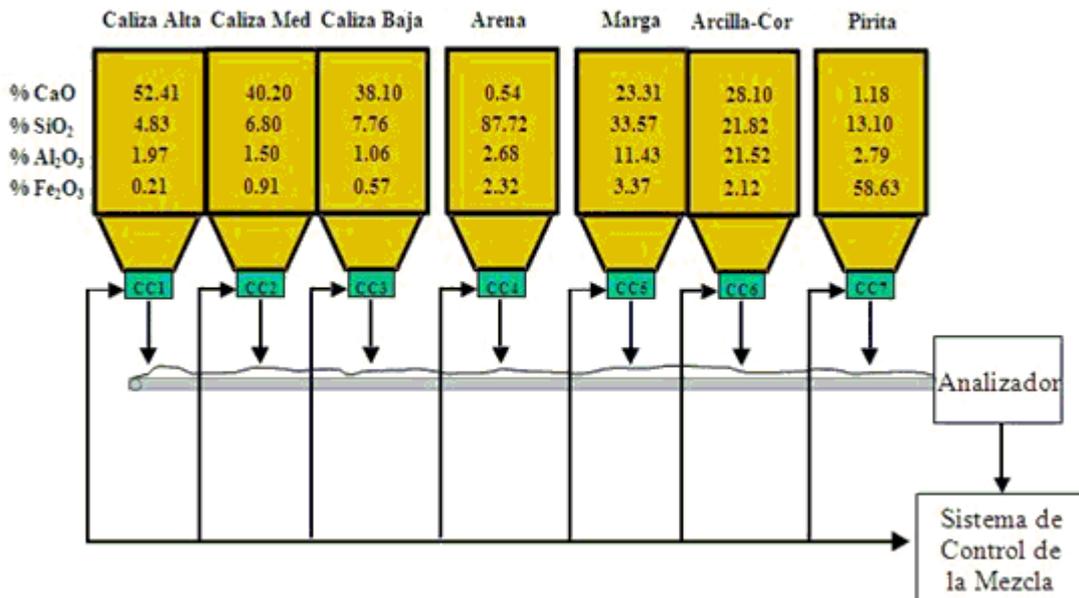


Figura 10. Proceso de mezcla con múltiples alimentadores y alimentadores correctivos

Pues bien, en esta situación es frecuente (Glorieux, Lanz, & Woodward, 1990) que de los tres tipos de calizas existentes en planta -caliza de alta pureza, caliza de media pureza y caliza de baja pureza- quede a elección del operador el fijar una proporción deseada entre los caudales de estas tres calizas. Por ejemplo, el operador puede fijar que un 10 % se suministre de la caliza de media pureza, y el resto se divida a partes iguales entre la caliza de alta pureza y la caliza de baja pureza, es decir 45% de la

caliza de media y 45% de la caliza de baja. Si esta proporción de distribución se mantuviera constante en el tiempo no representaría ninguna perturbación a los efectos de control, pero ocurre con frecuencia que la misma es cambiada a deseo por el cliente de forma instantánea, dando lugar a una fuerte perturbación de composición, similar a un fuerte salto de composición discontinuo. Por lo tanto, vemos que el sistema de control de la mezcla ha de poder considerar teóricamente número “infinito” de alimentadores.

1.4.7 Deficiencias de composición y uso de alimentadores correctivos

Siguiendo con la Figura 10, vemos que hay dos alimentadores principales de aluminio: la marga de la planta, empleada como alimentador de uso preferente, y una arcilla con mayor contenido en Al_2O_3 , económicamente más costosa, y que, por tanto, al objeto de optimizar la operación, la planta sólo desea emplear como alimentador correctivo. Es decir, es muy frecuente, sobre todo con los aportadores de aluminio provenientes de margas, que la cantidad que tengan de Al_2O_3 sea escasa. En este ejemplo, es del 11,43%.

Esta escasez de aluminio puede hacer que los módulos de calidad no se puedan mantener en las consignas deseadas. En particular, y a la luz de la Tabla 4 que muestra el LSF, SM e IM para cada alimentador, posiblemente si la planta establece un setpoint para el SM de valor 2,2 o inferior, éste no sea alcanzable con las composiciones de los alimentadores, ya que el SM que aporta la marga es de 2,26.

	Caliza Alta	Caliza Media	Caliza Baja	Arena	Marga	Arcilla Corr	Pirita
LSF	327,86	187,83	163,17	0,21	21,25	31,97	1,51
SM	2,21	2,82	4,76	17,54	2,26	0,92	0,21
IM	9,38	1,64	1,85	1,15	3,39	10,15	0,04

Tabla 4. LSF, SM e IM aportado por cada alimentador – Múltiples alimentadores

Sin embargo, en la práctica real las composiciones son desconocidas, y no hay forma a priori de saber el módulo de calidad que presenta cada alimentador. Por tanto, el sistema de control ha de ser capaz de detectar deficiencias de composición en los alimentadores para alcanzar las consignas de los módulos de calidad, y, a la vez, ha de optimizar la utilización de los llamados alimentadores correctivos, es decir, emplearlos únicamente cuando sea necesario para compensar una deficiencia en la composición de los alimentadores no correctivos. Y todo ello, y ahí estriba la gran dificultad, sin conocer la composición química de los alimentadores, lo cual es imposible de por sí, al variar ésta constantemente con el tiempo, cuando de menos de forma aleatoria.

1.4.8 Alimentadores no controlables y atascos en los alimentadores

Estas dos condiciones se pueden considerar las más ilustrativas dentro de lo se podrían llamar condiciones anormales de funcionamiento. También se podría hablar de arranque y parada de alimentadores, aunque ambas quedan subsumidas en el caso de atasco.

El supuesto de un alimentador no controlable se da en la práctica en dos casos. El primero de ellos es cuando el alimentador está muy alejado, y por tanto los retardos que presenta son muy grandes, del orden de 15 minutos o más. No en vano, en la sección 1.4.3 ya mencionamos que aproximadamente se podrían considerar 11,25 minutos como el retardo máximo que garantizaría estabilidad en el sistema de control. El segundo caso ocurre cuando el controlador de caudal no actúa y, por tanto, el caudal de uno de los alimentadores varía de forma aleatoria. En ambos supuestos, es síntoma de robustez en el sistema que éste siga obteniendo el mejor control posible, el cual consistirá en seguir manteniendo los módulos de calidad en consigna, pero adaptándose al caudal variable de la fuente incontrolable, si bien, estando limitado a las restricciones que impongan los límites físicos del resto de alimentadores controlables.

En el caso de un atasco, el caudal de un alimentador se viene a cero instantáneamente. Nuevamente, el sistema de control robusto habrá de intentar “reoptimizar” la mezcla disponiendo de un material menos, lo cual hace posible que se continúe produciendo una mezcla de composición química razonable mientras se resuelve el problema (Tokkesdal & Kemmerer, 2001).

1.4.9 Planteamiento del problema real del control de la mezcla de materiales

El problema se puede especificar, por tanto, como la determinación de la dosificación de los diferentes materiales de los alimentadores a partir de las medidas periódicas de la composición de la mezcla, de forma que los módulos de calidad de la misma se mantengan de manera precisa en sus consignas, siempre que la composición química de los distintos materiales lo permita. Y ello se ha de lograr en presencia de cambios aleatorios y discontinuos en la composición de los alimentadores, de retardos de transporte entre los alimentadores y el analizador, de un elevado nivel de ruido de medida en el analizador y de perturbaciones en los caudales de las fuentes.

De esta forma, el proceso de la mezcla de materias primas en la industria del cemento es de naturaleza compleja, y la relación dinámica entre los caudales aplicados a los distintos alimentadores y los módulos de calidad obtenidos en la composición de la mezcla, es de naturaleza multivariable, interactiva, no lineal, desconocida y variable con el tiempo.

Se trata de un problema de control desafiante y exigente (Oliveira, Amrhein & Karimi, 2011), ya que las ganancias estáticas dependen de la composición química de los materiales, la cual es desconocida y varía de forma considerable, y también son función de los setpoints de los módulos de calidad (Özsoy, Kural, Çetinkaya & Ertug.,1999), (Bittanti, Franchini, Lovera & Manigrasso, 1997). El sistema es multivariable con elevado grado de acoplamiento, los módulos de calidad son

funciones no lineales y, además, existen fuertes restricciones en cuando a los límites físicos absolutos e incrementales de los alimentadores.

1.5 Estado de la técnica

1.5.1 Sistemas de control convencional

1.5.1.1 Soluciones basadas en la realimentación negativa

Para regular cada uno de los módulos de calidad de la mezcla, el controlador multivariable convencional aplicado en la literatura comprende lazos I, PI o PID de parámetros fijos, desacoplados, que actúan sobre cada uno de los caudales de los alimentadores. En concreto, (Tsamatsoulis, 2005), propone dos lazos de control PI:

LSF - %Caliza

SM - %Arena

ajustando %Arcilla del tercer alimentador, al objeto de que la suma total de porcentajes sea 100. La figura 11 ilustra este esquema de control.

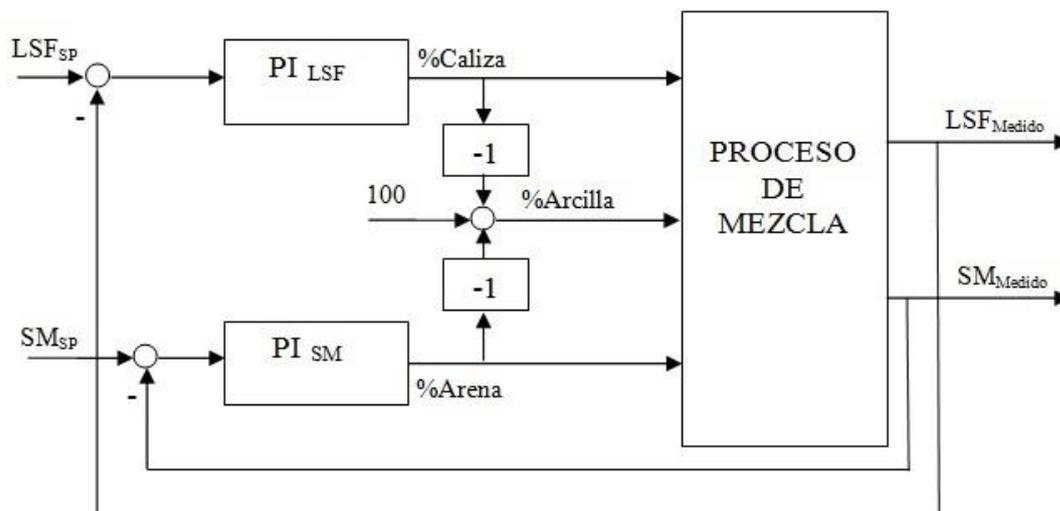


Figura 11. Control PI de la mezcla (Tsamatsoulis, 2005)

Para el ajuste de estos controladores PI se utiliza el criterio de prueba y error para la obtención de una mínima desviación estándar en los módulos de calidad medidos, y se reconoce (Tsamatsoulis, 2011) que es necesario aplicar criterios de estabilidad, ya que el sistema presenta “estabilidad condicional”, es decir, el sistema se hace inestable para valores altos y bajos de la ganancia del controlador, pero es estable en un cierto rango de ganancias intermedias.

1.5.1.2 Matriz de ganancias relativas de Bristol y Técnica de maximización de la ganancia integral

Sin embargo, debido a la gran interacción en el proceso y a que la ganancia cambia no sólo con los cambios en la composición de los alimentadores, sino también con cada cambio de setpoints en los módulos de calidad (Oliveira, Amrhein & Karimi, 2011), a partir de datos anuales de las composiciones químicas de los alimentadores y de las principales características de la mezcla considerada, se hace un modelo del proceso y se aplica el método de ganancias relativas de Bristol (Bristol, 1966) para estudiar la interacción a bajas frecuencias, y justificar el posible desacoplamiento a bajas frecuencias.

Para controlar la posible inestabilidad del sistema (Tsamatsoulis, 2014) propone una mejora adicional al control PID por medio del ajuste de los parámetros de los lazos utilizando como criterio de robustez el criterio de Máxima Sensibilidad proporcionado por la expresión

$$M_s = \text{Max}(|S(i\omega)|)$$

en donde la sensibilidad, S, se expresa a partir de las funciones de transferencia del proceso de mezcla, G_p , y del propio controlador, G_c , de la siguiente forma

$$S = \frac{1}{1 + G_c G_p}$$

De manera que la variable $1/M_s$ se puede interpretar como la menor distancia entre la curva de Nyquist en lazo abierto $G_c G_p$ y el punto crítico $(-1,0)$, como muestra la Figura 12.

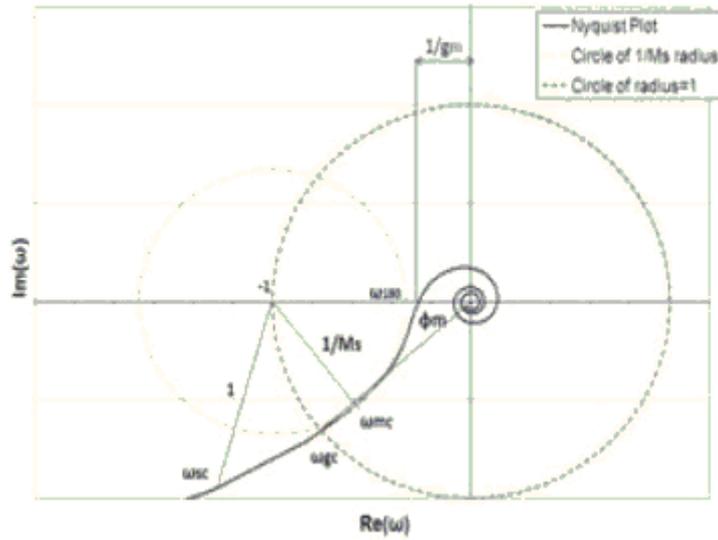


Figura 12. Máxima sensibilidad, margen de fase y frecuencias de corte (Tsamatsoulis, 2009)

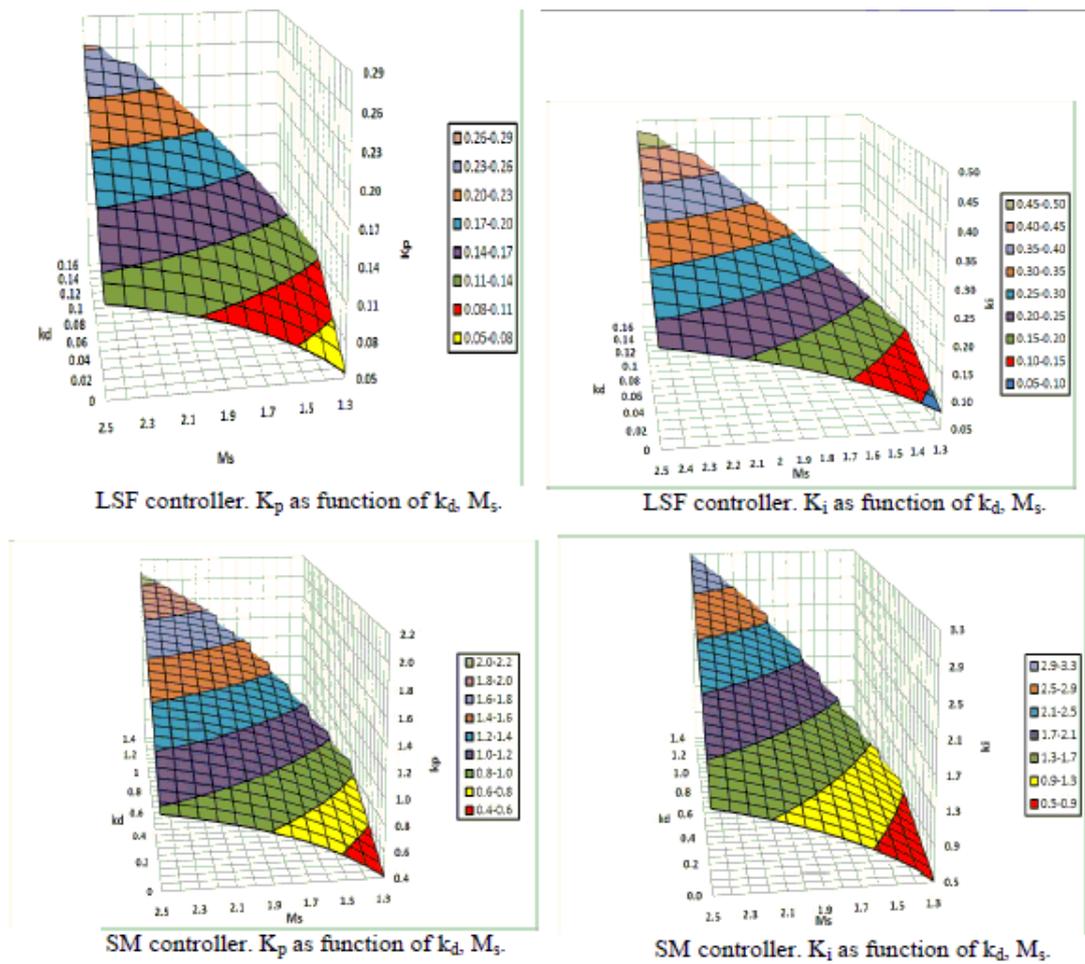


Figura 13. K_p y K_i como función de K_d , M_s para los controladores de LSF y SM (Tsamatsoulis, 2011)

Y dado este criterio, se aplica la técnica de la optimización de la ganancia integral restringida a la máxima sensibilidad, en inglés, M-constrained integral Optimization Technique, MIGO (Aström, & Hägglund, 2006), que consiste en maximizar la ganancia integral, estando restringidos a la máxima sensibilidad. Así, esta técnica fija un valor de M_s y calcula, para cada valor de M_s y cada valor de K_d , ganancia proporcional derivativa, las ganancias proporcional e integral del controlador PID, K_p y K_i , respectivamente. La Figura 13 ilustra los diferentes valores de estas constantes para los controladores PID del LSF y SM.

1.5.1.3 Soluciones que incluyen lógica difusa

Otros intentos de mejorar las limitaciones de los parámetros fijos de los controladores PID de regulación de los módulos de calidad han consistido en fijar por lógica difusa los parámetros de dicho controlador PID. Así, algunas soluciones (Bavdaz, & Kocijan, 2007), proponen 3 controladores PI para la regulación del LSF, SM e IM, cuyas ganancias proporcional e integral se fijan por medio de un controlador de lógica difusa de Takagi-Sugeno (Alwadie, Ying, & Shah, 2003), según la estructura de la Figura 14, que tiene como entradas los errores de control de los tres módulos de calidad, y como salida las ganancias proporcional e integral de cada regulador PI.

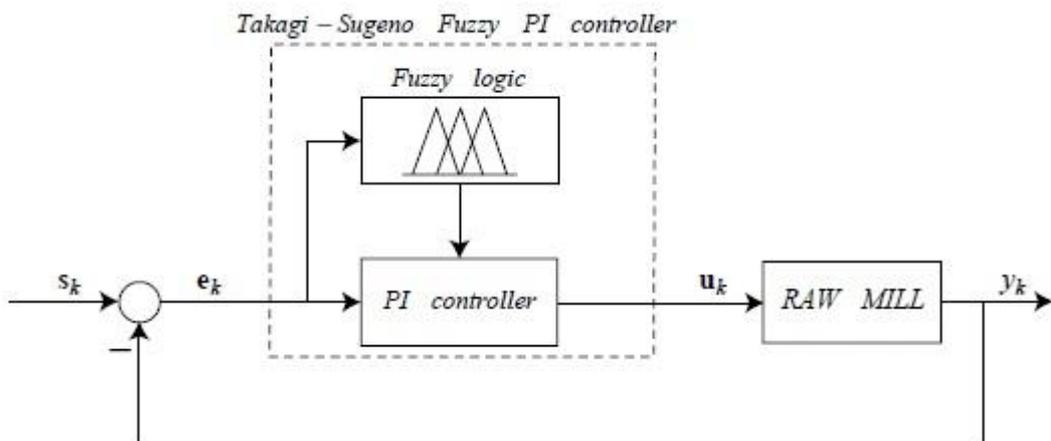
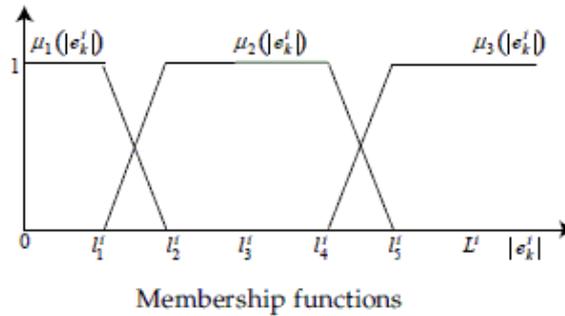


Figura 14. Controlador PI con parámetros fijados por lógica difusa para LSF, SM e IM (Bavdaz & Kocijan, 2007)

De esta forma, el error de control de cada módulo de calidad se “fusifica” de acuerdo a funciones de pertenencia trapezoidales como las de la Figura 15, existiendo un conjunto para cada módulo, es decir, $i = \text{LSF}, \text{SM}, \text{IM}$.



Break points of membership functions

Membership functions	Break points of membership functions					
	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	L
SM	0.11	0.13	0.20	0.26	0.27	0.3
IM	0.0055	0.015	0.048	0.076	0.083	0.1
LSF	0.75	1.25	1.50	2.25	2.75	3

Figura 15. Funciones de pertenencia del controlador de lógica difusa (Bavdaz & Kocijan, 2007)

Por ser de Takagi-Sugeno, la estructura del antecedente describe regiones borrosas y la del consecuente presenta funciones lineales, en este caso constantes. Por tanto, las reglas son del tipo (Bavdaz, & Kocijan, 2007):

$$\begin{aligned} \text{if } |e_k^i| = \mu_1(|e_k^i|) \text{ then } \kappa_i(|e_k^i|) &= \kappa_{i1} \\ \text{if } |e_k^i| = \mu_2(|e_k^i|) \text{ then } \kappa_i(|e_k^i|) &= \kappa_{i2} \\ \text{if } |e_k^i| = \mu_3(|e_k^i|) \text{ then } \kappa_i(|e_k^i|) &= \kappa_{i3} \end{aligned}$$

Aplicándose estas reglas para cada lazo ($i = \text{LSF}, \text{SM}, \text{IM}$) y para cada ganancia –proporcional, k_{ip} ; e integral, k_{ii}), habiendo por tanto, un total de 18 reglas. La salida del modelo se calcula como una media ponderada de la contribución de cada regla,

$$\kappa_i(e_k^i) = \frac{\sum_{j=1}^3 \kappa_{ij} \cdot \mu_j(e_k^i)}{\sum_{j=1}^3 \mu_j(e_k^i)}$$

En donde, nuevamente, $i = \text{LSF, SM, IM}$, $k_i = k_{ip}$ (proporcional) o k_{ii} (integral) y μ_j es el grado de pertenencia (función de pertenencia) a la j -ésima regla (en este caso, $j=1, \dots, 3$ porque para cada controlador y tipo de ganancia hay tres reglas). En la Figura 16 se muestran los valores resultantes para la ganancia proporcional e integral del regulador PI de cada lazo de LSF, SM e IM.

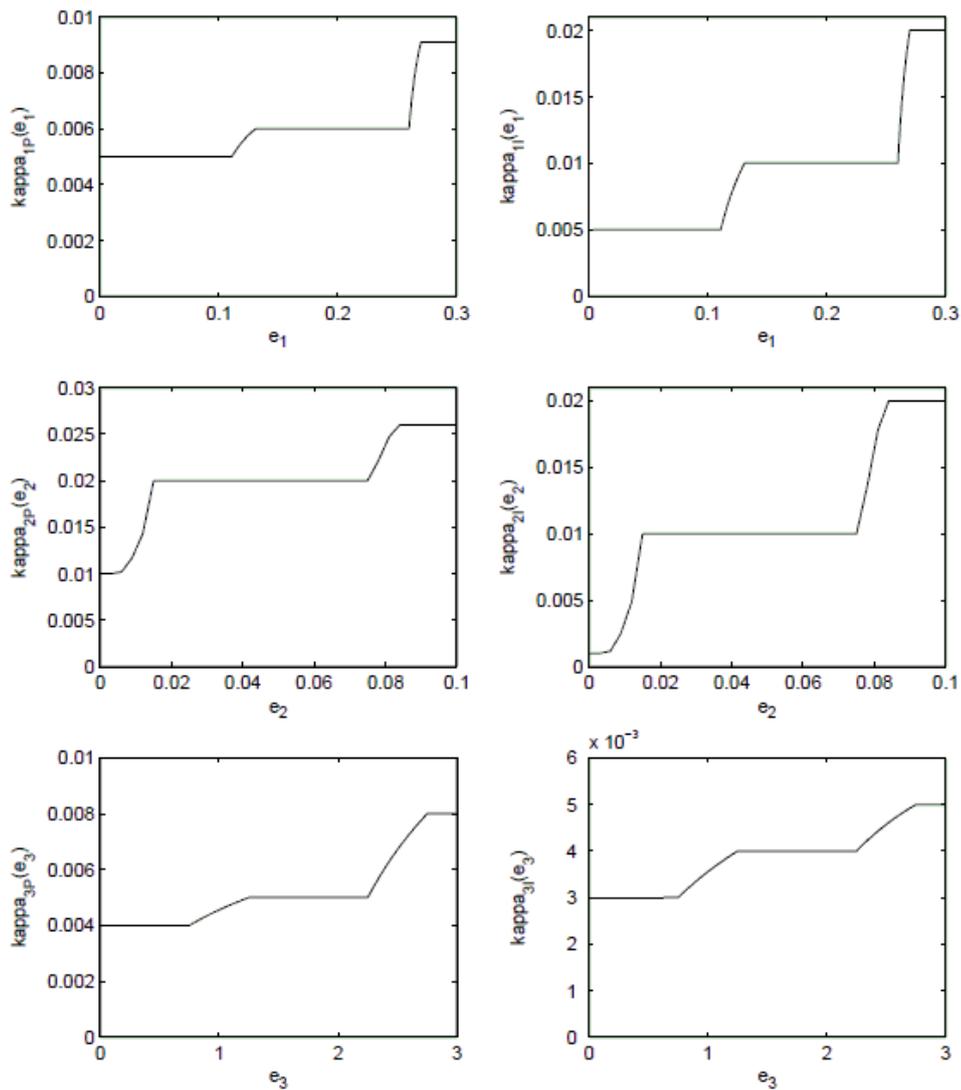


Figura 16. K_p y K_i proporcionadas por el controlador de lógica difusa (Bavdaz & Kocijan, 2007)

Asimismo, también se han utilizado otros sistemas por reglas que utilizan el conocimiento del experto humano para la generación de un conjunto de reglas que se puedan utilizar para controlar la mezcla (Xiaoping, Yun, & Yonggui, 1996),

Aun así, todas estas técnicas de control PID de la mezcla se utilizan en aplicaciones en las que la medición de la composición no es de alta frecuencia (1 minuto), si no que el período de análisis es de al menos 20 minutos. Debido a ello no pueden responder a perturbaciones de alta frecuencia y el control se ve muy limitado en su optimización.

1.5.2 Sistemas de alta frecuencia basados en la identificación de las fuentes

1.5.2.1 Estimación adaptativa de la composición de los alimentadores

En estas técnicas de control, las medidas de la composición de la mezcla, proporcionadas por el analizador, se combinan con los caudales de los alimentadores para estimar las composiciones de los materiales en los alimentadores. Utilizando esta estimación y los setpoints de los módulos de calidad de la composición de la mezcla, se calculan los nuevos caudales de los alimentadores, de forma que los valores predichos de los módulos de calidad sean tan próximos como sea posible a sus consignas.

Sin embargo, debido a errores en la estimación de la composición de los materiales en los alimentadores, los cuales serán inevitables debido a la gran variabilidad en la composición del material que cae por cada alimentador, los valores predichos en general no coinciden con los de consigna. Para compensar estos errores, se han utilizado controladores PID tradicionales o sistemas basados en reglas, de forma que a partir de las diferencias entre las medidas de los módulos de calidad y sus setpoints, se generan señales de control actuando sobre setpoints auxiliares de los módulos de calidad que son utilizados por el esquema predictivo.

En concreto, se combina una estimación adaptativa de la composición química de los alimentadores con un control predictivo de la siguiente forma (Tran y otros, 2000):

- A partir del caudal de los alimentadores y de las medidas de la composición de los óxidos realizadas por un analizador PGNAA sobre la mezcla de materiales, el estimador adaptativo ajusta cada minuto la composición química estimada en los alimentadores.
- A partir de los parámetros de los módulos de calidad medidos y de sus respectivos setpoints, y al objeto de compensar las desviaciones previas entre dichos valores, un bloque conductor de setpoints genera unos “setpoints modificados”.
- Teniendo en cuenta los límites de control, el controlador predictivo del sistema calcula los caudales requeridos de los alimentadores para minimizar la distancia entre los módulos de calidad predichos de la mezcla y los setpoints modificados.

Esta propuesta se comercializa bajo el producto software RAMOS, *Raw Mix Optimization Software*, es propiedad de la compañía Thermoscientific y está disponible de forma integral con el Analizador *CB Omni™ Online Elemental Analyzer* propiedad de la misma (CB Omni™, 2015) (Tran, Nguyen & Martín Sánchez, 2000). La Figura 17 ilustra el diagrama de bloques de este sistema.

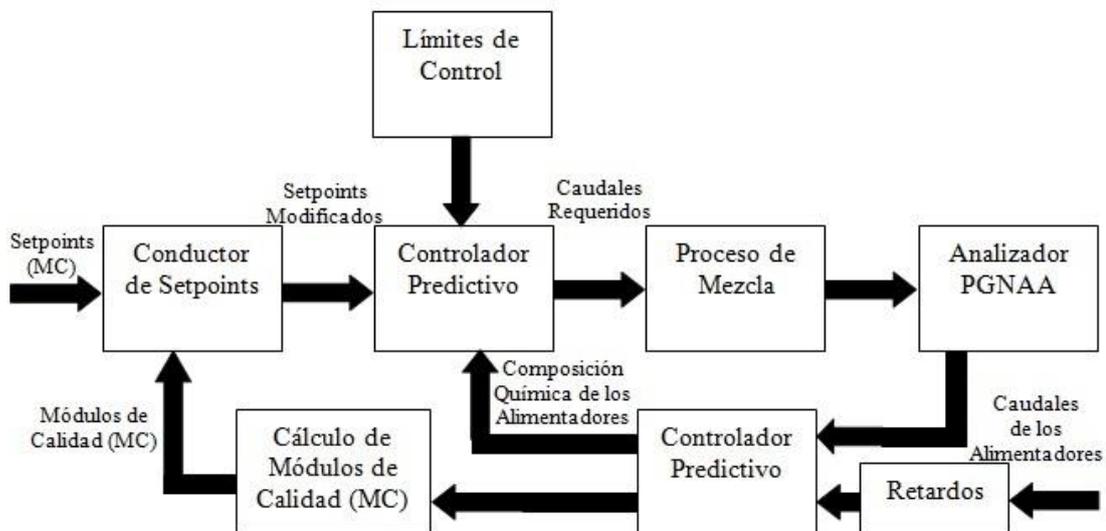


Figura 17. Diagrama de bloques de RAMOS (Tran, Nguyen & Martín Sánchez, 2000)

De forma análoga, otros sistemas ofrecen una estructura con dos lazos de control interior/exterior en donde se integra esta estimación adaptiva de la composición de las fuentes (Tokkesdal & Kemmerer, 2001). Este sistema combina algoritmos lineales y cuadráticos que implementan técnicas de control por modelo predictivo o adaptivo multivariable, estimando dinámicamente la composición química de los alimentadores.

El lazo interior proporciona rápidas respuestas de control frente a desviaciones en los módulos de calidad medidos por el analizador en línea, mientras que el lazo exterior se encarga de la estimación de la composición química de los alimentadores. Además, el lazo exterior recibe las setpoints deseados para los módulos de calidad y genera, cuando es necesario, unos nuevo setpoints modificados para los módulos de calidad, que se le pasan como consigna al lazo interior.

Este sistema se comercializa bajo el producto software *QCX/BlendExpert* y es propiedad de la compañía FLSmidth (QCX/BlendExpert, 2015). La Figura 18 ilustra la estructura compuesta de lazo interior y lazo exterior.

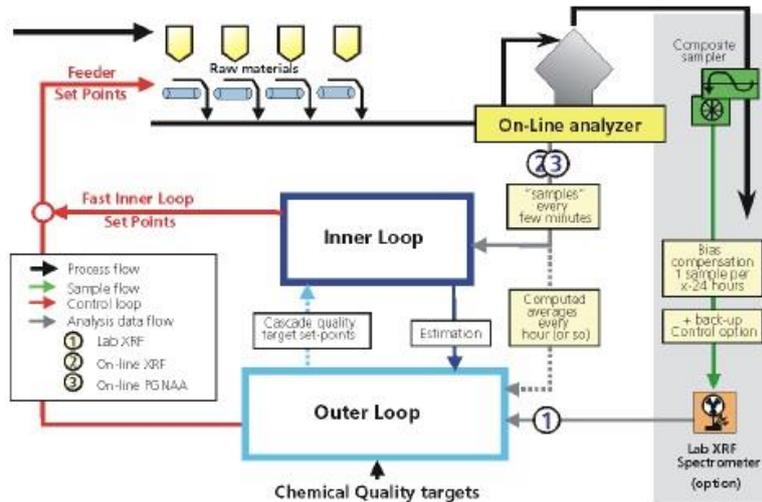


Figura 18. Estructura de lazo interior y exterior de QCX/BlendExpert (QCX/BlendExpert, 2015)

En particular, (Bányász, Kevicsky & Vajk, 2003) propone llevar a cabo la estimación de las composiciones en el instante $t+1$ de acuerdo a la siguiente expresión matricial

$$\mathbf{c}^j(t+1) = \mathbf{c}^j(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{r}(t)[ox_{out}^j(t) - \mathbf{r}^T(t) \cdot \mathbf{c}^j(t)]$$

en donde

- $\mathbf{c}^j(t)$ es un vector columna que contiene las estimaciones del contenido en óxido j en cada uno de los n alimentadores en el instante t ;
- $\mathbf{r}(t)$ es un vector columna que contiene el caudal aplicado a cada uno de los n alimentadores en tanto por uno en el instante t ;
- $ox_{out}^j(t)$ es el valor medido por el analizador para el óxido j en el instante t ;
- $\mathbf{P}(t)$ es la matriz de pesos, cuya elección determina el proceso de estimación.

Se propone que los elementos de la diagonal de la matriz de pesos $\mathbf{P}(t)$ se escojan de forma directamente proporcional a la variación esperada del óxido en el alimentador correspondiente. De esta forma, si la concentración de un óxido en un alimentador es conocida y no cambia (suposición que, por otro lado, nunca será cierta de forma completa debido a la variación aleatoria de las composiciones a que hemos hecho referencia), el elemento diagonal de la matriz de pesos correspondiente a este óxido se puede fijar a cero.

1.5.2.2 Descomposición en valores simples

Supuesta conocida o estimada la composición de los alimentadores, una forma de obtener las consignas de caudal para los mismos es aplicar el método de descomposición en valores simples (Swain, 1995). Si se pretende controlar LSF, SM e IM, disponiendo de 4 alimentadores y “conocida” la composición en cada instante, se puede escribir:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial LSF}{\partial W_1} & \frac{\partial LSF}{\partial W_2} & \frac{\partial LSF}{\partial W_3} & \frac{\partial LSF}{\partial W_4} \\ \frac{\partial SM}{\partial W_1} & \frac{\partial SM}{\partial W_2} & \frac{\partial SM}{\partial W_3} & \frac{\partial SM}{\partial W_4} \\ \frac{\partial IM}{\partial W_1} & \frac{\partial IM}{\partial W_2} & \frac{\partial IM}{\partial W_3} & \frac{\partial IM}{\partial W_4} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dW_1 \\ dW_2 \\ dW_3 \\ dW_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dLSF' \\ dSM' \\ dIM' \\ 0 \end{bmatrix}$$

en donde

- W_i es el caudal en tanto por uno del alimentador i ;
- $dLSF' = LSF_{ISP} - LSF_{Medido}$, siendo LSF_{ISP} un setpoint intermedio para el LSF, generado por un controlador PID de acuerdo a

$$LSF_{ISP} = LSF_{SP} + \Delta LSF_{SP}$$

$$\Delta LSF_{SP} = a \cdot e_n + b \cdot (e_n - e_{n-1}) + c \cdot \left(\sum_i e_i \cdot \frac{Q_T}{\sum_i Q_i} \right)$$

en donde, a su vez,

- a , b y c son los parámetros constantes del PID;
- e_n es el error en el n -ésimo instante de tiempo, es decir, $LSF_{SP} - LSF_{Medido}$;
- Q_T es el caudal total analizado durante todo el período de análisis.

Además, se han de respetar los límites incrementales de cambio de caudal en cada alimentador, es decir,

$$LL_i \leq dW_i \leq HL_i$$

Si al resolver el sistema matricial anterior, uno de los valores dW_i queda fuera del rango permisible establecido, a este caudal se le aplica dicho límite incremental,

dando lugar por tanto, a un sistema sobredeterminado de cuatro ecuaciones con tres incógnitas, siendo la metodología de descomposición en valores simples una forma de resolverlo (Klema & Laub, 1980). Un caso similar surge si para un alimentador se excediera su límite absoluto superior.

1.5.2.3 Módulos de calidad en rangos y prioridades

En caso de que no exista solución para el sistema de ecuaciones anterior, otras técnicas consideran algunos módulos de calidad en un rango, y no necesariamente en consigna. De esta forma se generan conjuntos de módulos de calidad a obtener, cada uno con una prioridad (Tokkesdal & Kemmerer, 2001). La Figura 19 ilustra un ejemplo este esquema de prioridades (QCX/BlendExpert, 2015).

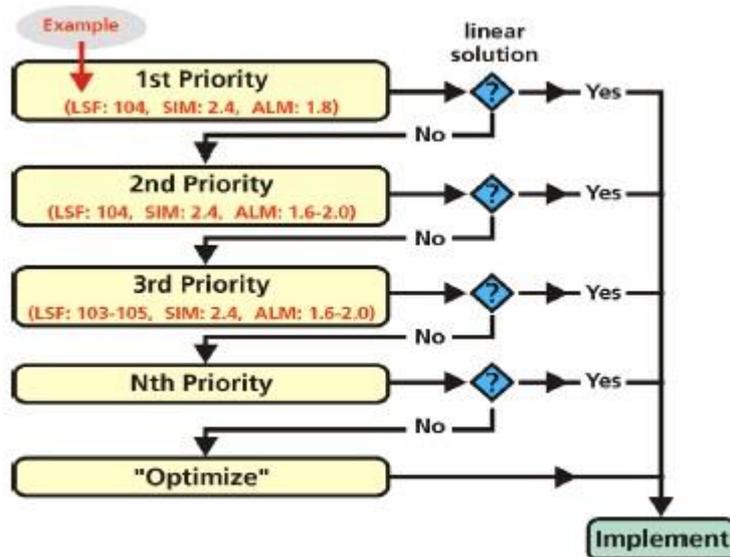


Figura 19. Esquema de prioridades para los módulos de calidad (QCX/BlendExpert, 2015)

Además, cuando uno de los módulos de calidad está definido en rangos, se aplican cambios incrementales respecto al valor de setpoint deseado en dicho módulo de calidad definido en rangos, de acuerdo a un porcentaje de cambio para la búsqueda. Y este proceso se repite hasta encontrar un sistema lineal con solución. Un ejemplo de estas consignas de módulos de calidad en rangos se halla en la Tabla 5 (Patterson, 1998).

	Setpoint	Mínimo	Máximo	Tipo
C3S	70	70	70	En consigna
SM	2.5	2.35	2.65	En rango
IM	1.5	1.4	1.6	En consigna
Porcentaje de cambio para la búsqueda: 5.0				

Tabla 5. Setpoints de módulos de calidad en consigna y en rango (Patterson, 1998)

En este ejemplo, se intenta resolver el sistema para LSF e IM en consigna, y para SM en consigna también (2,5) inicialmente. Si no hay solución, como el porcentaje de cambio es del 5%, se prueba con

$$SM_{SP'} = 2.5 + (2.5 \cdot 0.05) = 2.5 + 0.015 = 2.515$$

Si no hay solución tampoco, se prueba con el mismo salto incremental, pero en sentido decreciente:

$$SM_{SP''} = 2.5 - 0.015 = 2.485$$

Y se continúan alternando estos saltos incrementales de forma iterativa hasta que se encuentre una solución.

1.5.3 Análisis crítico

Los sistemas de control convencional que emplean realimentación negativa que hemos analizado están basados en el estándar de control PID, el cual genera la señal de control reaccionando al error o desviación producida entre el valor actual de la variable a controlar y su valor deseado. Este principio de reaccionar al error carece de capacidad de adelantarse o predecir posibles desviaciones y conlleva una problemática de estabilidad que condiciona el rendimiento del sistema que lo utiliza en cualquier proceso industrial (Ogata, 1995) y en particular, en la aplicación al control del proceso de mezcla, como ya hemos mencionado (Tsamatsoulis, 2011). Además, para la corrección se emplean parámetros constantes k_p , k_d y k_i , lo cual

está claramente en contra de la naturaleza cambiante del proceso. Para evitar inestabilidades en el sistema, los valores que se le asignan a estas constantes son conservadores, al objeto de que las acciones de control, es decir, las correcciones, sean moderadas. Esto lo incapacita para responder adecuadamente a perturbaciones de alta frecuencia, ya que la agresividad requerida para dichas acciones de control queda así limitada.

Aun estableciendo sistemas que cambian automáticamente el valor de dichas constantes (Tsamatsoulis, D., 2014), (Bavdaz, G. & Kocijan, J., 2007), (Oliveira, Amrhein & Karimi, 2011), dando lugar a un *Gain Scheduling*, se obtienen sólo soluciones limitadas debido a la gran variabilidad del proceso de mezcla.

Asimismo, tanto las técnicas de control de parámetros fijos como las de parámetros variables analizadas con anterioridad, han considerado una modelización del proceso en un caso particular, de manera que se ha diseñado el sistema de control a partir de un modelo más o menos preciso del comportamiento causa-efecto de la planta, y, entre otros supuestos, se han dado por conocidas las composiciones químicas de los alimentadores, lo cual nunca se puede considerar cierto de forma completa. La debilidad de esta concepción radica en la dificultad de encontrar un modelo completamente fiable, y esto hace que cuando el comportamiento real de la planta se aleja de dicho modelo, el sistema de control así diseñado pueda introducir inestabilidad, oscilaciones y deteriorar en gran medida su rendimiento.

Con respecto a las técnicas de control de alta frecuencia existentes, podemos decir que presentan deficiencias en tres puntos críticos, señalados en rojo en la Figura 20.

En primer lugar, la estimación de la composición química de las fuentes es aceptable sólo en ocasiones. Y aun siendo aceptable una estimación inicial en algunos momentos, al cabo de unos pocos ciclos de control la probabilidad de que dicha estimación se desvirtúe totalmente es alta, afectando negativamente al control y requiriendo de nuevo reajuste.

Además, como la comprobación de que el sistema lineal es resoluble (QCX/BlendExpert, 2015), (Patterson, 1998), (Swain, 1995) se efectúa en base a

unas composiciones estimadas que pueden ser erróneas, se pueden estar dejando de conseguir unos setpoints de módulos de calidad alcanzables o posibles, simplemente porque las estimaciones son incorrectas. Es decir, la “flexibilidad” u optimización del esquema de prioridades se desvirtúa totalmente al poder ocurrir perfectamente que se deje de fabricar un tipo concreto de cemento, debido a que el mecanismo para la detección de “qué es alcanzable” y “qué no es alcanzable” se asienta sobre bases inciertas en gran medida: la estimación de la composición de los alimentadores, que

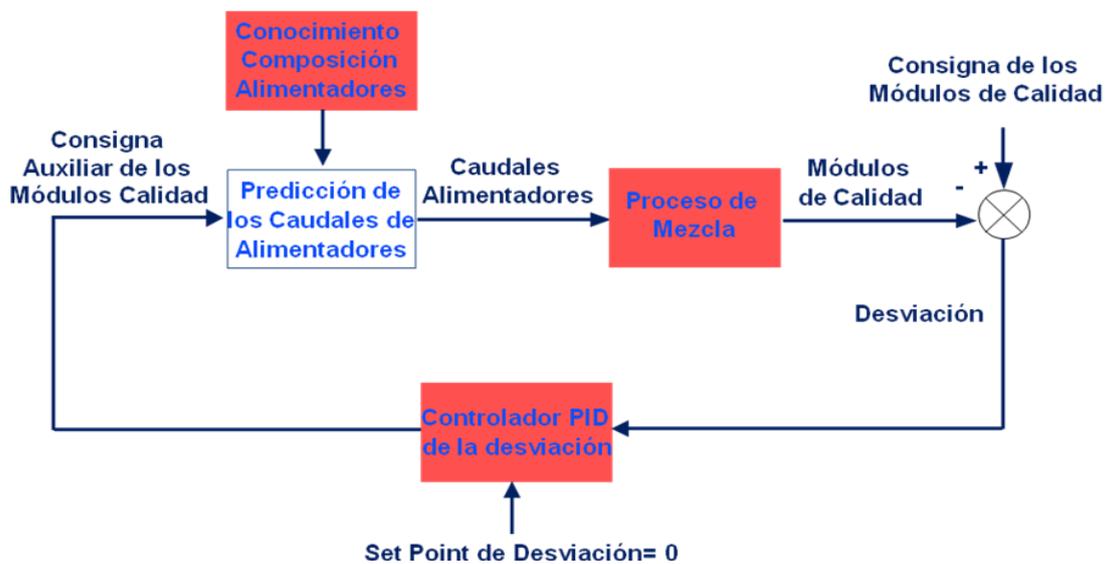


Figura 20. Operación de un sistema de control que requiere el conocimiento preciso de las composiciones de los alimentadores.

aparece reflejada en los coeficientes del sistema lineal a resolver.

Esto lleva a una segunda implicación contraria a la optimización que se persigue en la utilización de los alimentadores correctivos. Para utilizarlos, como se ha mencionado en la sección 1.4.7, primeramente se debe haber detectado una deficiencia de composición en algún alimentador y, como vemos, esta detección puede ser igualmente errónea al basarse en una estimación incorrecta. Por tanto, puede que erróneamente se detecte una falta de composición en un alimentador, y que también erróneamente, y de forma no optimizada, se utilice en consecuencia un alimentador correctivo. Asimismo, la información que se pudiera proporcionar al

usuario del sistema sobre posibles nuevos materiales a adquirir en función de las necesidades existentes para alcanzar unos setpoints determinados de los módulos de calidad, queda deteriorada en gran medida por el riesgo de confusión a que da lugar el fundamentar el sistema en la estimación de las composiciones de los alimentadores.

En segundo lugar, la naturaleza multivariable, interactiva, no lineal, desconocida y variable con el tiempo del proceso de mezcla, hace que los posibles fallos en la estimación de las composiciones multipliquen su efecto negativo sobre el control del proceso. Además, son frecuentes los períodos de retardo en el proceso de mezcla, lo cual aumentaría aún más el efecto dañino de una mala estimación.

Y en tercer lugar, el empleo de un controlador PID para compensar la desviación constituye una solución precaria debido a las limitaciones inherentes al control PID ya mencionadas. Es decir, el PID responde solamente al error o desviación producida, por lo que carece de capacidad de adelantarse o predecir posibles desviaciones. Además, para dicha corrección emplea parámetros constantes –las constantes proporcional, integral y derivativa–, lo cual está claramente en contra de la naturaleza cambiante del proceso. Aun estableciendo sistemas de reglas que cambiaran automáticamente el valor de dichas constantes, éstas sólo serían soluciones limitadas debido a la gran variabilidad del proceso de mezcla.

1.6 Motivación y objetivos de la Tesis

Por lo general, los sistemas de control del proceso de mezcla de materiales han tenido siempre la problemática de enfrentarse a una dinámica multivariable, interactiva, no lineal, desconocida y variable con el tiempo, tal y como se ha especificado en las secciones anteriores, que tiene su origen fundamentalmente en las composiciones químicas desconocidas y variables con el tiempo de los alimentadores. A esta complejidad, se añade la presencia de retardos, ruidos medida y de proceso, que hacen del control de la mezcla de materiales un auténtico desafío (Oliveira, Amrhein & Karimi, 2011).

Las soluciones aplicadas industrialmente hasta ahora tratan de acotar parcialmente el problema de la dinámica variable en el tiempo partiendo de una identificación de las composiciones de los alimentadores presentes en el proceso de mezcla, lo cual presenta los inconvenientes analizados en la sección anterior, si bien, la ausencia de una alternativa fiable y sencilla de implementar, ayuda a que ésta sea la metodología aplicada mayoritariamente. Por tanto, sigue existiendo la necesidad de un sistema y un método para controlar de forma plenamente satisfactoria la dosificación de los alimentadores en el proceso de mezcla.

Pues bien, la motivación y objetivos de la presente tesis es el desarrollo de un sistema y método para el control de la mezcla de materias primas que supere los problemas de las técnicas previas de alta frecuencia y que obtenga un control preciso y estable de los módulos de calidad de la mezcla sin necesidad de un conocimiento preciso de la composición de las materias primas, ni de su variación con el tiempo, y en presencia de ruidos de proceso, ruidos de medida y retardos, sin requerir ningún ajuste manual. Además, el sistema y método ha de ser capaz de aplicarse a procesos de mezcla con un número ilimitado de alimentadores, detectar las posibles deficiencias en las composiciones de los alimentadores y utilizar alimentadores correctivos, si están disponibles, únicamente en la medida que sean necesarios para compensar dichas deficiencias, optimizando de esta forma la utilización de las materias primas, tal y como demanda la industria (Olsen, Goli, Faulkner & McKane, 2010).

El sistema y método sólo ha de requerir un conocimiento aproximado que permita catalogar al alimentador como suministrador de uno de los compuestos que se consideran en el cálculo de los módulos de calidad (en el caso del cemento, Ca, Si, Al o Fe). Es decir, el sistema sólo requerirá la siguiente información:

- el objetivo de control que se quiere conseguir,
- la medida de la composición de la mezcla, generada cada período de análisis por el analizador en línea,

- la medida de los caudales de los alimentadores, y,
- el retardo, en segundos, de cada alimentador al analizador.

De esta forma, el sistema establece una relación dinámica causa-efecto entre las variables de salida del proceso, que son los módulos de calidad a controlar, y las variables de entrada del mismo, definidas de acuerdo a una estrategia de control. Esta relación puede ser identificada por medio de un modelo variable con el tiempo, ajustado en tiempo real por un mecanismo de adaptación. Y esta solución ha de estar probada y validada por la práctica industrial. Es por ello que el sistema aplica control adaptativo predictivo experto ADEX (Martín-Sánchez, J.M., 2000) y la operación del proceso es optimizada. En concreto, se establece un lazo de control ADEX para cada uno de los módulos de calidad en la mezcla a controlar.

Por tanto, el sistema y método objeto de la presente Tesis se define como un Sistema de Control Optimizado Adaptativo, ya que se define por una estrategia de control en la que se insertan los controladores adaptativos optimizados, capaces de resolver el problema de estabilización dinámica de la planta, proporcionando un rendimiento optimizado a la misma.

El control optimizado adaptativo tiene una formulación de carácter genérico, y a diferencia de otras técnicas como los controladores PID, no reacciona al error ya producido, sino que es capaz de anticiparse al mismo, prediciendo la evolución de las variables bajo control y aplicando la acción de control que guía dicha evolución en la forma deseada. Asimismo, posee la capacidad de identificar en tiempo real la relación causa-efecto el proceso mediante un mecanismo de adaptación de los parámetros del modelo predictivo, garantizando la rápida convergencia de los errores de predicción hacia cero.

La tecnología ADEX se utiliza ampliamente en diferentes aplicaciones industriales de gran complejidad en su control, si bien es nueva la aplicación al control de la mezcla de materiales.

1.7 Estructura

Tras presentar el planteamiento del problema, el estado de la técnica y la motivación y objetivos de la Tesis a lo largo de este Capítulo 1, en el Capítulo 2 se introduce el control optimizado adaptativo y el control adaptativo predictivo experto (ADEX).

En los Capítulos 3, 4 y 5 se detalla el trabajo llevado a cabo durante el diseño y desarrollo del sistema y método propuesto. En concreto, en el Capítulo 3 se describe el diseño de la estrategia de control optimizado de procesos de mezcla que, junto con los controladores ADEX, permite un control optimizado de la mezcla de materiales. Para ello se parte de una aproximación intuitiva y conceptual a la solución del problema, se formalizan los conceptos mediante la definición de la fuente de módulo y la fuente de compuesto y se derivan las etapas de la estrategia de control que da solución al problema. En una segunda parte de este capítulo se muestra la aplicación de este sistema a la industria del cemento. En el Capítulo 4 se especifica la implementación de la aplicación de este sistema a la industria del cemento, que da lugar al *Mix Adex Controller*, detallando la interfaz que ofrece para comunicación y la configuración de sus variables fundamentales de funcionamiento. En el Capítulo 5 se describen las características del entorno de simulación desarrollado, *Mix Process Simulator*, el cual ha permitido validar en simulación las capacidades del *Mix Adex Controller*.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados obtenidos en simulación para una amplia serie de casos de validación y en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y los posibles desarrollos futuros.

Capítulo 2

SISTEMAS DE CONTROL OPTIMIZADO ADAPTATIVO

2.1. Introducción

En este capítulo se introduce el control optimizado adaptativo. En primer lugar, se describe el control predictivo y la necesidad de un mecanismo de adaptación cuando se requiere la implementación en la práctica. En segundo lugar, se desarrolla la formulación básica del control adaptativo predictivo, y se describe brevemente la estrategia extendida de control predictivo. A continuación, se describe el control optimizado adaptativo, explicando cómo el control AP sienta las bases de esta familia de controladores. Se describen también los sistemas y estrategias de control optimizado de procesos, y los sistemas de control optimizado adaptativo. Por último, se describen los controladores y los sistemas de control adaptativo predictivo experto, como parte del control optimizado adaptativo, siendo estos últimos los utilizados en el Sistema de Control de la Mezcla desarrollado.

2.2. Control predictivo y necesidad de adaptación

La metodología de control predictivo fue introducida en la tesis doctoral (Martín-Sánchez, 1974). Posteriormente, se formalizó el principio básico de la metodología en la patente USA (Martín-Sánchez, 1976). Este principio podría ser expresado de la siguiente forma: “Partiendo de un modelo de planta, el control predictivo es el que hace que la salida de planta sea igual a la salida deseada de la misma, convenientemente elegida con anterioridad”.

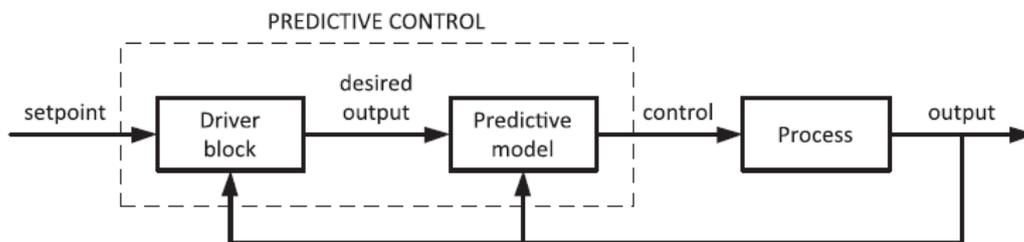


Figura 21. Configuración general de los controladores predictivos

esta estrategia de control predictivo puede ser implementada a través de un modelo predictivo (*Predictive Model*) y un bloque conductor (*Driver Block*), como se presenta en la figura anterior.

El modelo predictivo es utilizado para generar las acciones de control que hacen que la salida predicha de planta sea igual a la salida deseada, siendo esta última generada por el *Driver Block*.

El *Driver Block* calcula la trayectoria deseada de la salida de planta, partiendo de los valores actuales y anteriores de la misma en cada instante de control, hasta converger con el setpoint, siguiendo una trayectoria deseada elegida previamente. Esta trayectoria, obtenida en cada instante de control, es denominada trayectoria deseada proyectada (*Projected Desired Trajectory, PDT*).

A partir de la operación del *Driver Block* descrito previamente, se obtiene el concepto de trayectoria deseada conductora (*Driving Desired Trajectory, DDT*). Esta es generada a partir de los primeros valores de cada una de las trayectorias generadas proyectadas en cada uno de los instantes de control. Entonces, la DDT es generada punto por punto en tiempo real, y a partir de sus valores, la acción de control será calculada de acuerdo al principio de control predictivo. Consecuentemente, esta trayectoria es la que tiene que guiar la salida del proceso al setpoint de la forma deseada.

El hecho de que la DDT fuera redefinida en cada instante de control desde los valores actuales de la salida de planta, fue un factor clave para obtener resultados satisfactorios en muchas áreas industriales, debido a que esto ayudó a la DDT a generar trayectorias físicamente realizables. El concepto de realizabilidad física de la DDT es de gran relevancia teórica y práctica y podría ser definido como sigue: “se dice que la DDT es físicamente realizable si, en cualquier instante de control, puede ser llevada a cabo a través de una secuencia de acciones de control acotadas”.

El concepto de *Driver Block* presentado en (Martín-Sánchez J. M., 1976) es diferente a otros conceptos como el MRAS (Landau, 1973), donde la salida de referencia del

modelo era generada a partir de las salidas del modelo de referencia anteriores, sin tener en cuenta la evolución posterior de la salida de planta.

La formulación original de control predictivo consideraba solamente un solo paso en la predicción para el cálculo de la acción de control, y el diseño del Driver Block no utilizaba la información disponible en el modelo predictivo de la evolución de las variables bajo control. Esta forma de aplicar el control predictivo es conocido como “estrategia básica de control predictivo”. Aunque esta forma de implementación ha tenido resultados satisfactorios en el contexto de control adaptativo, tiene importantes limitaciones, ya que seguir una trayectoria deseada puede requerir una acción de control ilimitada, dependiendo de la naturaleza dinámica del proceso; en concreto, esto puede ocurrir en los procesos con inverso inestable.

Por lo general, no es razonable esperar un excelente rendimiento del control predictivo en un contexto real, principalmente debido a las limitaciones del conocimiento de planta y a su variabilidad dinámica. Obviamente, cuando las predicciones no son satisfactorias debido a parámetros del modelo predictivo no ajustados, sería conveniente disponer de un mecanismo de adaptación capaz de ajustar los parámetros del modelo predictivo con el fin de reducir el error de predicción hacia cero.

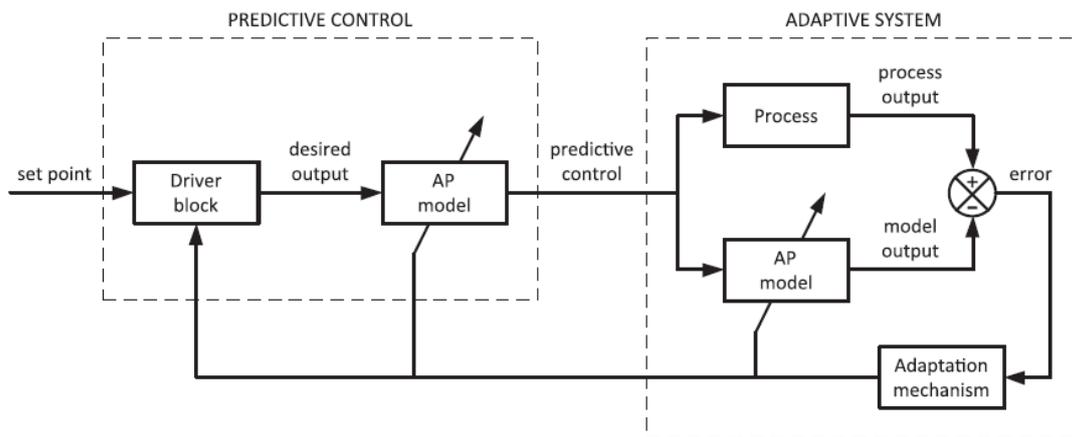


Figura 22. Configuración general de los controladores adaptativos-predictivos

En consecuencia, el control predictivo fue ya introducido en el contexto de control adaptativo predictivo APC (Martín-Sánchez, 1974; Martín-Sánchez., 1976), mediante la combinación del sistema de control predictivo con un mecanismo de adaptación, tal y como se presenta en la Figura 22. Puede observarse que la parte derecha de la figura representa un sistema adaptativo similar al utilizado para identificación de procesos en un contexto MRAS.

El conocimiento adquirido en el sistema adaptativo de la dinámica de planta debería ser inmediatamente utilizado para la predicción en el esquema predictivo, por lo que el modelo utilizado es en ambos casos debe ser el mismo: el modelo adaptativo-predictivo (AP). De esta manera, el modelo AP, con una estructura en serie-paralelo, tiene las siguientes funciones:

- a) En el sistema adaptativo, el modelo AP recibe la misma señal de entrada que la planta y genera la salida del modelo, que comparada con la salida de planta, permite al mecanismo de adaptación ajustar sus parámetros con el fin de reducir el error de predicción, y
- b) En la parte predictiva del esquema, el modelo AP calcula la señal de control a partir de la salida generada por el *Driver Block*. Este cálculo, llevado a cabo de acuerdo al principio de control predictivo, hace la salida deseada igual a la salida predicha.

Consecuentemente, cuando el mecanismo de adaptación hace tender la diferencia entre la salida de planta y la salida del modelo a cero, la diferencia entre la salida de planta y la salida deseada también tiende a cero. De este modo, la estabilidad global del APC puede ser alcanzada bajo un diseño apropiado del *Driver Block*.

2.3. Formulación básica del control adaptativo predictivo

La dinámica de una planta genérica considerada en la figura anterior puede ser descrita por la ecuación en diferencias MIMO de la forma:

$$y(k) = \sum_{i=1}^h a_i(k) y(k-i-r) + \sum_{i=1}^f b_i(k) u(k-i-r) + \sum_{i=1}^g c_i(k) w(k-i-r) + \Delta(k) \quad (Ec.2.1)$$

donde $y(k-i-r)$, $u(k-i-r)$ y $w(k-i-r)$ son, respectivamente, los vectores de incrementos de la salida de planta, la señal de control y las perturbaciones, respecto a los valores en régimen permanente. $a_i(k)$, $b_i(k)$ y $c_i(k)$ son las matrices de parámetros, que pueden ser variables en el tiempo, y que caracterizan la dinámica de planta. $\Delta(k)$ representa un vector de perturbaciones no medibles, y r representa los retardos puros de la acción de control.

El modelo AP utilizado en el sistema adaptativo de la figura anterior calcula la estimación a priori de la salida de planta mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{y}(k | k-1) = \sum_{i=1}^h \hat{a}_i(k-1) y(k-i-r) + \sum_{i=1}^f \hat{b}_i(k-1) u(k-i-r) + \sum_{i=1}^g \hat{c}_i(k-1) w(k-i-r) \quad (Ec.2.2)$$

El mecanismo de adaptación utiliza el error de estimación a priori, $y(k) - \hat{y}(k | k-1)$, para ajustar las matrices del modelo AP: $\hat{a}_i(k)$, $\hat{b}_i(k)$ y $\hat{c}_i(k)$, en cada instante de control k .

El modelo AP previamente considerado es también utilizado para predecir, en el instante k , la salida de planta para el instante $k+1+r$:

$$\hat{y}(k+1+r | k) = \sum_{i=1}^h \hat{a}_i(k) y(k-i+1) + \sum_{i=1}^f \hat{b}_i(k) u(k-i+1) + \sum_{i=1}^g \hat{c}_i(k) w(k-i+1) \quad (Ec.2.3)$$

A partir de la mencionada predicción, la estrategia básica de control predictivo calcula el vector de control que hace la salida predicha $\hat{y}(k+1+r | k)$ igual a la salida deseada $y_d(k+1+r | k)$ mediante:

$$u(k) = \hat{b}_1(k)^{-1} \left[y_d(k+r+1) - \sum_{i=1}^h \hat{a}_i(k) y(k-i+1) - \sum_{i=2}^f \hat{b}_i(k) u(k-i+1) + \sum_{i=1}^g \hat{c}_i(k) w(k-i+1) \right] \quad (Ec.2.4)$$

donde la salida deseada $y_d(k+1+r)$ es calculada por el Driver Block al instante k como sigue:

$$y_d(k+1+r) = \sum_{i=1}^f f_i(k) y(k-i+1) + \sum_{i=1}^g g_i(k) ysp(k-i+1) \quad (Ec.2.5)$$

donde $ysp(k-i+1)$ es el valor del setpoint en el instante $(k-i+1)$, y las matrices f_i y g_i son elegidas teniendo en cuenta la dinámica deseada.

La implementación básica del APC presentado en (Martín-Sánchez, 1976) y previamente considerado, fue descrita con un particular énfasis en (Martín-Sánchez & Shah, 1984), donde se presentaba la aplicación exitosa de la metodología al control multivariable de una columna de destilación.

El diagrama de la Figura 22 puede ser simplificado al mostrado en la Figura 23. La descripción funcional de los bloques de este diagrama puede ser resumida como sigue:

- a) El Driver Block: genera la DDT que guiará la salida de planta al setpoint con una trayectoria deseada.
- b) El Modelo Predictivo: calcula la acción de control que asegura que la salida del proceso predicha sigue la trayectoria deseada generada por el Driver Block.
- c) El mecanismo de adaptación: ajusta los parámetros del modelo predictivo a partir del error de predicción con el fin de hacer tender esos errores a cero de forma eficiente.

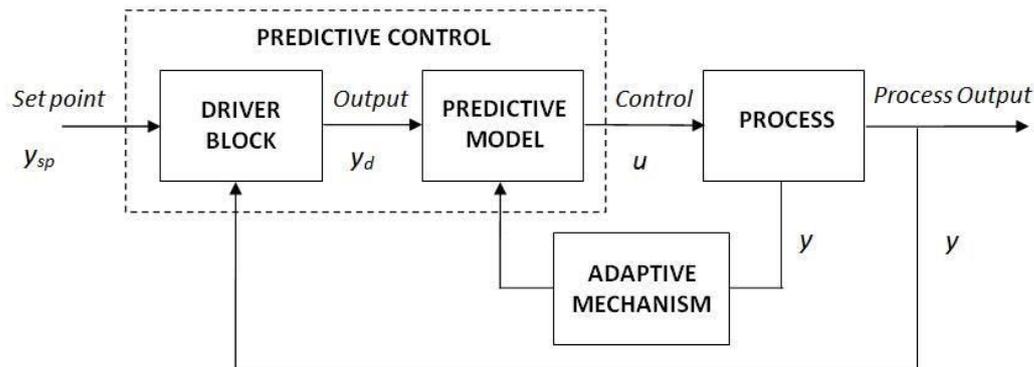


Figura 23. Configuración general de los controladores adaptativos-predictivos

2.4 Estrategia extendida de control predictivo

La formulación original de control predictivo, descrita previamente, consideraba solamente un paso adelante en la predicción para el cálculo de la acción de control, y el diseño del *Driver Block* no usaba de esta forma la información disponible de la dinámica de planta en el *Driver Block*. Esta forma de aplicación del control predictivo es conocida como estrategia básica de control predictivo. Aunque se ha aplicado satisfactoriamente en muchas aplicaciones prácticas, la necesidad de la estrategia extendida fue primero considerado en (Martín-Sánchez, 1977) y posteriormente formalizado en (Martín-Sánchez, 1980).

La estrategia extendida de control predictivo utiliza el mismo principio básico del control predictivo, pero el *Driver Block* genera una trayectoria de salida deseada en cada instante de control que verifica un determinado criterio de rendimiento en un horizonte de predicción ficticio, tomando en cuenta la dinámica de planta como se considera a continuación.

El modelo predictivo define el conocimiento disponible de la dinámica de planta y puede, en cada instante de control, ser usado en una predicción de un solo paso (estrategia básica), o predecir el efecto en la salida de planta de una secuencia de acciones de control en un cierto horizonte de predicción. Una trayectoria de salida de

planta predicha corresponderá a cada posible secuencia de acciones de control, y la conveniencia de aplicar cada una de estas posibles secuencias será evaluada de acuerdo a un cierto índice de rendimiento. La estrategia extendida define como trayectoria deseada proyectada (PDT) la trayectoria de salida predicha, generada por el Driver Block, que corresponde a la secuencia de acciones de control que minimiza un cierto índice de rendimiento en un horizonte de predicción elegido.

La PDT determina la acción de control a ser aplicada a planta, la cual es la primera acción de control de la secuencia de acciones predichas. Una nueva PDT es definida en cada instante de control y la correspondiente secuencia de PDT determina la secuencia de acciones de control aplicadas al proceso. La envolvente de los primeros valores de la secuencia de la PDT, la cual corresponde a las acciones de control siendo aplicadas al proceso, es conocida como trayectoria deseada conductora (DDT). Una estrategia de control predictivo análoga fue presentada en (Clarke, Mohtadi & Tuffs, 1987).

2.5 Control optimizado adaptativo

El control AP, bajo la estrategia extendida de control predictivo, sienta las bases de los denominados “controladores optimizados adaptativos”, caracterizados por:

- a) Un modelo predictivo de planta cuyos parámetros son ajustados en tiempo real mediante un mecanismo de adaptación, de modo que el error de predicción converge a cero.
- b) Este modelo predictivo es usado en cada instante de control para calcular la trayectoria de salida predicha de planta, minimizando un índice que es elegido de acuerdo a un determinado criterio de rendimiento.

Un *survey* de esta clase de controladores, donde la teoría de sistemas adaptativos es complementada con control óptimo, fue presentada en (Martín-Sánchez, 2012; Martín-Sánchez, Rodellar & Lemos, 2012). Este *survey* identificó dos caminos

diferentes en el desarrollo de control optimizado adaptativo que fueron desarrollados de manera independiente. El primero de ellos está orientado desde una perspectiva de estabilidad, y tiene como *background* la teoría utilizada previamente en los sistemas adaptativos con modelo de referencia (Landau, 1973). La segunda está orientada desde una perspectiva de optimización, y tiene el *background* de los primeros reguladores y controladores autoajustables, y utiliza como mecanismo de adaptación algoritmos de mínimos cuadrados (Recursive Least Square, RLS).

2.6 Sistema y estrategia de control optimizado de procesos

El concepto de “Sistema de control de procesos optimizado” fue introducido en (Martín-Sánchez, 2012) como el capaz de verificar las siguientes condiciones de rendimiento:

- a) Un sistema de control de procesos optimizado debe ser capaz de lograr la estabilización dinámica del proceso, es decir, esto significa ser capaz de mantener, en el rango de unos puntos de funcionamiento alcanzables, las variables de planta bajo control preciso en torno a sus setpoints con acciones de control adecuadas, a pesar de los cambios en la dinámica de planta, contexto de operación, ruido y perturbaciones actuando en el proceso.
- b) Debe ser capaz de lograr transiciones entre los puntos de operación alcanzables en las cuales las variables de planta son llevadas mediante trayectorias deseadas con acciones de control adecuadamente acotadas.
- c) El control debe realizarse utilizando controladores que incluyan algún criterio de optimabilidad en la ley de control, en base a la minimización de un determinado índice de rendimiento, y asimismo llevar en la medida de lo posible las variables de salida del proceso a su región de optimabilidad dadas las condiciones de operación de cada momento.

El diseño de sistemas de control está basado necesariamente en el conocimiento disponible de la dinámica del proceso (Luyben, 1990) y el uso de una metodología de control. Es bien conocido que incluso un conocimiento completo de la dinámica del proceso podría no solucionar satisfactoriamente el problema de control. Además, la simple utilización de controladores basados en una metodología de control no es a menudo capaz de lograr lo que se ha denominado en (Martín-Sánchez, 2012) como rendimiento de control de procesos optimizado.

Desde un punto de vista del conocimiento disponible del proceso, se pueden obtener estrategias y reglas que faciliten el control deseado del proceso, a través de la definición de estrategias de control, en las cuales los controladores pueden ser integrados con el fin de lograr un control adecuado del proceso en cuestión. Cuando la combinación de estrategia de control y metodología de control consigue un rendimiento de control del proceso optimizado, se hablará de estrategia de control de procesos optimizada y sistema de control de procesos optimizado.

2.7 Sistema de control optimizado adaptativo

Debido a la naturaleza dinámica variable en el tiempo de los procesos en general, el objetivo deseado de estabilizar la dinámica del mismo es frecuentemente difícil de conseguir y de mantener, utilizando controladores con parámetros fijos. Las actuales aplicaciones en operación, han demostrado que el uso de controladores adaptativos predictivos o de controladores optimizados adaptativos, integrados en una estrategia de control apropiada, pueden solucionar el problema de estabilización dinámica del proceso y obtener un rendimiento de control optimizado. A este tipo de sistema de control, se le denominará “sistema de control optimizado adaptativo”.

2.8 Control adaptativo predictivo experto (ADEX)

La experiencia en la aplicación práctica de control optimizado adaptativo, tal y como se ha descrito en los apartados anteriores, demostró la importancia de usar el conocimiento disponible de la operación del proceso en el conjunto de la estrategia de control.

El control adaptativo predictivo experto ADEX (Martín-Sánchez., 2000; Martín-Sánchez & Rodellar, 2005) fue introducido con el fin de integrar y generalizar el uso del conocimiento disponible del proceso en la operación del controlador. Así, los controladores ADEX integran diferentes dominios de operación, en los cuales el control adaptativo predictivo (AP) (Martín-Sánchez, 1976) o el control experto es configurado y aplicado, de manera coherente y complementaria, basado en el conocimiento del proceso. La selección particular de un dominio de operación, integrado por una configuración concreta del controlador AP, o en caso más aislado, por control experto, viene determinada por el conocimiento del proceso y la evolución en tiempo real del mismo.

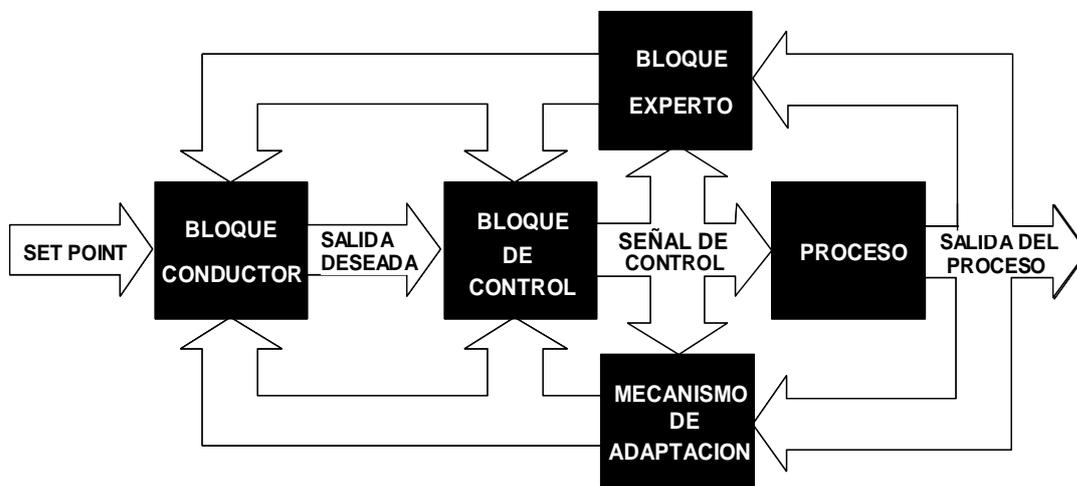


Figura 24. Configuración general de los controladores ADEX

La configuración general de un controlador ADEX se presenta en la Figura 24, y la operación de los diferentes bloques mostrados en la misma se describe a continuación:

- El *Bloque Experto* determina qué configuración concreta de control AP se aplica al proceso, o si por el contrario es necesario aplicar control experto. Cuando se aplica control experto, este bloque determina que el Bloque de Control se comporte como un Sistema Experto, que genera la acción de control según reglas que imitan el comportamiento del operador humano. Cuando se aplica control AP, el bloque experto interactúa con los otros bloques de ADEX como se describe en los siguientes puntos.
- El *Bloque Conductor* genera, para cada variable de salida del proceso, una trayectoria deseada con el fin de conducir la salida del proceso hacia la consigna, respondiendo a un criterio de rendimiento deseado. El bloque experto tiene la capacidad de modificar este criterio de rendimiento, para acomodar la actuación deseada de ADEX a los diferentes dominios de operación AP que pueden haber sido definidos.
- El *Bloque de Control* utiliza un modelo adaptativo predictivo, que define una relación matemática causa-efecto entre las variables de entrada y salida del proceso, para generar en cada instante de control una secuencia de acciones de control futuras que hace que las salidas predichas del proceso coincidan con la trayectoria deseada generada por el bloque conductor. La primera de estas acciones de control es la que se aplica en cada instante al proceso. El bloque experto determina el valor inicial de los parámetros del modelo AP para cada dominio AP en cuestión.
- El *Mecanismo Adaptativo* utiliza las mediciones de las variables de entrada-salida (I/O) del proceso para:
 - Adaptar los parámetros del modelo AP con el fin de minimizar el error de predicción para cada variable de salida del proceso. No obstante, el bloque experto determina cuándo se ejecuta la adaptación, tomando en cuenta las condiciones de operación.

- Permitir al bloque conductor rediseñar las trayectorias deseada de salida, tomando en cuenta la evolución de las variables de I/O del proceso.

De acuerdo con la funcionalidad descrita previamente, cuando las variables de I/O del proceso evolucionan en un dominio de control experto, el bloque experto determinará la aplicación de control experto. En este caso, el bloque de control calculará el vector de control según reglas que imitan la inteligencia del operador humano, de forma similar a como se hace en los sistemas de lógica "fuzzy" o expertos, siendo el objetivo de control el conducir las variables del proceso hacia los dominios AP, donde la operación del proceso puede ser optimizada.

Asimismo, cuando las variables de I/O del proceso evolucionan en un dominio de control adaptativo predictivo, el bloque experto determinará la aplicación de control AP. El mecanismo adaptativo identificará la relación causa-efecto de las variables del proceso y las variaciones de esta relación con el tiempo en un modelo AP, que el bloque de control utilizará para predecir y controlar la evolución de dichas variables. De esta forma, el error de predicción tenderá hacia cero, a pesar de posibles cambios en la dinámica del proceso, y las variables del mismo convergerán a trayectorias deseadas, generadas por el bloque conductor, y se estabilizarán en sus consignas.

2.8.1 Implementación de controladores ADEX en el caso multivariable

De igual manera que la metodología de control AP, la metodología ADEX tiene carácter multivariable. Por consiguiente, puede ser aplicada a procesos MIMO (Multi-Input Multi-Output) con m entradas y n salidas. En la presente implementación de los controladores ADEX se asume que:

1. El número de entradas será siempre mayor o igual que el número de salidas ($m \geq n$).

2. Hay un subconjunto de entradas ($m^*=n$) dentro de las 'm' variables, cuyos valores pueden ser manipulados por el sistema de control para controlar las 'n' variables de salida del proceso.
3. El resto de las variables de entrada ($l^*=m-n$) son consideradas como perturbaciones que actúan en las variables de salida del proceso y cuyos efectos son tomados en cuenta por el controlador ADEX en el cálculo del vector de control.
4. El número máximo de variables de salida del proceso es 3 ($3 \geq n$), mientras que el número de entradas puede llegar hasta 9 ($9 \geq m$).

Una forma práctica de aplicar la metodología ADEX es descomponer internamente el controlador multivariable ADEX en un conjunto de 'n' controladores ADEX de multientradas única-salida MISO (Multi-Input Single-Output). Cada uno de estos controladores ADEX MISO impone una condición para ser verificada por el vector de control, que es calculado a partir de este conjunto de condiciones en cada instante de control.

Por ejemplo, un controlador ADEX 3 x 2 tiene para controlar 2 variables de salida del proceso manipulando las 2 componentes del vector de control y tomando en cuenta el efecto de 1 perturbación. El controlador ADEX 3 x 2 considera internamente 2 controladores 3 x 1. Los cálculos, relativos al funcionamiento internos de estos 2 controladores, se hacen separadamente tomando en cuenta su propio dominio de operación, excepto para el cálculo del vector de control, en el que las interacciones se consideran de forma conjunta.

2.8.2 Descripción de los Operadores ADEX

La Figura 25 muestra operadores que representan un subconjunto (del 1x1 al 3x3) de estos controladores. Un controlador multivariable ADEX se compone de un conjunto de uno o más controladores ADEX MISO, que están relacionados dinámicamente

porque sus salidas (acciones de control sobre el proceso) pueden afectar a las variables de control del conjunto (salidas del proceso).

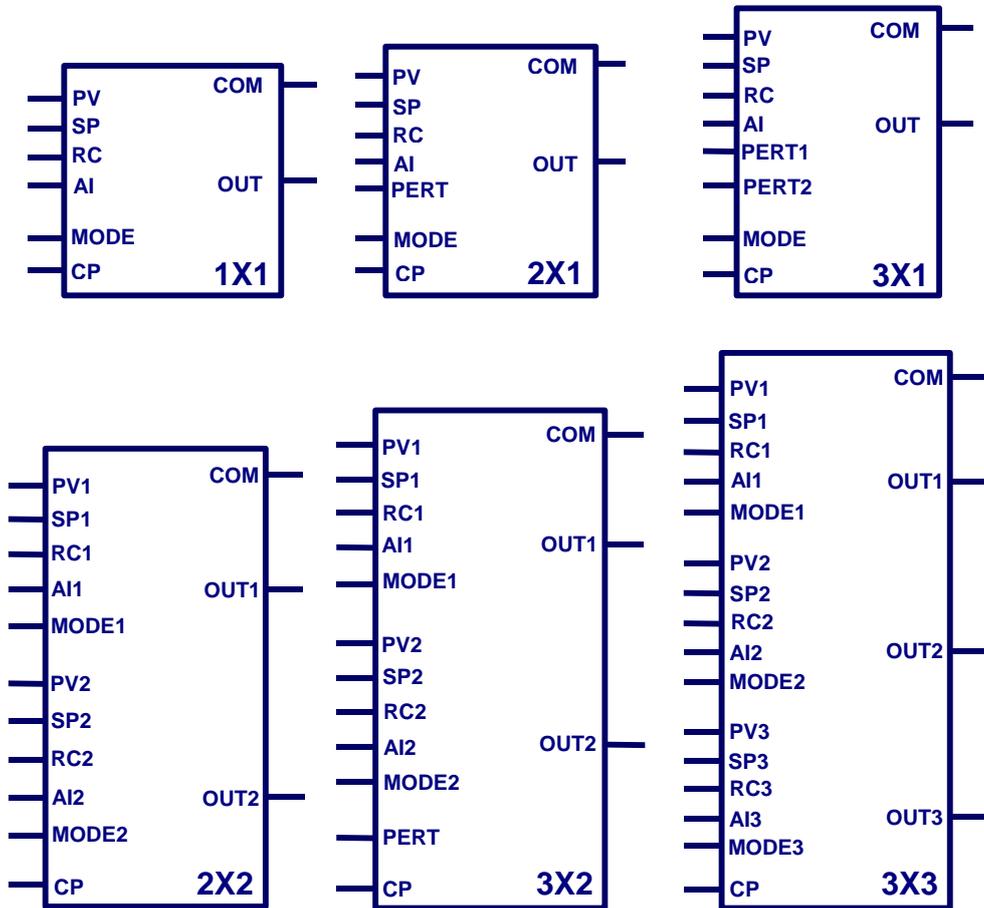


Figura 25. Operadores ADEX

Cada operador de la Figura 25 muestra en la parte izquierda las patillas que serán usadas para interconectar gráficamente la lógica de operación complementaria (LOC) de los estrategia de control y optimización (ECO) con las variables de entrada del controlador y, en el lado derecho, las que se utilizarán para interconectar las salidas del controlador.

Los acrónimos asociados con las patillas de la parte izquierda del operador 2 X 1, que representan entradas analógicas del controlador, son:

- **PV** - Variable de salida del proceso para el controlador ADEX debe controlar.

- **SP** – Consigna (*Set Point*) o valor deseado para la PV.
- **RC** - Máxima tasa de cambio (*Rate of Change*) entre dos instantes de control para la variable del proceso bajo control, PV, cuando se aproxima a una consigna. Este parámetro puede ser calculado por la LOC o configurarse internamente por configuración del controlador.
- **AI** - Última acción de control realmente aplicada al proceso (*Actual Input*), correspondiente a la última acción de control devuelta por el controlador ADEX. Estas dos señales pueden ser diferentes debido a límites de control u otras causas.
- **PERT** - Variable de perturbación que afecta a la evolución de la PV.
- **CP** - Periodo de control (*Control Period*), que puede ser calculado por la LOC o determinarse internamente por configuración del controlador. Determina el tiempo entre dos acciones de control generadas por el controlador ADEX. Es un múltiplo del tiempo de muestreo.

La única salida analógica del operador es:

- **OUT** - Acción de control proporcionada por el controlador.

Las señales digitales (0 o 1) son:

- **MODE** - Determina el modo de operación del controlador. Cuando vale 1, el controlador funciona en modo "AUTO", lo que significa que calcula la acción de control OUT que ha de ser aplicada al proceso. Cuando MODE recibe el valor 0, el controlador funciona en modo "EXTERNAL", lo cual significa que la acción de control es determinada por la LOC del ECO o externamente al ECO.
- **COM** - Es una variable que vale 1 cuando la comunicación entre el ECO y el controlador está establecida y funciona correctamente. En caso contrario, vale 0.

Se puede observar que en el operador 3x1 hay dos patillas de entrada PERT1 y PERT2, dado que en este caso se consideran dos variables de perturbación diferentes. El número de perturbaciones en el conjunto de controladores puede variar entre 0 y 6. Cuando el controlador ADEX incluye dos o tres controladores ADEX MISO, se asigna a cada controlador MISO un número, que se utiliza añadiéndolo en los acrónimos de las patillas PV, SP, RC, AI, MODE, y OUT que corresponden al mismo. Los OUTs con número diferente que el de la PV, son informalmente considerados como perturbaciones del controlador ADEX MISO de la PV en cuestión, pero no disminuyen la posibilidad de considerar un número adicional de perturbaciones entre 0 y 6, lo que supone que la estructura de entradas/salidas de los controladores ADEX puede ser de hasta 7x1, 8x2 y 9x3, dependiendo de las variables del proceso que queramos controlar.

2.9 Sistemas ADEX de control optimizado adaptativo

Cuando un Sistema de Control Optimizado Adaptativo, definido en la sección 2.7, utiliza controladores ADEX en su estrategia de control, se denomina Sistema ADEX de Control Optimizado Adaptativo, o simplemente Sistema ADEX.

Por lo general, la optimización del control de un proceso, cuya dinámica tiene una cierta complejidad, requiere del desarrollo y aplicación al mismo de estrategias de control y optimización (ECO), como ya hemos mencionado. Dichas estrategias generalmente combinan el uso de controladores ADEX y de una lógica de optimización complementaria (LOC), con el fin de minimizar el consumo de energía y de otros recursos, maximizar la producción en cantidad y calidad, al mismo que garantizar la operación estable y segura del proceso.

Como ya se ha indicado previamente, se denomina Sistema ADEX a todo sistema software de control y optimización que está basado en una o varias ECO que utilizan controladores ADEX.

Las ECO pueden desarrollarse de acuerdo con las siguientes directrices:

1. Para cada escenario de operación de la planta o proceso puede desarrollarse una ECO, en el que la LOC se encargará de:
 - a. determinar las entradas que deberán aplicarse a los controladores ADEX integrados en la ECO a partir de las variables medidas del proceso y, asimismo, determinar las señales de control que deberán ser aplicadas al proceso a partir de las salidas producidas por los controladores ADEX.
 - b. buscar los puntos de operación o consignas para las variables del proceso que optimizan su funcionamiento, aprovechando el control preciso y la estabilidad aportada por los controladores ADEX al funcionamiento del mismo.
2. Por su parte los controladores ADEX operarán en dominios expertos y en dominios adaptativos predictivos de la siguiente manera:
 - a. mientras operan en el dominio experto tratarán de que las variables converjan hacia el dominio de control adaptativo predictivo.
 - b. una vez en el dominio adaptativo predictivo las salidas del proceso serán conducidas a través de trayectorias deseada hacia sus consignas y estabilizadas en el entorno de las mismas.
3. En el contexto de la denominada optimización ADEX, el funcionamiento de los controladores ADEX garantizará la estabilización de las variables de proceso alrededor de sus consignas, y permitirá a la LOC en estas condiciones de estabilidad la búsqueda de los puntos óptimos de funcionamiento y, consecuentemente, la optimización del proceso en tiempo real.

Capítulo 3

DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL OPTIMIZADO DE PROCESOS DE MEZCLA

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño de la estrategia de control optimizado que, en conjunción con la utilización de controladores adaptativos predictivos expertos (ADEX), constituye el sistema de control avanzado para la mezcla de materiales. En la primera parte del capítulo se describe la aproximación conceptual e intuitiva a la solución del problema, a la cual se llega partiendo de un caso particular sencillo, extrapolando la inferencia conceptual conforme nos acercamos al problema real, en base a la capacidad de adaptación del sistema. Es este enfoque intuitivo y sencillo una de las primeras recomendaciones para el diseño de cualquier sistema de control (Luyben, 1990), (Shinskey, 1996). Una vez que se llega al supuesto de un número ilimitado de alimentadores se hace necesaria la formalización de los conceptos, punto de partida de la especificación formal general de la estrategia de control optimizado de procesos de mezcla. La estrategia de control propuesta no está basada en la estimación de la composición de las fuentes, a diferencia del estado de la técnica anterior, sino únicamente en un conocimiento genérico de los distintos tipos de material. Establece una correspondencia compuesto-módulo biunívoca entre los compuestos que determinan el valor de los módulos de calidad en la mezcla y estos últimos; define los conceptos de fuente de compuesto y fuente del módulo, y utiliza un esquema de control adaptativo predictivo para calcular un conjunto de señales de control avanzado, definidas como porcentajes de caudal de cada fuente de compuesto contenidos en las correspondientes fuentes de módulo. A partir de dichas señales de control avanzado se determinan con facilidad los caudales a aplicar a cada uno de los alimentadores.

Estos pasos relativos al conocimiento conceptual e intuitivo y a la formalización o materialización de los conceptos constituyen las dos primeras etapas de la llamada ecuación para el aprendizaje tecnológico (Martín-Sánchez & Rodellar, 2015), la cual se completa con una tercera etapa de experimentación práctica de la tecnología, la cual se lleva a cabo en el capítulo 6 sobre resultados en simulación. En la parte final del capítulo se ilustra la aplicación de la estrategia de control general al caso particular de la mezcla de materiales en la industria del cemento.

3.2 Descripción conceptual de la solución metodológica

Para llegar a la solución conceptual al problema, partiremos de un ejemplo sencillo de mezcla. Supongamos que disponemos de dos depósitos con agua, uno primero, A_1 , a temperatura 60°C , y uno segundo, A_2 , a temperatura 20°C que se mezclan para obtener un único caudal a una temperatura T . Y que para expresar la proporción entre ambos caudales en la mezcla utilizamos la siguiente variable $C(\%)$, que expresa el porcentaje del caudal de A_1 en el caudal total:

$$C(\%) = 100 \cdot \frac{C.A_1}{C.A_1 + C.A_2}$$

en donde $C.A_1$ es el caudal del depósito A_1 y $C.A_2$ es el caudal del depósito A_2 . Esta situación queda reflejada en la Figura 26.

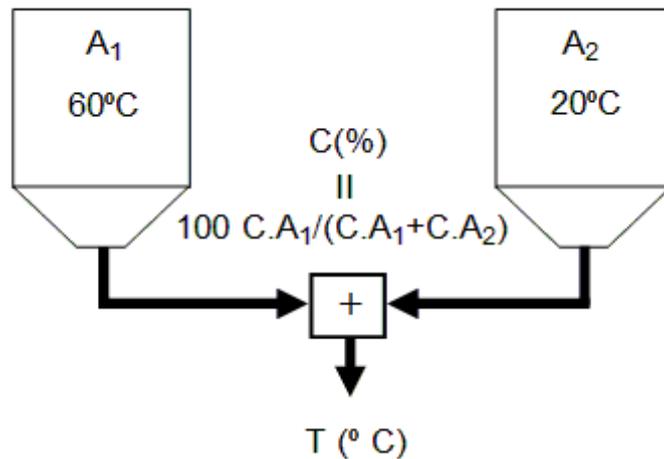


Figura 26. Ejemplo conceptual de mezcla de caudales de agua

Es evidente que, si por ejemplo, la variable $C(\%)$ toma el valor 50%, la temperatura T del caudal de la mezcla será de 40°C . En efecto, de

$$C(\%) = 100 \cdot \frac{C.A_1}{C.A_1 + C.A_2}$$

$$(C.A_1 + C.A_2) \cdot T = C.A_1 \cdot 60 + C.A_2$$

se obtiene $T = 40^\circ \text{C}$. Y al estar definida $C(\%)$ como un porcentaje, es fácil ver que si vale 0% la temperatura de la mezcla será 20°C , al estar extrayéndose todo el caudal de la mezcla del depósito A_2 , siendo nulo el caudal del depósito A_1 . Análogamente, cuando $C(\%)$ valga 100% , la temperatura será de 60°C .

Supongamos a continuación que nos planteamos el problema inverso, es decir, queremos saber cuál debe ser el valor de $C(\%)$ para que la temperatura de la mezcla sea de 50°C . Nuevamente, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que permite obtener que $C(\%)$ ha de valer 75% . Y para que la temperatura sea de 30°C , la proporción $C(\%)$ ha de ser del 25% . Y como ya hemos dicho, para obtener una temperatura de 60°C , $C(\%)$ ha de valer 100% . Esta sencilla consideración descarta la elección de la variable que expresa la relación entre los caudales como un ratio, es decir, el considerar en vez de $C(\%)$, tal y como la hemos definido como un porcentaje, una variable C' definida como

$$C' = \frac{C.A_1}{C.A_2}$$

En efecto, al objeto de obtener una temperatura de salida de 60°C , el caudal $C.A_2$ ha de valer 0 y en ese caso C' tiende a infinito. Y pensando en un sistema de control de la temperatura de la mezcla, vemos que en este caso, para obtener una salida acotada (60°C), se requeriría una acción de control ilimitada.

Por otro lado, el valor de $C(\%)$ también varía si cambia alguna de las temperaturas de los depósitos, en efecto, si la temperatura de A_1 pasa a ser de 10°C , para obtener una temperatura de mezcla de 50°C , $C(\%)$ pasa a valer 80% , mientras que para que la temperatura de mezcla sea 30°C , la proporción $C(\%)$ ahora resulta ser del 40% .

Sin embargo, es evidente de esta aproximación ilustrativa, que nunca se podrá obtener una temperatura de 90°C , por ejemplo, ya que aun fijando la variable $C(\%)$ al 100% , a lo sumo obtendríamos una temperatura máxima de 60°C . Y en sentido opuesto, nunca se podría obtener una temperatura de mezcla de 5°C , ya que como mínimo, $C(\%) = 0\%$, la temperatura será de 20°C .

Demos a continuación un paso conceptual más que nos aproxime un poco más a la realidad. Supongamos que la temperatura de los depósitos no se conoce con precisión, y que a lo sumo se conoce que uno presenta una temperatura más elevada que el otro, de manera que como mucho podemos catalogar a los depósitos como depósito de temperatura “caliente” y depósito de temperatura “fría”. Y supongamos que, deseando una temperatura de mezcla de 25° C, se baja de forma continuada la variable C(%), hasta llegar a 0% y que, aun así, la temperatura de mezcla que se obtiene es de 30°C. ¿Qué diagnóstico, o diagnosis, se puede realizar? Siguiendo el hilo lógico anterior, intuitivamente se puede afirmar que “A₂ no es suficientemente fría”. Y lo mismo ocurre si, deseando obtener una temperatura de mezcla de 70° C, la variable C(%) ha llegado hasta el 100%, y, a pesar de ello, la temperatura permanece en un valor de, por ejemplo, 65° C. Es evidente que la diagnosis sería que “A₁ no es suficientemente caliente”. La Figura 27 ilustra estas situaciones de diagnosis.

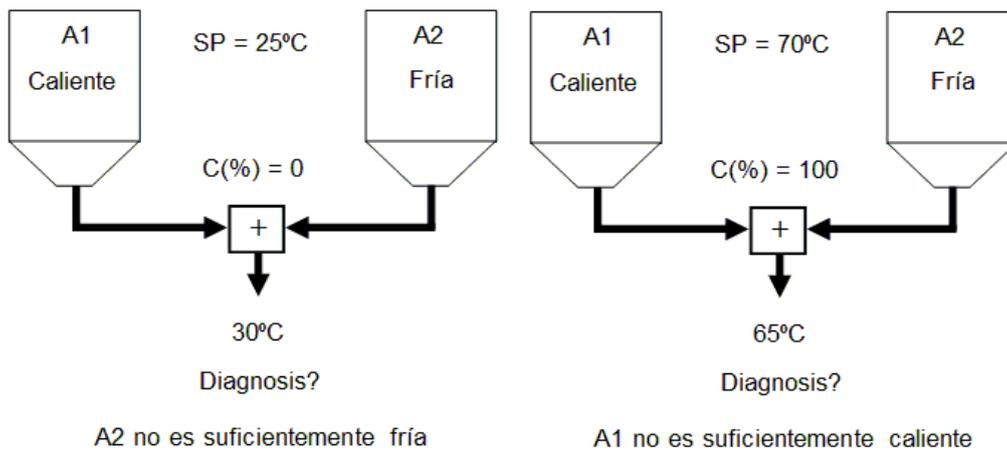


Figura 27. Emisión de diagnosis en la mezcla de caudales de agua

Y por tanto es evidente que la temperatura deseada será alcanzable siempre que dicho valor sea menor que la temperatura del depósito de temperatura “caliente” y mayor que la del depósito de temperatura “fría”, es decir, si

$$T_{\text{Caliente}} \geq T_{\text{SP}} \geq T_{\text{Fría}}$$

La comprensión del razonamiento anterior permite llegar al conocimiento conceptual de cuándo unos índices o módulos de calidad de una mezcla son alcanzables o no y de cómo emitir los diagnósticos de deficiencia de composición.

Pasemos del ejemplo de la mezcla del agua de dos depósitos al caso de la mezcla de materiales en la industria el cemento del que hemos hablado extensamente en el Capítulo 1, suponiendo un único módulo de calidad a obtener, por ejemplo LSF, al objeto de facilitar la comprensión de la esencia de la solución. Y supongamos, enlazando con el nivel conceptual al que hemos llegado en el ejemplo del agua, que disponemos de dos alimentadores, de los que sólo se conoce que uno tiene un “Alto LSF”, por ejemplo una caliza, aportadora fundamentalmente de calcio, y el otro un “Bajo LSF”, por ejemplo una arena, aportadora fundamentalmente de silicio. La Figura 28 ilustra este ejemplo conceptual de materiales en la industria del cemento.

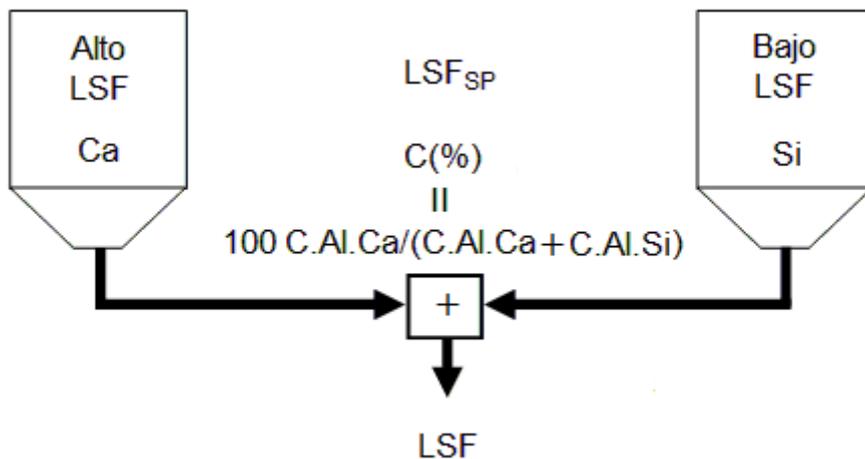


Figura 28. Ejemplo conceptual de mezcla de materiales en la industria del cemento

Procediendo por analogía con el ejemplo de mezcla de caudales de agua, ahora observamos los siguientes hechos:

- El objetivo de control será realizable si $LSF_{Ca} \geq LSF_{SP} \geq LSF_{Si}$
- La variable que expresa la proporción entre los caudales de los alimentadores se define ahora como

$$C(\%) = 100 \cdot \frac{\text{Caud.Alim.Ca}}{\text{Caud.Mezcla}}$$

en donde Caud.Alim.Ca es el caudal del alimentador de Ca y Caud.Mezcla es el caudal total fijado para la mezcla.

- El valor de esta variable va a ser fijado en cada período de control por un Controlador ADEX de LSF, el cual, a partir del setpoint fijado para el LSF y del valor actual medido en la mezcla, va a determinar el valor de C(%) que haga que el LSF en la mezcla converja al setpoint de LSF. Es la capacidad adaptativa del controlador ADEX la que va a garantizar la identificación de las diferentes relaciones causa-efecto en el proceso consecuencia de los cambios aleatorios y discontinuos de composición en los alimentadores, así como de los debidos a los cambios de setpoint.
- Una vez fijado el valor de C(%), el caudal del alimentador de Ca y el del alimentador de Si se obtienen mediante:

$$\text{Caud.Alim.Ca} = C(\%) \cdot \frac{\text{Caud.Mezcla}}{100}$$

$$\text{Caud.Alim.Si} = \text{Caud.Mezcla} - \text{Caud.Alim.Ca}$$

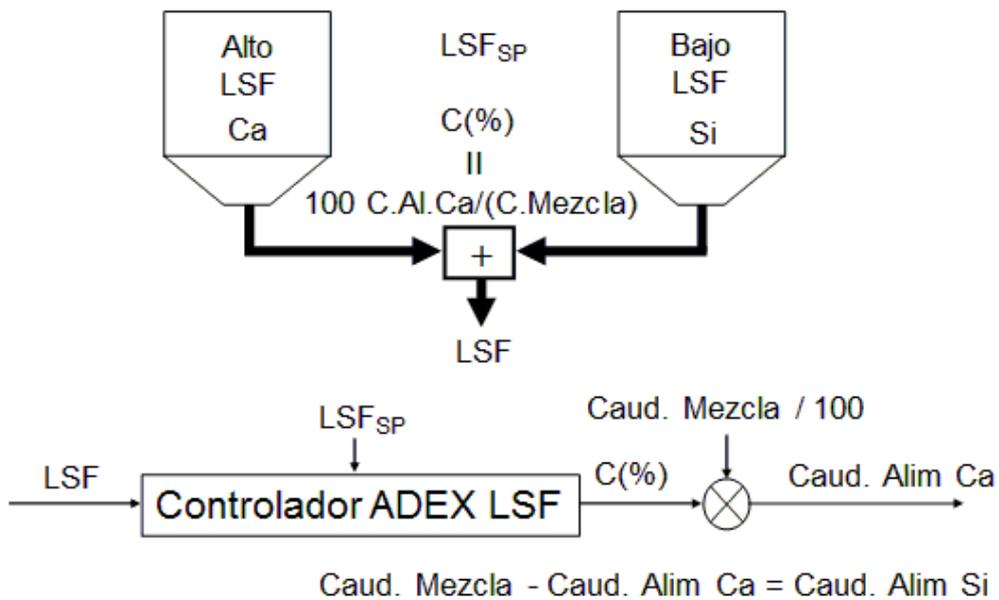


Figura 29. Esquema de control para el ejemplo de la mezcla de materiales en la industria del cemento

La Figura 29 ilustra el esquema de control conceptual para el ejemplo de la mezcla de materiales en la industria del cemento.

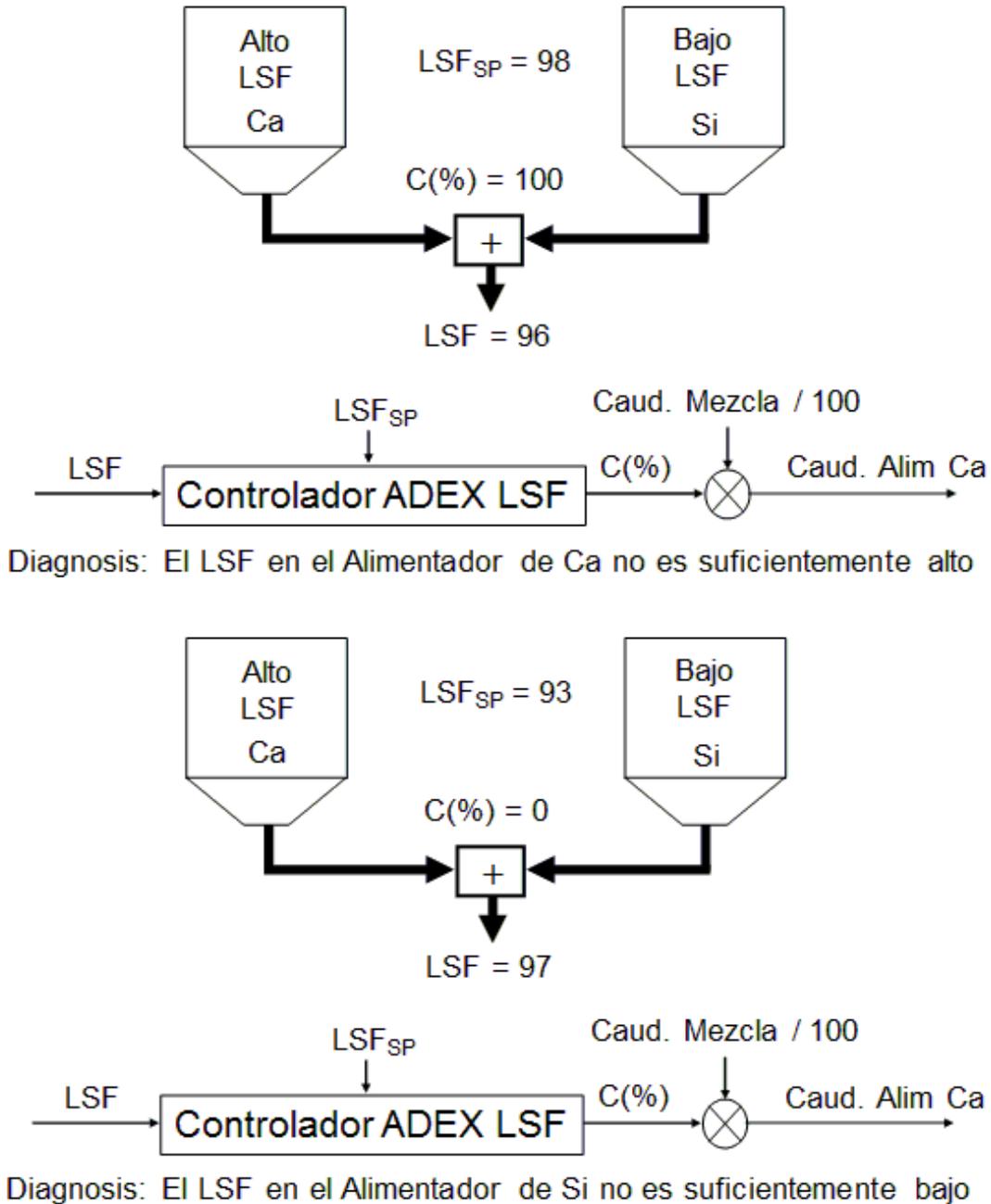


Figura 30. Diagnósis para el ejemplo de la mezcla de materiales en la industria del cemento

- Y en cuanto a las diagnósis, si la seña de control $C(\%)$ vale 100%, y aun así el LSF permanece por debajo de su setpoint, la diagnósis será “El LSF en el

alimentador de Ca no es suficientemente alto”, y si $C(\%)$ se fija al 0% y, a pesar de ello, el LSF sigue por encima de su setpoint, la diagnosis será “El LSF en el alimentador de Si no es suficientemente bajo”. La Figura 30 ilustra estas situaciones de diagnosis.

3.2.1 Número ilimitado de alimentadores y necesidad de formalización

La comprensión conceptual de la necesidad y la posibilidad de identificar las distintas dinámicas por medio de los controladores ADEX permite resolver intuitivamente también el supuesto de un número ilimitado de alimentadores. En efecto; si hay más de un alimentador de un tipo de elemento, por ejemplo de Ca, el que se utilice uno u otro, o el hecho de cambiar discontinuamente de uno a otro, a lo sumo equivaldrá a un cambio discontinuo de composición que, como acabamos de ver, el controlador ADEX identificará. Por tanto, la solución conceptual al caso de más de un alimentador de un tipo es intuitiva: proporcionar una única consigna de caudal para el conjunto de alimentadores que son de un mismo tipo, dejando libertad completa al operador para que distribuya esa consigna entre los distintos alimentadores del mismo tipo a su criterio.

Este nuevo concepto de “conjunto de alimentadores de un mismo tipo“ requiere su formalización mediante la definición de Fuente de Compuesto, que junto a la de Fuente de Módulo sientan las bases de la especificación formal de la estrategia de control, la cual se lleva a cabo en la siguiente sección.

Además, la extensión al control de dos y tres módulos de calidad es evidente a partir de los ejemplos anteriores, por medio de la extrapolación por analogía de las variables de control definidas como porcentajes entre los caudales de los alimentadores; extensión que queda formalizada nuevamente mediante las dos definiciones referidas antes. Este punto se comprenderá en detalle al ilustrarlo en la sección 3.5 por la aplicación del sistema a la mezcla de materiales en la industria del cemento.

3.3 Estrategia de control

La estrategia de control avanzado para el proceso de mezcla utiliza un ordenador digital, o cualquier otro sistema o método de cálculo adecuado, para determinar, a partir de las medidas periódicas de la composición de la mezcla generadas por un analizador en línea, la dosificación de los alimentadores del proceso de mezcla, obteniendo un control preciso y estable de los módulos de calidad en la composición de la mezcla, a pesar de la naturaleza compleja de este tipo de proceso. La estrategia puede aplicarse a procesos de mezcla con un número ilimitado de alimentadores. Cada uno de estos alimentadores es considerado, teniendo en cuenta la procedencia y el tipo de material que contiene, como suministrador de uno de los compuestos que se consideran en el cálculo de los módulos de calidad de la mezcla. El que un alimentador se considere como suministrador de un cierto compuesto no implica que éste sea mayoritario en el material del alimentador, ni tampoco que dicho material no contenga otros compuestos que afectan a la calidad de la mezcla, pero sí indica que el material de dicho alimentador debe utilizarse para conseguir que el compuesto en cuestión se encuentre en el porcentaje adecuado dentro de la mezcla para alcanzar las consignas de los módulos de calidad de la mezcla. Parte de este Capítulo se encuentra recogido en la patente ES 2307383 (ADEX S.L., Riesco & Martín-Sánchez, 2009) y en (Riesco, Mur & Martín-Sánchez, 2005).

3.3.1 Fuente de Compuesto y Fuente de Módulo de Calidad

La estrategia de control está basada en las dos definiciones siguientes.

Definición 1: Fuente de Compuesto. El conjunto de alimentadores considerados como suministradores de un compuesto se define como la fuente de dicho compuesto.

Definición 2: Fuente de Módulo de Calidad. El conjunto de fuentes de un compuesto consideradas para el control de un módulo de calidad se define como la fuente de dicho módulo de calidad.

La estrategia se especifica por los tres puntos siguientes.

1. Correspondencia Módulo de Calidad – Compuesto. Se establece una correspondencia biunívoca entre cada uno de los módulos de calidad y un compuesto de los considerados en el cálculo de dichos módulos. Por ejemplo, dicha correspondencia puede ser tal que, cuando el porcentaje de dicho compuesto aumenta en la mezcla, el valor del correspondiente módulo de calidad también aumenta y, viceversa, cuando el porcentaje de dicho compuesto disminuye en la mezcla, el valor del correspondiente módulo de calidad también disminuye.

Por lo tanto, de acuerdo con este ejemplo de correspondencia, los procesos de mezcla aquí considerados son tales que:

1. la fuente de un compuesto tiene en general suficiente porcentaje de dicho compuesto para que en ella misma el módulo de calidad correspondiente esté significativamente por encima de la consigna que se establece para dicho módulo en la mezcla; y
 2. la fuente de un módulo de calidad excluyendo la fuente del correspondiente compuesto, tiene en general en ella misma el correspondiente módulo de calidad significativamente por debajo de su consigna.
2. Lazos de control. Se utiliza un lazo de control avanzado para controlar cada uno de los módulos de calidad en cuestión. Cada uno de dichos lazos de control avanzado recibe como variable de proceso a controlar la medida del módulo de calidad, calculada periódicamente a partir de las medidas de la composición de la mezcla realizadas por el analizador en línea, y produce como señal de control avanzado el porcentaje (%) del caudal de la fuente del compuesto correspondiente al módulo de calidad contenido en el caudal de la fuente de dicho módulo de calidad. Esta señal de control se denomina abreviadamente “% de la fuente del compuesto en la del módulo”.

3. A partir de dichos “% de la fuente del compuesto en la del módulo” generados por los distintos lazos de control avanzados, se calculan los caudales de las distintas fuentes de compuestos consideradas en el proceso de mezcla. Este cálculo es sencillo, como se muestra más adelante.

3.3.2 Deficiencias de composición y uso de alimentadores correctivos

La estrategia de control puede detectar una deficiencia en la composición de una o varias de las fuentes de compuestos, cuando una de las señales de control avanzado, “% de la fuente del compuesto en la del módulo”, alcanza su límite inferior de 0%, o su límite superior de 100%, y a pesar de ello el correspondiente módulo de calidad se mantiene alejado de su consigna.

En estas condiciones, el sistema y método produce un diagnóstico de deficiencia y calcula, en caso de existir uno o varios “alimentadores correctivos” con material capaz de corregir la mencionada deficiencia, una consigna de caudal para dichos uno o varios alimentadores correctivos, con el fin de que el módulo de calidad en cuestión alcance su consigna. Los alimentadores correctivos son sólo utilizados en estas condiciones, en tanto que se requieran para que el módulo de calidad en cuestión se mantenga en su consigna. El diagnóstico de deficiencia se mantendrá en tanto que se utilice un alimentador correctivo.

Por tanto, la estrategia determina la consigna de caudal de las distintas fuentes de los compuestos del proceso de mezcla y permite su distribución libremente entre los correspondientes alimentadores de cada fuente de compuesto. En caso de existir un diagnóstico de deficiencia en una de dichas fuentes, la mencionada consigna se divide en dos, una que se distribuirá entre los alimentadores no correctivos y, otra, que se distribuirá entre los alimentadores correctivos. La distribución de la consigna del caudal de la fuente que corresponde a los alimentadores no correctivos puede hacerse libremente y, en general, puede ser determinada por el operador humano. La consigna del caudal de la fuente que corresponde, en su caso, a los alimentadores correctivos, puede asimismo distribuirse libremente entre los mismos.

3.4 Interacción entre proceso de mezcla y sistema de control

La Figura 31 muestra un diagrama ilustrativo de la interacción del proceso de mezcla y el sistema de control de la misma. Aunque debe señalarse que no se intenta que el método se vea limitado por la siguiente descripción de su aplicación al proceso de mezcla representado en la Figura 31, ya que la adaptación del sistema y método de la presente tesis a otras representaciones de procesos de mezcla sería evidente.

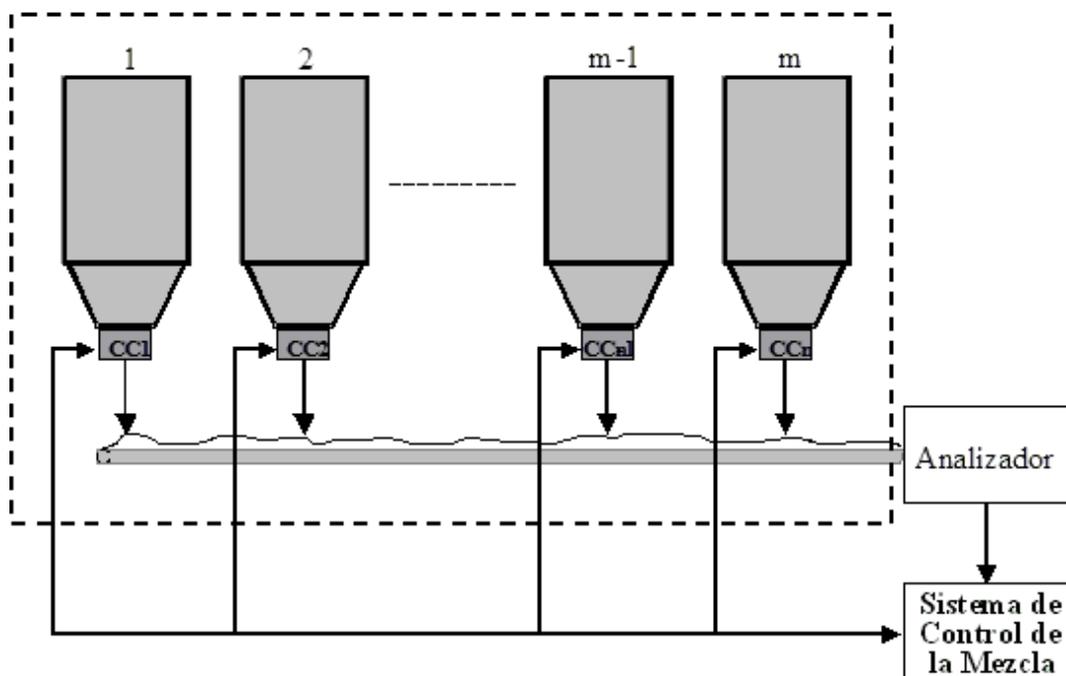


Figura 31. Interacción entre proceso de mezcla y sistema de control

Como se muestra en la Figura 31, el proceso de mezcla comprende un número variables de alimentadores u otros contenedores con medios para suministrar su contenido, que son los materiales para la mezcla, a una cinta transportadora. El caudal de material que cada alimentador suministra a la cinta transportadora es regulado por un controlador de caudal, de forma que dicho caudal se mantiene alrededor de su consigna. La cinta transportadora lleva el material mezclado hasta el analizador en línea, que genera periódicamente medidas de la composición de la mezcla. Dicho analizador puede ser cualquiera de los que actualmente existen en el

mercado, basados en el uso de rayos gamma o rayos X o de cualquier otro tipo de tecnología capaz de obtener resultados de análisis en línea satisfactorios.

El analizador se comunica con el ordenador o dispositivo de cálculo donde se implementa el sistema de control de la mezcla.

El sistema de control de la mezcla lleva a cabo periódicamente el procesamiento de los datos obtenidos de la medida de la composición de la mezcla para calcular las consignas de caudal que deberán aplicarse a cada uno de los controladores de caudal. El ordenador periódicamente se comunica de forma bidireccional con los controladores de caudal, para enviarles dichas consignas de caudal y recibir las medidas de los caudales que realmente suministran los alimentadores a la cinta transportadora. Dichas medidas de caudal son asimismo utilizadas por el sistema para calcular dichas consignas.

Como ya se ha indicado, el sistema considera cada uno de los alimentadores del proceso de mezcla como suministradores de un compuesto que interviene en el cálculo de los módulos de calidad. Asimismo, el conjunto de alimentadores suministradores de un compuesto definen la fuente de dicho compuesto.

Con propósito ilustrativo, consideraremos que el número de fuentes de compuestos es igual a n , cada una de estas fuentes contribuirá a la mezcla producida con un caudal, que será determinado en cada instante de control k , donde k es un entero que mide el tiempo en períodos de control.

El objetivo de un sistema de control óptimo para un proceso de mezcla es calcular los caudales de las diferentes fuentes de compuestos en cada instante de control k de manera que los módulos de calidad de la composición de la mezcla se aproximen a sus consignas en un tiempo mínimo y se mantengan en ellas a lo largo del proceso.

El sistema define un lazo de control avanzado para cada módulo de calidad. En cada lazo de control avanzado la variable de proceso a controlar es el correspondiente módulo de calidad y la señal de control avanzado es el correspondiente “% de la fuente del compuesto en la del módulo”.

3.4.1 Retardos

Con el fin de facilitar el buen funcionamiento de los lazos de control avanzado es conveniente determinar un tiempo de retardo adecuado entre las señales de control avanzado y sus correspondientes módulos de calidad. Ello demanda que las fuentes de compuestos incluidas en la correspondiente fuente del módulo tengan el mismo tiempo de retardo en períodos de control con respecto a las medidas del correspondiente módulo de calidad.

Conociendo el máximo tiempo de retardo MR entre los alimentadores con caudal variable de las fuentes de compuestos, puede añadirse de forma conveniente tiempos de retardo a dichos alimentadores para que todos ellos tengan el mismo máximo tiempo de retardo total MR. Para añadir en la práctica estos tiempos de retardo, bastará con retener la aplicación de la consigna de caudal calculado para cada alimentador durante su correspondiente tiempo de retardo añadido. El tiempo de retardo total de un alimentador es igual al tiempo de transporte del material que el alimentador suministra, desde el alimentador hasta el analizador, más el tiempo de medida del analizador.

3.5 Operación del sistema de control de la mezcla de materiales

La Figura 32 ilustra las operaciones que el sistema de control de la mezcla de materiales ejecuta por medio del ordenador en cada instante de control k . Estas operaciones se describen a continuación.

3.5.1 Adquisición de la composición

En el paso 1 mostrado en la Figura 32, se produce la adquisición de la composición de la mezcla medida proporcionada por el analizador en línea. Esta medida puede ser filtrada para obtener una mejor estimación de la composición de la mezcla.

3.5.2 Cálculo de los módulos de calidad

En el paso 2, se calculan los módulos de calidad MC_i ($i = 1, NM$) de acuerdo con las fórmulas que los definen, que para cada caso concreto pueden ser distintas, en donde NM representa el número de módulos de calidad calculados. Los módulos de calidad así obtenidos pueden asimismo ser filtrados si se desea.

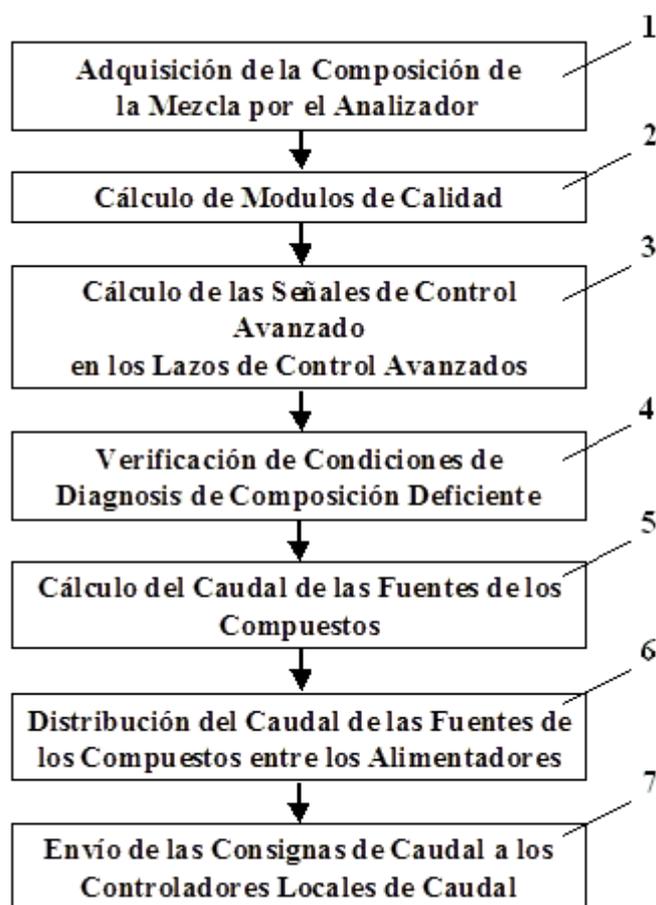


Figura 32. Operación del sistema de control de la mezcla de materiales

3.5.3 Cálculo de las señales de control avanzado

En el paso 3, se ejecutan los lazos de control avanzado correspondientes a cada módulo de calidad, $MCLAZO_i$ ($i = 1, NM$), utilizando una herramienta software de control HSC. Previamente se habrán creado inicialmente los citados NM lazos en la

herramienta software de control. Posteriormente, en cada instante de control k , la herramienta software de control será invocada para ejecutar cada uno de los lazos después de recibir los datos apropiados. Esta ejecución puede describirse mediante el conjunto de ecuaciones siguientes.

$$\begin{aligned} \text{PFCM}_{Ci}(k) &= \text{HSC}(\text{MCLAZO}_i, \text{M}_{Ci}(k), \text{MCSP}_i(k), \text{PFCMC}_{Ri}(k-1)) \\ (i &= 1, \text{NM}) \end{aligned} \tag{Ec.3.1}$$

En cada una de las anteriores ecuaciones del conjunto (3.1) la herramienta software de control HSC recibe cuatro argumentos dentro del paréntesis en el segundo miembro de la ecuación y devuelve para cada lazo MCLAZO_i la señal de control avanzado en el instante de control k , que aparece en el primer miembro de las ecuaciones (3.1). Dicha señal de control avanzado $\text{PFCM}_{Ci}(k)$ es, como ya se ha indicado, el correspondiente “% de la fuente del compuesto en la del módulo”.

El primero de los argumentos que recibe la herramienta de control avanzado es el nombre del lazo que debe ser ejecutado MCLAZO_i , el segundo y el tercero son la medida del correspondiente módulo de calidad $\text{M}_{Ci}(k)$ y su consigna $\text{MCSP}_i(k)$ en el instante de control k . El cuarto es el valor de la señal de control avanzado realmente aplicada al proceso de mezcla en el instante anterior $k-1$, $\text{PFCMC}_{Ri}(k-1)$. Para calcular este cuarto argumento, el sistema puede utilizar la medida de los caudales reales de las fuentes de los compuestos que el ordenador adquiere en su comunicación con los controladores de caudal, los cuales se pueden someter a filtrado debido a la falta de precisión de esto últimos.

En el caso más general, se podrían utilizar diferentes tipos de herramientas software de control HSC, incluyendo controladores basados en técnicas tradicionales de control proporcional, integral y derivativo (PID), controladores inteligentes, de lógica difuso o expertos, controladores basados en redes neuronales, controladores adaptativos con modelo de referencia, controladores auto-ajustables y sistemas de control adaptativo predictivo.

Sin embargo, como ya hemos mencionado repetidamente en los Capítulos 1 y 2, es la capacidad para identificar los diferentes cambios dinámicos del proceso de mezcla el elemento clave para que optimizar el control de la mezcla de materiales, es más, como hemos visto en la sección 3.1, el disponer de esa capacidad de adaptación verificada industrialmente es lo que permite dar lugar a una solución lógica y consistente a la existencia de un número ilimitado de alimentadores y a la detección de deficiencias de composición, los cuales son los aspectos adicionales fundamentales que se requieren en la solución optimizada del problema de la mezcla de materiales.

Es por ello, que la herramientas software de control HSC empleada en la estrategia de control es la plataforma software ADEXCOP v.1 (ADEXCOP, 2015), propiedad de la compañía, ADEX S.L., la cual permite crear y utilizar controladores ADEX dentro de una estrategia de control (Martín-Sánchez & Rodellar, 2015).

Una vez calculadas en (3.1) las señales de control avanzado, se aplicarán a las mismas sus límites absolutos naturales por ser señales porcentuales, es decir 0% como límite inferior y 100% como límite superior, y asimismo el límite incremental que se considere más conveniente.

3.5.4 Verificación de las condiciones de diagnosis de deficiencias de composición

En el paso 4, se verificará la existencia de condiciones para emitir diagnosis de deficiencia en la composición de una o varias fuentes de compuestos. Dichas condiciones pueden ser las siguientes.

1. Una señal de control avanzado alcanza y permanece en su límite superior de 100% y, a pesar de ello, el correspondiente módulo de calidad bajo control permanece bajo su consigna y no tiende hacia ella.

2. Una señal de control avanzado alcanza y permanece en su límite inferior de 0% y, a pesar de ello, el correspondiente módulo de calidad bajo control permanece por encima de su consigna y no tiende hacia ella.

En el primer caso, es obvio que dicho módulo de calidad no es suficientemente alto en la correspondiente fuente del compuesto, ya que el caudal de la fuente del módulo procede enteramente (100%) de la fuente del compuesto y, sin embargo, el módulo de calidad en la mezcla no llega a alcanzar su valor de consigna. Debe recordarse que dicha fuente del compuesto debe de tener un valor alto del correspondiente módulo de calidad, es decir, significativamente por encima de su consigna. Así pues en este caso el diagnóstico será “Módulo de Calidad bajo en la Fuente del Compuesto”.

En el segundo caso, es obvio que dicho módulo de calidad no es suficientemente bajo en la correspondiente fuente del módulo, excluyendo la fuente del correspondiente compuesto, ya que la contribución de la fuente de dicho compuesto al caudal de la fuente de dicho módulo es nula (0%) y, sin embargo, el módulo de calidad en la mezcla permanece superior a su valor de consigna. Debe recordarse que dicha fuente del módulo excluyendo la fuente del compuesto debe de tener un valor bajo del correspondiente módulo de calidad, es decir, significativamente por debajo de su consigna. Así pues en este caso el diagnóstico será “Módulo de Calidad alto en la Fuente del Módulo excluyendo la fuente del compuesto”.

Las condiciones previamente descritas determinarán pues la emisión de una diagnosis de deficiencia en la composición de al menos una de las fuentes de compuestos. En caso de que dicha fuente disponga de uno o varios alimentadores correctivos, estos serán utilizados en la medida de lo necesario para que la consigna en el correspondiente módulo de calidad sea alcanzada en la mezcla. La utilización de los alimentadores correctivos se describe más adelante en el paso 6. En tanto que un alimentador correctivo sea utilizado la correspondiente diagnosis de deficiencia se mantendrá emitida.

3.5.5 Cálculo del caudal de las fuentes de compuesto

En el paso 5, se realizará el cálculo de las consignas de caudal de las fuentes de los compuestos. El cálculo de las señales de control avanzado según (3.1) impondrá NM condiciones al cálculo de las consignas de caudal para las n fuentes de compuestos.

Adicionalmente, dichas consignas de caudal $SPF_i(k)$ ($i = 1, n$) deberán verificar que la suma de todas ellas es igual a la consigna del caudal de mezcla producido, tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n SPF_i(k) = SPM(k + MR) \quad (Ec.3.2)$$

en donde $SPF_i(k)$ es la consigna de caudal calculado para la fuente de compuesto i en el instante k ; $SPM(k + MR)$ es la consigna de caudal para la mezcla producida en el instante $k + MR$, y MR tiene en cuenta los tiempos de retardo del proceso como ya se ha considerado previamente.

A partir de las NM condiciones impuestas por las señales avanzadas de control y de la condición de la ecuación (3.2), se calcularán las consignas de caudal para cada una de las n fuentes de compuestos y se les aplicarán los límites absolutos e incrementales que se consideren convenientes.

Si $NM + 1$ es igual a n , el cálculo de las consignas de caudal para las fuentes de los compuestos tendrá una solución única.

Si n es menor que $NM + 1$, que puede ocurrir en situaciones en las que se producen fallos en los alimentadores, no será posible conducir todos los módulos de calidad hacia sus consignas. En este caso deberá establecerse una prioridad para determinar qué módulos de calidad permanecerán bajo control.

Si $NM + 1$ es menor que n , los objetivos de control podrán lograrse utilizando un subconjunto de las fuentes de los compuestos. En este caso se deberá elegir qué fuentes de compuestos utilizamos para obtener los objetivos de calidad en la mezcla.

El cálculo de las consignas del caudal de las fuentes de los compuestos, a partir de las condiciones (3.1) y (3.2), es sencillo y se describe en detalle más adelante utilizando un ejemplo ilustrativo de proceso de mezcla en el área de la producción de cemento.

3.5.5.1 Fuente conductora

Cuando el caudal de una fuente no está bajo control automático preciso y puede presentar cambios aleatorios y discontinuos, esta fuente puede ser seleccionada como fuente conductora.

En este caso el sistema de control de la mezcla de materiales puede calcular las consignas de los caudales de las otras fuentes a partir únicamente de las condiciones (3.1), realizando este cálculo considerando que la consigna para el caudal de la fuente conductora es el valor medido de dicho caudal. En este modo de funcionamiento, que se ilustrará más adelante con ayuda del ejemplo en el proceso de mezcla en la industria del cemento, el cálculo de las consignas de las otras fuentes no tendrán en cuenta la condición (3.2), por lo que se amoldarán al caudal de la fuente conductora para mantener los módulos de calidad de la mezcla en sus consignas, aunque el caudal de dicha mezcla no estará bajo control automático preciso.

3.5.6 Distribución del caudal entre los alimentadores

En el paso 6, se realizará la distribución de las consignas de caudal de las distintas fuentes de compuestos entre sus respectivos alimentadores. En el caso de no detectarse ninguna condición de diagnóstico de deficiencia en las composiciones de las

fuentes en el paso 4 previamente descrito, dicha distribución se realizará libremente entre los alimentadores no correctivos, con la única condición de que la suma de las consignas de caudal asignadas a los alimentadores no correctivos correspondientes a cada una de las fuentes de compuestos sea igual a la consigna de caudal de dichas fuentes de compuestos.

3.5.6.1 Caudal de los alimentadores correctivos

Cuando una de las condiciones de diagnóstico, previamente consideradas en el paso 4, se verifica sobre la composición de una de las fuentes de compuestos, si dicha fuente dispone de uno o varios alimentadores correctivos empezará a utilizarlo/s en la medida de lo necesario para conseguir que el correspondiente módulo de calidad alcance su consigna.

Una de las formas de utilizar el alimentador o alimentadores correctivos puede consistir en dividir la consigna de caudal calculado $SPFi(k)$ para la fuente del compuesto en cuestión en dos partes. La primera parte $SPNCFi(k)$ a aplicar a los alimentadores de la fuente de compuesto no correctivos y la segunda parte $SPCFi(k)$ a aplicar al alimentador o alimentadores correctivos.

Dicha segunda parte puede corresponder a un porcentaje de la consigna del caudal calculado para la fuente del compuesto que, partiendo inicialmente de cero, puede hacerse crecer, de forma lineal con los períodos de control o de cualquier otra forma que se estime conveniente, en la medida de lo necesario para permitir que el módulo de calidad en cuestión alcance su valor de consigna.

Una vez el módulo de calidad en cuestión alcanza la consigna o se mantiene en un entorno suficientemente cercano a la misma, si al mismo tiempo la correspondiente señal de control avanzado se aleja suficientemente del límite absoluto correspondiente al diagnóstico, el porcentaje de la consigna de caudal de la fuente del compuesto aplicado al alimentador o alimentadores correctivos puede hacerse

decrecer con un criterio adecuado hasta volver, en su caso, al valor inicial de cero, finalizando así la utilización del alimentador o alimentadores correctivos.

En el caso en el que se esté utilizando un alimentador correctivo, las consignas de caudal $SPNCF_i(k)$ ($i = 1, n$) de las distintas fuentes de compuestos, correspondientes a los alimentadores no correctivos, podrán distribuirse entre estos libremente y, en general, puede ser determinada por el operador humano, con la única condición expresada en el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{NA_i} SPA_{ij}(k) = SPNCF_i(k) \quad (i = 1, n) \quad (Ec.3.3a)$$

en donde NA_i es el número de alimentadores no correctivos de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$), y $SPA_{ij}(k)$ es la consigna de caudal para el alimentador j ($j = 1, NA_i$) de la fuente de compuesto i . Es decir, la suma de las consignas de los caudales de los alimentadores no correctivos deberá de ser igual a la consigna de caudal de la fuente del compuesto a aplicar a los alimentadores no correctivos.

En caso de existir más de un alimentador correctivo para una determinada fuente de compuesto, la consigna de caudal $SPCF_i(k)$ de dicha fuente a aplicar a los alimentadores correctivos puede distribuirse entre ellos de forma análoga a la descrita previamente para el caso de los alimentadores no correctivos. Es decir, cumpliendo la condición:

$$\sum_{j=1}^{NAC_i} SPAC_{ij}(k) = SPCF_i(k) \quad (i = 1, n) \quad (Ec.3.3b)$$

en donde NAC_i es el número de alimentadores correctivos de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$), y $SPAC_{ij}(k)$ es la consigna de caudal para el alimentador correctivo j ($j = 1, NAC_i$) de la fuente de compuesto i . Es decir, la suma de las consignas de los caudales de los alimentadores correctivos deberá de ser igual a la consigna de caudal de la fuente del compuesto a aplicar a los alimentadores correctivos.

3.5.7 Envío de las consignas de caudal a los controladores de caudal

En el paso 7, se enviarán las consignas de caudal a los correspondientes controladores de caudal de los alimentadores. Utilizando las consignas de caudal para los alimentadores no correctivos $SPA_{ij}(k)$ ($i = 1, n ; j = 1, NA_i$), determinadas en la operación anterior, las consignas de caudal a enviar en el instante k a los correspondientes controladores de caudal de los alimentadores no correctivos, $SPCA_{ij}(k)$ ($i = 1, n ; j = 1, NA_i$), se calculan mediante las ecuaciones:

$$SPCA_{ij}(k) = SPA_{ij}(k - RA_{ij}) \quad (i = 1, n; \quad j = 1, NA_i) \quad (Ec.3.4a)$$

en donde RA_{ij} representa el retardo añadido al alimentador j ($j = 1, NA_i$) de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$). Como se ha explicado previamente en la sección 3.4.1, para los alimentadores de caudal variable que controlan los caudales de las correspondientes fuentes de compuesto, dicho retardo añadido es calculado para que el tiempo de retardo total del alimentador sea igual al tiempo de retardo MR del correspondiente lazo de control avanzado. Los alimentadores no correctivos de caudal constante no requieren la utilización de un retardo añadido.

Las consignas de caudal a enviar a los controladores de caudal de los alimentadores correctivos pueden calcularse de forma análoga a la previamente descrita para los alimentadores no correctivos. Es decir, utilizando las consignas de caudal para los alimentadores correctivos $SPAC_{ij}(k)$ ($i = 1, n ; j = 1, NAC_i$) determinadas en la operación anterior, las consignas de caudal a enviar en el instante k a los correspondientes controladores de caudal de los alimentadores correctivos, $SPCAC_{ij}(k)$ ($i = 1, n ; j = 1, NAC_i$), se calculan mediante las ecuaciones:

$$SPCAC_{ij}(k) = SPAC_{ij}(k - RAC_{ij}) \quad (i = 1, n; \quad j = 1, NAC_i) \quad (Ec.3.4.b)$$

en donde RAC_{ij} representa el retardo añadido al alimentador correctivo j ($j = 1, NAC_i$) de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$). Los alimentadores correctivos de caudal constante no requieren la utilización de un retardo añadido.

3.6 Aplicación del sistema en la industria del cemento

Un área de aplicación de la metodología general previamente descrita para sistemas de control de procesos de mezcla es la de la producción de cemento. A continuación consideraremos un ejemplo de proceso de mezcla dentro de la industria del cemento, que nos permitirá ilustrar las características más relevantes del sistema de control avanzado para la mezcla de materiales objeto de la presente tesis. El ejemplo de proceso de mezcla elegido está representado en la Figura 33 y se describe a continuación.

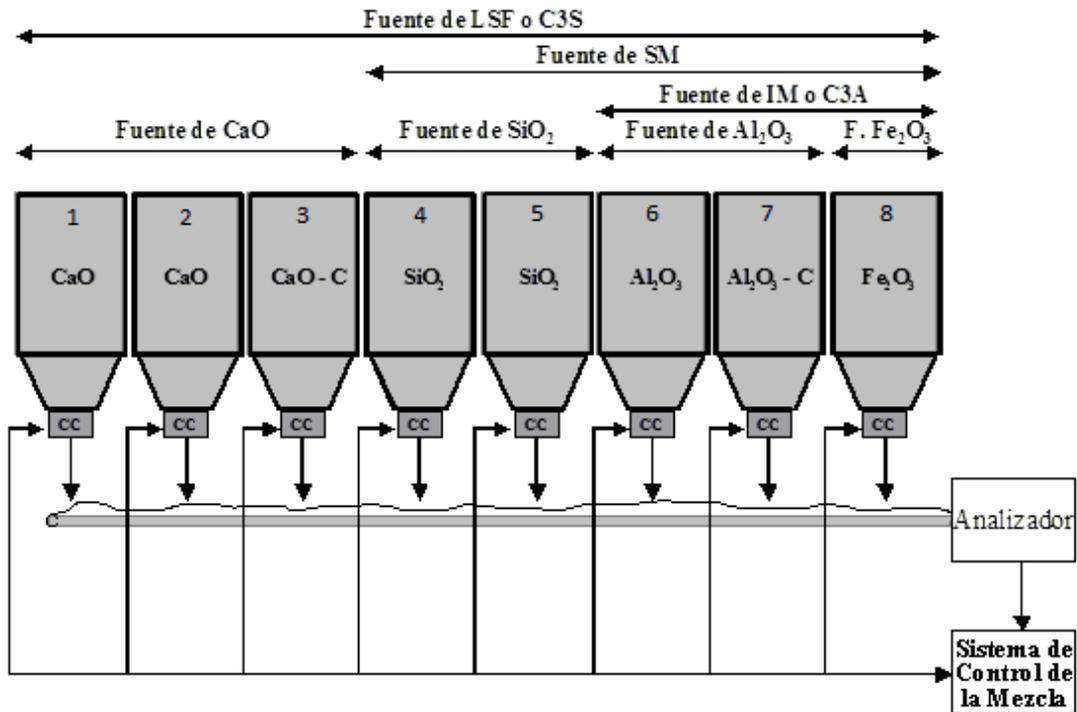


Figura 33. Ejemplo de proceso de mezcla en la industria del cemento

Los compuestos de interés en el proceso considerado que determinan la calidad de la mezcla son los óxidos de calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe). Las concentraciones de estos óxidos en la mezcla se miden con una frecuencia de un minuto, que define asimismo el período de control. De esta forma los caudales de cada una de las fuentes de los compuestos y de sus alimentadores pueden ajustarse con la frecuencia de un minuto.

Como ya se ha mencionado en el estado de la técnica anterior, los módulos de calidad de la composición de la mezcla más utilizados son generalmente el Factor de Saturación de Cal (LSF, *Limestone Saturation Factor*), el Módulo de Silicio (SM, *Silica Module*) y el Módulo de hierro (IM, *Iron Module*), que se definen por medio de ecuaciones tales como las (3.5) a (3.7). Alternativamente, los módulos C_3S y C_3A , descritos por ecuaciones tales como las (3.8) y (3.9), pueden reemplazar a LSF e IM, respectivamente.

$$LSF = \frac{100 \cdot CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,65 \cdot Al_2O_3 + 0,35 \cdot Fe_2O_3} \quad (Ec.3.5)$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (Ec.3.6)$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (Ec.3.7)$$

$$C_3S = 4,071 \cdot CaO - (7,602 \cdot SiO_2 + 6,718 \cdot Al_2O_3 + 1,43 \cdot Fe_2O_3) \quad (Ec.3.8)$$

$$C_3A = 2,65 \cdot Al_2O_3 - 1,692 \cdot Fe_2O_3 \quad (Ec.3.9)$$

3.6.1 Fuentes de compuestos y fuentes de módulos de calidad

Como se muestra en la Figura 33, el proceso de mezcla del ejemplo dispone de 8 alimentadores, que se describen a continuación.

Los alimentadores 1, 2 y 3 suministran distintos tipos de caliza con un alto contenido en CaO. Todos ellos pues son suministradores del compuesto óxido de Ca, necesario para alcanzar en la mezcla la consigna de LSF o C₃S. En consecuencia, estos tres alimentadores forman la fuente de CaO. Los alimentadores 1 y 2 son alimentadores no correctivos y el 3 es correctivo por ser de mayor contenido de CaO y tener un coste más elevado.

Los alimentadores 4 y 5 suministran distintos tipos de arena con un alto contenido en SiO₂. Los dos son pues suministradores del compuesto óxido de Si, necesario para alcanzar en la mezcla las consignas de LSF o C₃S y SM. En consecuencia, estos dos alimentadores forman la fuente de SiO₂. Ambos son alimentadores no correctivos.

Los alimentadores 6 y 7 suministran distintos tipos de marga con un cierto contenido en Al₂O₃. Los dos son pues suministradores de Al₂O₃, necesario preferentemente para alcanzar en la mezcla las consignas de SM e IM o C₃A. En consecuencia, estos dos alimentadores forman la fuente de Al₂O₃. El alimentador 6 es no correctivo. El alimentador 7 es correctivo por tener un mayor contenido de Al₂O₃ y tener un coste más elevado.

Finalmente, el alimentador 8 suministra pirita con un alto contenido en Fe₂O₃. Este alimentador es pues el suministrador de Fe₂O₃, necesario preferentemente para alcanzar en la mezcla la consigna de IM o C₃A. Este alimentador no correctivo constituye pues la fuente de Fe₂O₃.

La Figura 33 indica la pertenencia de los alimentadores a las distintas fuentes de compuestos y, asimismo, indica las fuentes de compuestos que forman las distintas fuentes de los módulos de calidad, que se describen a continuación:

- La fuente del módulo de LSF o C₃S está compuesta por las fuentes de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.
- La fuente del módulo SM está compuesta por las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

- La fuente del módulo de IM o C₃A está compuesta por las fuentes de Al₂O₃ y Fe₂O₃.

3.6.2 Secuencia de operaciones

La aplicación de los pasos 1 a 7, previamente descritos con la ayuda de la Figura 32 en la sección 3.5, a este ejemplo ilustrativo, asumiendo que los módulos de calidad elegidos son LSF, SM e IM, se describe para cada instante de control k en las siguientes operaciones.

1.a) En un primer momento, se lleva a cabo la adquisición de las medidas de las concentraciones de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en la mezcla realizadas por el analizador en línea, y el filtrado de las mismas para obtener una mejor estimación de la composición de la mezcla.

Este filtrado es necesario debido a la falta de precisión en la medida de los óxidos por parte de los analizadores, tal y como ya hemos indicado en la Tabla 3 (<http://www.thermoscientific.com>) de la sección 1.4.4, y permite la obtención de una mejor estimación del verdadero valor de dichos óxidos. El filtro utilizado para cada óxido medido, que se ejecuta en cada período de análisis, es un filtro de primer orden que responde a la siguiente ecuación:

$$\text{Valor Filtrado Nuevo} = \text{OF} \cdot \text{Valor Medido} + (1 - \text{OF}) \cdot \text{Valor Filtrado anterior} \quad (\text{Ec.3.10})$$

en donde OF (*Oxide Filter*) es la constante de filtrado. Por lo tanto, el nuevo valor filtrado es la media ponderada entre el valor medido y el valor filtrado anterior. El valor de OF se puede fijar entre 0 y 1. Cuando OF vale 1, el nuevo valor filtrado será igual al valor medido y, por lo tanto, hay confianza completa en la medición de la variable y por ello, en la práctica, no se filtrará. En sentido contrario, si el valor de

OF es igual 0, el valor de la variable filtrada no cambia nunca, es decir no hay ninguna confianza en la medición de la variable.

La utilización de este mecanismo de filtrado es por lo general muy útil cuando hay un elevado nivel de ruido y, a la vez, se dispone un número significativo de instantes de muestreo dentro de cada período de control (Nevado, Cabrera & Martín-Sánchez, 2014), (Martín-Sánchez & Rodellar, 2015). En este caso, el valor de OF se puede fijar de forma adecuada a un valor próximo a 0, obteniéndose una mejor estimación del valor verdadero de la variable a partir de la variable filtrada.

Incluso cuando hay un único periodo de análisis en cada período de control, este mecanismo de filtrado es también útil, pero teniendo muy en cuenta en este caso que el valor de OF afectará a la dinámica del lazo de control, haciendo más lentas las variaciones de la variable filtrado con respecto al verdadero valor, especialmente cuando OF sea próxima a 0.

En nuestro caso, debido al elevado ruido de medida, los valores utilizados para OF oscilan entre 0.1 y 0.4, dependiendo de la precisión proporcionada por cada analizador.

2.a) A continuación, se calcula el valor de los módulos de calidad en el instante k, LSF(k), SM(k) e IM(k), por medio de:

$$LSF(k) = \frac{100 \cdot CaO(k)}{2,8 \cdot SiO_2(k) + 1,65 \cdot Al_2O_3(k) + 0,35 \cdot Fe_2O_3(k)} \quad (Ec.3.11)$$

$$SM(k) = \frac{SiO_2(k)}{Al_2O_3(k) + Fe_2O_3(k)} \quad (Ec.3.12)$$

$$IM(k) = \frac{Al_2O_3(k)}{Fe_2O_3(k)} \quad (Ec.3.13)$$

en donde CaO(k), SiO₂(k), Al₂O₃(k) y Fe₂O₃(k), son las medidas ya filtradas de los óxidos respectivos. Si se desea, los valores de los módulos así obtenidos pueden asimismo filtrarse.

3.a) Ejecución de los lazos de control avanzado LSFLAZO, SMLAZO e IMLAZO, correspondientes a los tres módulos de calidad, tal y como se ha descrito en el paso 3, por medio de las ecuaciones:

$$PFCLSF(k) = ADEXCOP(LSFLAZO, "LSF(k)", "LSFSP(k)", "PFCLSFR(k-1)")$$

(Ec.3.14)

$$PFCSM(k) = ADEXCOP(SMLAZO, "SM(k)", "SMSP(k)", "PFCSMR(k-1)")$$

(Ec.3.15)

$$PFCIM(k) = ADEXCOP(IMLAZO, "IM(k)", "IMSP(k)", "PFCIMR(k-1)")$$

(Ec.3.16)

en donde PFCLSF(k), PFCSM(k) y PFCIM(k) son los “% de caudal de las fuentes de CaO, SiO₂ y Al₂O₃ contenidos en las de los módulos LSF, SM e IM”, respectivamente, es decir, las señales de control avanzado producidas en el instante k por los lazos de control avanzado para los módulos LSF, SM e IM; LSFSP(k), SMSP(k) y IMSP(k) son las consignas de los módulos LSF, SM e IM en la mezcla producida en el instante k, y PFCLSFR(k-1), PFCSMR(k-1) y PFCIMR(k-1) son las señales de control avanzado, correspondientes a dichos módulos, realmente aplicadas al proceso en el instante k-1.

Como ya se ha indicado en el paso 3, para calcular estas últimas señales, el sistema puede utilizar la medida de los caudales reales de las fuentes de los compuestos que el ordenador adquiere en su comunicación con los controladores de caudal. Aunque debido a la falta de precisión de los controladores de caudal, estos caudales reales también se filtran por medio de un filtro de primer orden análogo al especificado en la ecuación (3.10), aunque con una diferente constante de filtrado FrF (*Flow Rate Filter*).

4.a) Verificación de la existencia de condiciones para emitir diagnosis de deficiencia en la composición de una o varias fuentes de compuestos. Esta verificación se llevará a cabo tal y como se ha descrito previamente en el paso 4. Obviamente, se requerirán

varios instantes de control consecutivos para comprobar que estando alguna de las señales de control avanzado en uno de sus límites, superior o inferior, el correspondiente módulo de calidad no tiende a su consigna. Normalmente son cinco los períodos de control durante los que se calcula la tendencia de aproximación del módulo de calidad a su consigna.

3.6.2.1 Cálculo de las consignas de caudal

En la operación 5.a), las señales de control avanzado, previamente calculadas, por su propia definición, y por la elección hecha en este ejemplo ilustrativo de las fuentes de compuestos y de las fuentes de módulos, impondrán a los caudales a aplicar a cada una de las fuentes de los compuestos las siguientes condiciones:

$$PCFLSF(k) = 100 \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k))} \quad (Ec.3.17)$$

$$PCFSM(k) = 100 \frac{SPFSi(k)}{(SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k))} \quad (Ec.3.18)$$

$$PCFIM(k) = 100 \frac{SPFAl(k)}{(SPFAl(k) + SPFFe(k))} \quad (Ec.3.19)$$

en donde $SPFCa(k)$, $SPFSi(k)$, $SPFAl(k)$ y $SPFFe(k)$ son las consignas de los caudales de las fuentes de CaO , SiO_2 y Al_2O_3 y Fe_2O_3 en el instante k , respectivamente.

Asimismo, la ecuación (3.2), que determina que la suma de las consignas de los caudales de las distintas fuentes debe ser igual a la consigna del caudal de la mezcla, en este caso pasa a ser:

$$SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k) = SPM(k + MR) \quad (Ec.3.20)$$

en donde $SPM(k + MR)$ es la consigna del caudal de mezcla producida y MR es el retardo que se determine para los lazos de control avanzado. Es interesante hacer

notar que el caudal de la fuente del módulo LSF es igual al caudal de la mezcla producida.

Pues bien, a partir de las ecuaciones (3.17) a (3.20) se calculan las consignas de los caudales de las fuentes de los distintos compuestos. La Figura 34 muestra el detalle de cómo se calculan, en cada instante de control k , las consignas de caudal de las distintas fuentes de $\text{CaO}(k)$, $\text{SiO}_2(k)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(k)$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3(k)$, a partir de las medidas de los módulos de calidad $\text{LSF}(k)$, $\text{SM}(k)$ e $\text{IM}(k)$ calculadas en la operación 2.a).

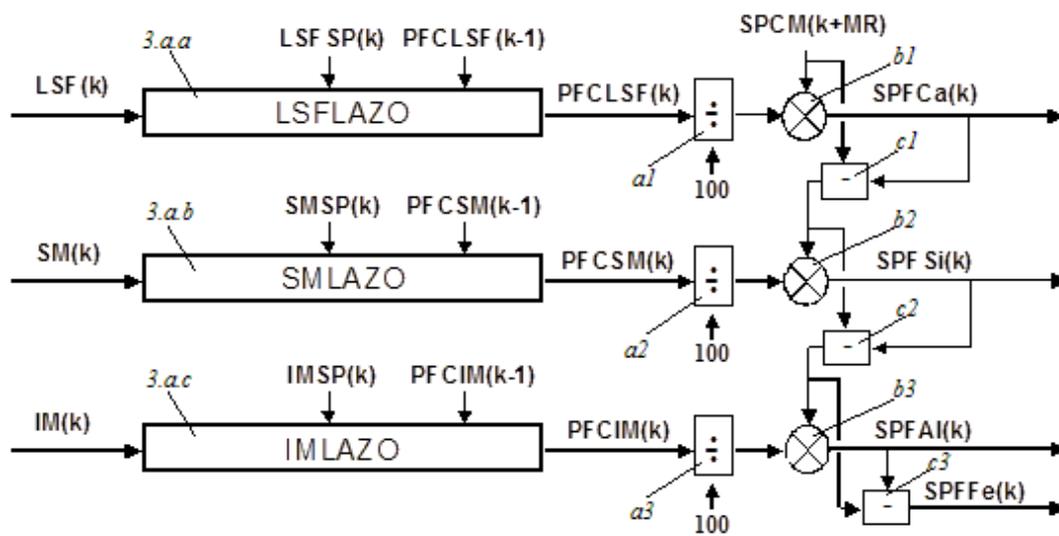


Figura 34. Cálculo de las consignas de caudal de las fuentes

Los pasos 3.a.a, 3.a.b y 3.a.c de la Figura 34 han sido descritos ya en la operación 3.a y muestran cómo los lazos de control avanzado LSFLAZO, SMLAZO e IMLAZO calculan las señales de control avanzado $\text{PFCLSF}(k)$, $\text{PFC SM}(k)$ y $\text{PFC IM}(k)$ a partir de las correspondientes consignas $\text{LSF SP}(k)$, $\text{SM SP}(k)$ y $\text{IM SP}(k)$ y de las señales de control avanzado realmente aplicadas en el instante $k - 1$, $\text{PFCLSF}(k-1)$, $\text{PFC SM}(k-1)$ y $\text{PFC IM}(k-1)$, respectivamente.

A partir de las ecuaciones (3.17) y (3.20), se deduce que la consigna de caudal de la fuente de CaO , $\text{SPFCa}(k)$, puede calcularse dividiendo la señal de control avanzada $\text{PFCLSF}(k)$ por 100, operación realizada por el divisor a_1 , y multiplicando el

resultado por la consigna del caudal de la mezcla producido $SPM(k + MR)$, operación realizada por el multiplicador a_2 . Es decir:

$$SPFCa(k) = \left(\frac{PFCLSF(k)}{100} \right) \cdot SPM(k + MR) \quad (Ec.3.21)$$

El denominador de la ecuación (3.18), es decir, $SPFSi(k) + SPFAI(k) + SPFFe(k)$, es la consigna de caudal de la fuente del módulo SM, que puede obtenerse sustrayendo al caudal de la mezcla producida $SPM(k + MR)$ la consigna de caudal $SPFCa(k)$ de la fuente de CaO, operación realizada por el diferenciador a_3 .

En consecuencia, a partir de la ecuación (3.18), la consigna de caudal $SPCFSi(k)$ de la fuente de SiO_2 puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado $PFCSM(k)$ por 100, operación realizada por el divisor b_1 , y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo SM, operación realizada por el multiplicador b_2 . Es decir:

$$SPFSi(k) = \left(\frac{PFCSM(k)}{100} \right) \cdot (SPM(k + MR) - SPFCa(k)) \quad (Ec.3.22)$$

El denominador de la ecuación (3.19), es decir, $SPFAI(k) + SPFFe(k)$, es la consigna de caudal de la fuente del módulo IM, que puede obtenerse sustrayendo a la consigna de caudal del módulo SM, $SPM(k + MR) - SPFCa(k)$, la consigna de caudal $SPFSi(k)$ de la fuente de SiO_2 , operación realizada por el diferenciador b_3 .

En consecuencia, a partir de la ecuación (3.19), la consigna de caudal $SPCFAI(k)$ de la fuente de Al_2O_3 puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado $PFCIM(k)$ por 100, operación realizada por el divisor c_1 , y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo IM, operación realizada por el multiplicador c_2 . Es decir:

$$SPFAI(k) = \left(\frac{PFCIM(k)}{100} \right) \cdot (SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k)) \quad (Ec.3.23)$$

Finalmente, para calcular la consigna de caudal $SPFe(k)$ de la fuente de Fe_2O_3 , bastará con sustraer a la consigna de caudal de la fuente del módulo de IM, $SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k)$, la consigna de caudal $SPFAl(k)$ de la fuente de Al_2O_3 , operación realizada por el diferenciador c3. Es decir:

$$SPFe(k) = (SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k) - SPFAl(k)) \quad (Ec.3.24)$$

Lo que concluye el cálculo de las consignas de los caudales de las fuentes de los compuestos.

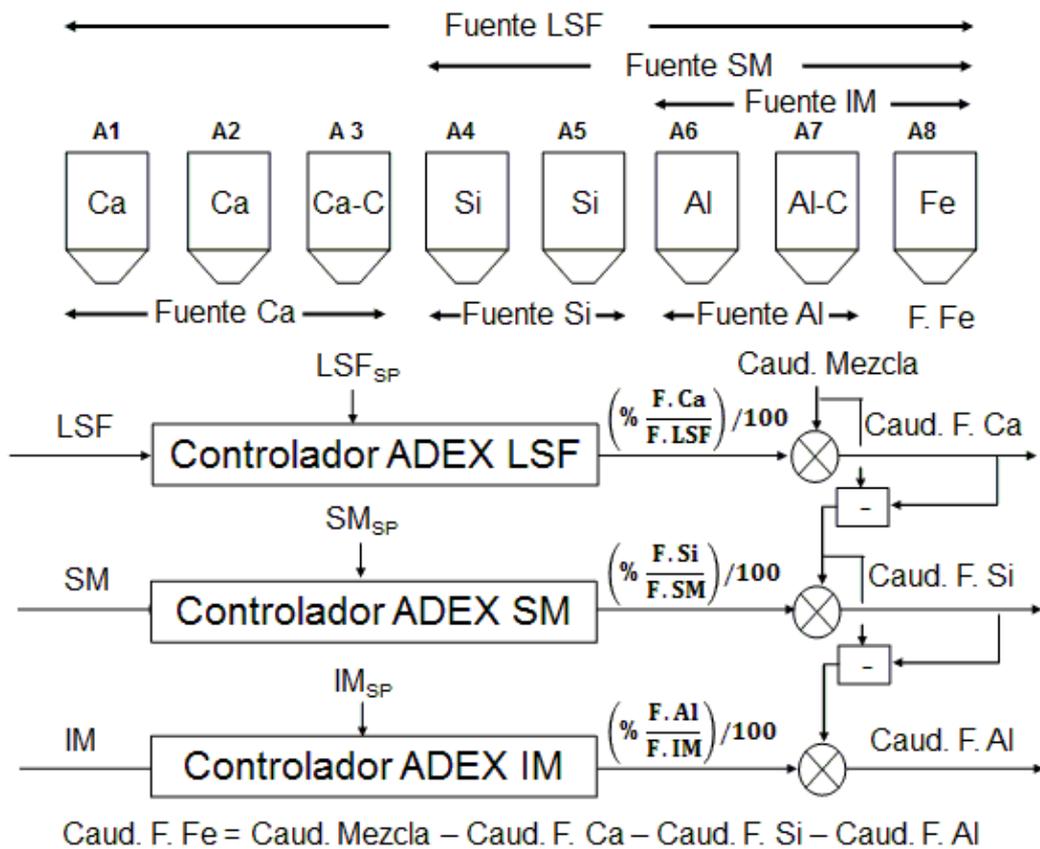


Figura 35. Aplicación del sistema en la industria el cemento

Las operaciones 6.a) y 7.a), que realizan para este ejemplo ilustrativo la distribución de las consignas de caudal de las distintas fuentes de los compuestos, entre los correspondientes alimentadores no correctivos y correctivos, y envían las consignas

de caudal a los controladores locales de caudal de los alimentadores, se llevan a cabo tal y como se ha descrito previamente en los pasos 6 y 7. La figura 35 ilustra de forma sintética la aplicación del sistema de control de la mezcla de materiales en la industria del cemento.

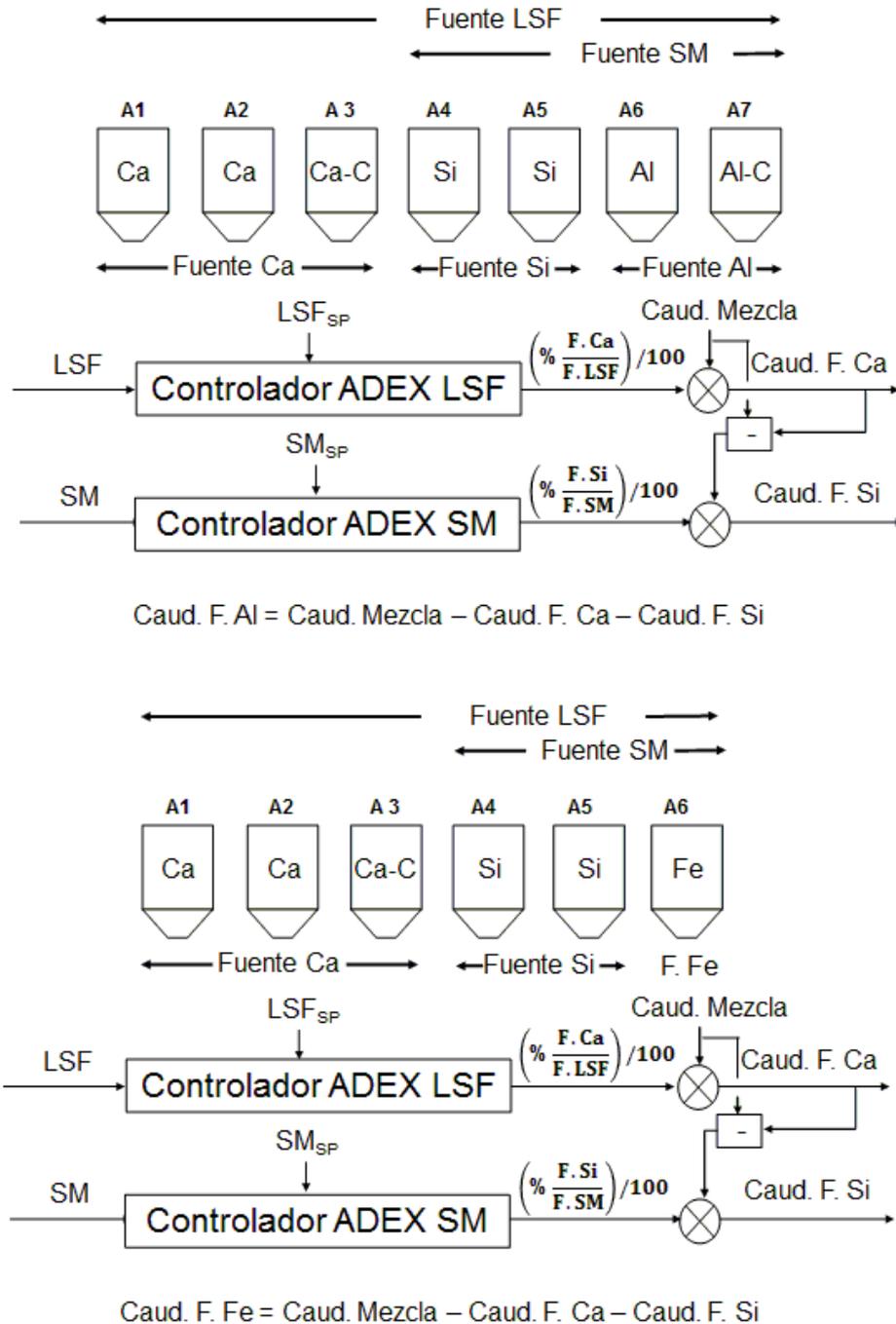


Figura 36. Control de LSF y SM

3.6.3 Control de 2 módulos

A partir de la explicación anterior, es evidente que el sistema de control también puede controlar sólo dos módulos. Así por ejemplo, para el control de LSF y SM, habría de disponerse de fuente de CaO, de SiO₂ y de fuente de Al₂O₃ ó de Fe₂O₃. Las consignas de caudal de las fuentes de CaO y SiO₂ se calculan de la misma forma que la explicada anteriormente. Adicionalmente, si se dispusiera de la fuente de Al₂O₃, sería ésta la consigna de caudal obtenida por resta, mientras que si fuera la fuente de Fe₂O₃ la disponible, sería la consigna de caudal de la fuente de Fe₂O₃ la que se hallaría por resta. La figura 36 ilustra estas dos posibilidades de control de LSF y SM.

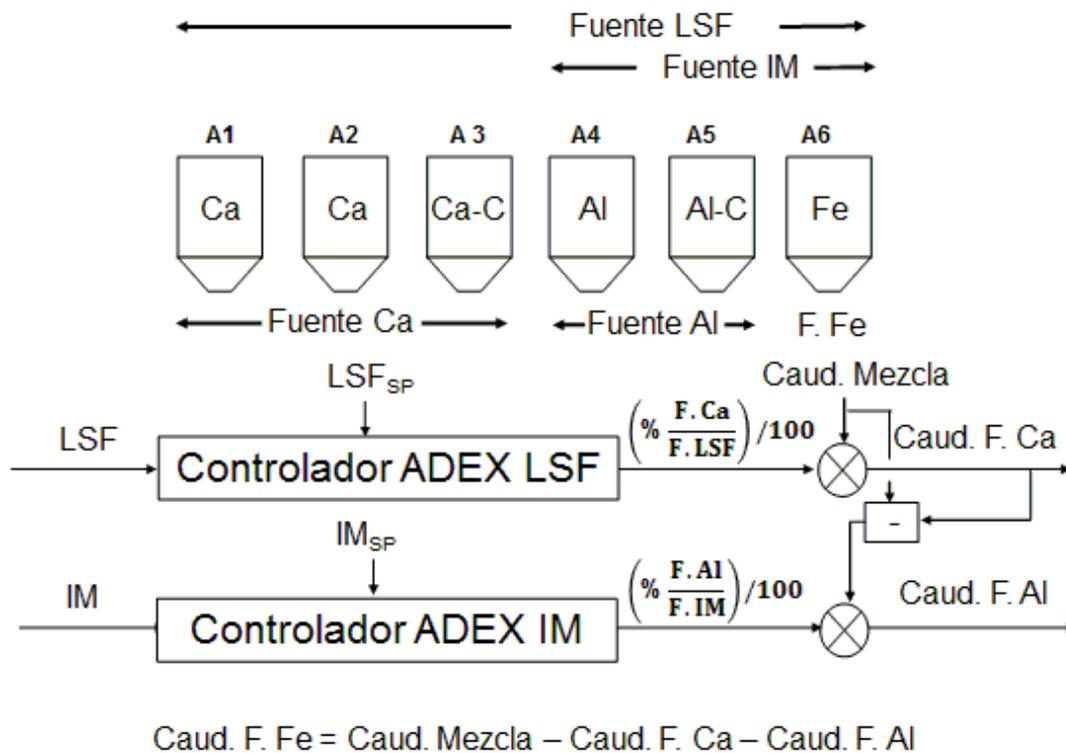


Figura 37. Control de LSF e IM

Si se deseara controlar LSF e IM, serían necesarias fuentes de CaO, Al₂O₃ y Fe₂O₃, no siendo necesaria, o no utilizándose, la fuente de SiO₂. El cálculo de la consigna de

caudal de la fuente de CaO se realizaría como se explicó anteriormente. Evidentemente, la consigna de caudal de la fuente de Al₂O₃ se halla ahora como

$$SPFAI(k) = \left(\frac{PFCIM(k)}{100} \right) \cdot (SPM(k + MR) - SPFCa(k)) \quad (Ec.3.25)$$

y la consigna de caudal de la fuente de Fe₂O₃ por resta. La Figura 37 ilustra el esquema de control de LSF e IM, que sintetiza estos mínimos cambios

El tercer caso a considerar en el control de dos módulos es el del control de SM e IM. Es un supuesto que rara vez se dará a petición de planta, ya que el LSF es el módulo de calidad fundamental a regular en la mezcla, siendo los caudales de las calizas los mayoritarios en proporción. Aun así, merece la pena considerarlo pues proporciona una posible solución al caso de atasco en la fuente de CaO.

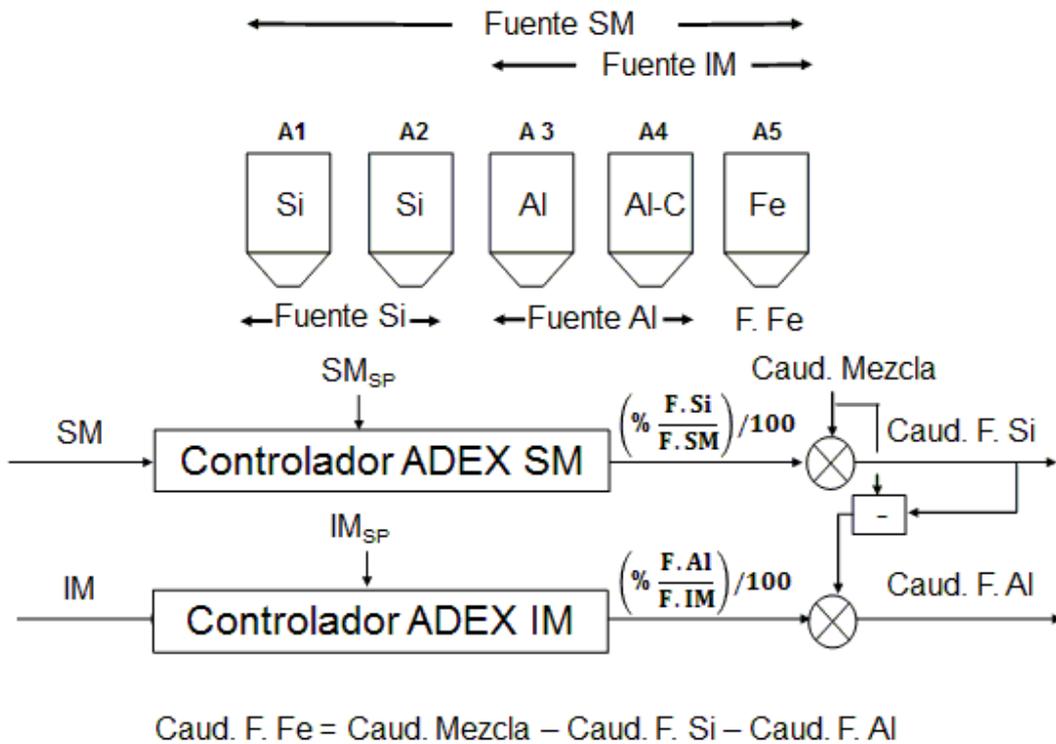


Figura 38. Control de SM e IM

En este supuesto se dispone de fuente de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, no estando presente la fuente de CaO. El cambio atañe en este caso al cálculo de la consigna de caudal de la fuente de SiO₂, que se halla directamente a partir del caudal total de la mezcla como

$$SPFSi(k) = \left(\frac{PFCSM(k)}{100} \right) \cdot SPM(k + MR) \quad (Ec.3.26)$$

hallándose las consignas de caudal de Al₂O₃ y Fe₂O₃ como en el caso general. La Figura 38 ilustra el control e SM e IM.

3.6.4 Atascos en las fuentes

No es muy infrecuente que en una planta de cemento un alimentador se atasque, es decir, que ocurra que su caudal instantáneamente se haga nulo. En esta situación, el sistema de control ha de proporcionar el mejor control posible.

Si el alimentador atascado es el único alimentador en la correspondiente fuente de compuesto, se habrá perdido dicha fuente de compuesto por completo, de manera que, al disponer de un grado de libertad menos, se podrá controlar un módulo de calidad menos. Y de acuerdo a la correspondencia biunívoca establecida anteriormente, si partimos de disponer de las cuatro fuentes de compuesto y si se atasca la fuente de CaO, el LSF deja de ser controlable, pudiendo sólo controlarse SM e IM; si se atasca la fuente de SiO₂, se deja de poder controlar el SM, siendo aun controlables, en teoría, LSF e IM, y si el atasco es en la fuente de Al₂O₃ o en la de Fe₂O₃, deja de ser controlable el IM, pudiendo aun controlarse LSF y SM.

Nuevamente, es la capacidad de adaptación de la solución propuesta la que permite atisbar la solución de forma intuitiva: cuando se produzca el atasco, bastará con pasar del esquema de control de tres módulos al esquema de control de los dos módulos correspondientes que sean controlables. Es verdad que la caída de una fuente de compuesto es una fuerte perturbación para los otros módulos de calidad aun

controlables, pero la capacidad de adaptación del sistema identificará la nueva dinámica y hará posible ese control satisfactorio.

La única salvedad a realizar, importante, es la relativa al caudal total de la mezcla. En primer lugar, al no estar disponible el caudal que aportaba la fuente que se ha atascado, es evidente que seguir manteniendo el mismo caudal total de la mezcla que antes del atasco obligaría, en algún caso, sobre todo cuando el fallo fuese en la fuente de CaO mayoritaria, a que las fuentes disponibles aumentaran de forma significativa su aportación respecto a la situación sin atasco, pudiendo, en algún caso, no mantener el mismo caudal total de la mezcla por límites físicos en algunas de las fuentes. Y en segundo lugar, un atasco es una causa sobrevenida que se espera resolver en un tiempo más o menos largo.

Es por ello, que la solución adoptada para el caudal total de la mezcla tras el atasco es la de fijarlo igual a la suma de los caudales que proporcionaban las fuentes de compuesto no atascadas antes de dicho atasco. De esta forma, se reduce el impacto de la perturbación que supone el atasco, sin perjuicio de que el operador, posteriormente, fije un caudal total para la mezcla distinto.

Por tanto, si falla la fuente de CaO en el instante k , se pasa al esquema de control de SM e IM de la Figura 38, con un caudal de mezcla total fijado para el período que dure la situación de atasco como

$$Caud.Mezcla = Caud.F.Si(k) + Caud.F.Al(k) + Caud.F.Fe(k) \quad (Ec.3.27)$$

Si se atasca la fuente de SiO₂, se pasa al esquema de control de LSF e IM de la Figura 37, con un caudal de mezcla fijado como

$$Caud.Mezcla = Caud.F.Ca(k) + Caud.F.Al(k) + Caud.F.Fe(k) \quad (Ec.3.28)$$

Y si falla la fuente de Al₂O₃ o la fuente de Fe₂O₃, se pasa al esquema de control de LSF y SM inferior o superior, respectivamente, con caudales de mezcla en estos casos

$$\text{Caud.Mezcla} = \text{Caud.F.Ca}(k) + \text{Caud.F.Si}(k) + \text{Caud.F.Fe}(k) \quad (\text{Ec.3.29})$$

$$\text{Caud.Mezcla} = \text{Caud.F.Ca}(k) + \text{Caud.F.Si}(k) + \text{Caud.F.Al}(k) \quad (\text{Ec.3.30})$$

3.6.5 Caso de fuente conductora

En ocasiones, una de las fuentes de compuesto presentes en el proceso de mezcla no se quiere o puede regular. Si en esta situación, se decide que los caudales del resto de fuentes de compuesto presentes en la mezcla se ajusten al caudal incontrolado de la fuente que no se regula al objeto de mantener los módulos de calidad en sus consignas, dicha fuente sin controlar se pasa a denominar fuente conductora del proceso de mezcla, ya que es su caudal el que “conduce” o gobierna el caudal total de la mezcla producido en cada momento, el cual, en este caso, no se puede fijar por parte del operador.

3.6.5.1 Fuente de CaO

Para ilustrar el modo de funcionamiento del sistema de control habiendo seleccionado una fuente de compuesto como fuente conductora, supuesto descrito previamente en el paso 5, basta con considerar en este ejemplo del proceso de mezcla que la fuente de CaO fuera la fuente no controlada y que se definiera como fuente conductora. En este caso a partir de las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) y sustituyendo en ellas la consigna de caudal de la fuente de CaO, SPFCa(k), por su valor medido real en el instante k, CRFCa(k), podríamos fácilmente calcular las correspondientes consignas de caudal de las otras fuentes, SPFSi(k), SPFAl(k), SPFFe(k).

En concreto, en un primer momento, a partir de la ecuación (3.17) se hallaría la consigna de caudal de la fuente del módulo de SM, SPFSi(k)+ SPFAl(k)+ SPFFe(k), despejándola en dicha ecuación, es decir:

$$SPFSM(k) = SPFSi(k) + SPFAI(k) + SPFFe(k) = \left(\frac{100 \cdot CRFCa(k)}{PFCLSF(k)} \right) - CRFCa(k) \quad (Ec.3.31)$$

en donde SPFSM(k) es la consigna de caudal de la fuente del módulo de SM, de valor SPFSi(k)+ SPFAI(k)+ SPFFe(k); y CRFCa(k) es el caudal medido real de la fuente de CaO en el instante k.

En un segundo momento, a partir de la ecuación (3.18), la consigna de caudal SPCFSi(k) de la fuente de SiO₂ puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado PFCSM(k) por 100 y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo SM, hallada en la etapa anterior. Es decir:

$$SPFSi(k) = \left(\frac{PFCSM(k)}{100} \right) \cdot SPFSM(k) \quad (Ec.3.32)$$

El denominador de la ecuación (3.19), es decir, SPFAI(k)+ SPFFe(k), es la consigna de caudal de la fuente del módulo IM, SPFIM(k), que puede obtenerse sustrayendo a la consigna de caudal del módulo SM, SPFSM(k), la consigna de caudal SPFSi(k) de la fuente de SiO₂. Es decir:

$$SPFIM(k) = SPFAI(k) + SPFFe(k) = SPFSM(k) - SPFSi(k) \quad (Ec.3.33)$$

en donde SPFIM(k) es la consigna de caudal de la fuente del módulo de IM, de valor SPFAI(k)+ SPFFe(k).

En consecuencia, a partir de la ecuación (3.19), la consigna de caudal SPFAI(k) de la fuente de Al₂O₃ puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado PFCIM(k) por 100 y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo IM. Es decir:

$$SPFAI(k) = \left(\frac{PFCIM(k)}{100} \right) \cdot SPFIM(k) \quad (Ec.3.34)$$

Finalmente, para calcular la consigna de caudal $SPF_{Fe}(k)$ de la fuente de Fe_2O_3 , bastará con sustraer a la consigna de caudal del módulo IM, $SPF_{IM}(k)$, la consigna de caudal $SPF_{Al}(k)$ de la fuente de Al_2O_3 . Es decir:

$$SPF_{Fe}(k) = SPF_{IM}(k) - SPF_{Al}(k) \quad (Ec.3.35)$$

Y de la misma forma podríamos proceder al considerar cualquiera de las otras fuentes como fuente conductora

3.6.5.2 Fuente de SiO_2

Procediendo de forma análoga para el supuesto de que la fuente de SiO_2 se declare como fuente conductora, a partir de las ecuaciones (3.17) a (3.19) anteriores, obtenemos

$$SPF_{IM}(k) = SPF_{Al}(k) + SPF_{Fe}(k) = \left(\frac{100 \cdot CRF_{Si}(k)}{PFC_{SM}(k)} \right) - CRF_{Si}(k) \quad (Ec.3.36)$$

$$SPF_{Al}(k) = \left(\frac{PFC_{IM}(k)}{100} \right) \cdot SPF_{IM}(k) \quad (Ec.3.37)$$

$$SPF_{Fe}(k) = SPF_{IM}(k) - SPF_{Al}(k) \quad (Ec.3.38)$$

$$\begin{aligned} PCF_{LSF}(k) &= 100 \cdot \frac{SPF_{Ca}(k)}{(SPF_{Ca}(k) + SPF_{Si}(k) + SPF_{Al}(k) + SPF_{Fe}(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPF_{Ca}(k)}{(SPF_{Ca}(k) + CRF_{Si}(k) + SP_{IM}(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.39)$$

$$SPF_{Ca}(k) = \frac{PCF_{LSF}(k) \cdot (CRF_{Si}(k) + SP_{IM}(k))}{PCF_{LSF}(k) - 100} \quad (Ec.3.40)$$

en donde las ecuaciones (3.37), (3.38) y (3.40) proporcionan las consignas de las fuentes de Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO , respectivamente.

3.6.5.3 Fuente de Al_2O_3

Si la fuente de Al_2O_3 , es la que se declara como conductora, las expresiones que permiten calcular las consignas de caudal de las otras fuentes, a partir de las citadas (3.17) a (3.19), son las siguientes.

$$\begin{aligned} PCFIM(k) &= 100 \cdot \frac{SPFAL(k)}{(SPFAL(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{CRFAI(k)}{(CRFAI(k) + SPFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.41)$$

$$SPFFe(k) = \frac{CRFAI(k) \cdot (100 - PCFIM(k))}{PCFIM(k)} \quad (Ec.3.42)$$

$$\begin{aligned} PCFSM(k) &= 100 \cdot \frac{SPFSi(k)}{(SPFSi(k) + SPFAL(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPFSi(k)}{(SPFSi(k) + CRFAI(k) + SPFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.43)$$

$$SPFSi(k) = \left(\frac{PCFSM(k)}{100 - PCFSM(k)} \right) \cdot (CRFAI(k) + SPFFe(k)) \quad (Ec.3.44)$$

$$\begin{aligned} PCFLSF(k) &= 100 \cdot \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAL(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + CRFAI(k) + SPFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.45)$$

$$SPFCa(k) = \left(\frac{PCFLSF(k)}{100 - PCFLSF(k)} \right) \cdot (SPFSi(k) + CRFAI(k) + SPFFe(k)) \quad (Ec.3.46)$$

en donde las ecuaciones (3.42), (3.44) y (3.46) proporcionan las consignas de las fuentes de Fe_2O_3 , SiO_2 , y CaO , respectivamente.

3.6.5.4 Fuente de Fe_2O_3

De manera similar para el caso de que la fuente de Fe_2O_3 sea fuente conductora, obtenemos.

$$\begin{aligned} PFCIM(k) &= 100 \cdot \frac{SPFAl(k)}{(SPFAl(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPFAl(k)}{(SPFAl(k) + CRFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.47)$$

$$SPFAl(k) = \left(\frac{PFCIM(k)}{100 - PFCIM(k)} \right) \cdot (CRFFe(k)) \quad (Ec.3.48)$$

$$\begin{aligned} PCFSM(k) &= 100 \cdot \frac{SPFSi(k)}{(SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPFSi(k)}{(SPFSi(k) + SPFAl(k) + CRFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.49)$$

$$SPFSi(k) = \left(\frac{PCFSM(k)}{100 - PCFSM(k)} \right) \cdot (SPFAl(k) + CRFFe(k)) \quad (Ec.3.50)$$

$$\begin{aligned} PCFLSF(k) &= 100 \cdot \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k))} = \\ &= 100 \cdot \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAl(k) + CRFFe(k))} \end{aligned} \quad (Ec.3.51)$$

$$SPFCa(k) = \left(\frac{PCFLSF(k)}{100 - PCFLSF(k)} \right) \cdot (SPFSi(k) + SPFAl(k) + CRFFe(k)) \quad (Ec.3.52)$$

en donde las ecuaciones (3.48), (3.50) y (3.52) proporcionan las consignas de las fuentes de Al_2O_3 , SiO_2 , y CaO , respectivamente.

3.6.6 Diagnóstico de deficiencias de composición

Como se ha mencionado anteriormente en el paso 4.a), para la emisión de una diagnóstico de deficiencia de composición, se han de cumplir tres condiciones:

- que la señal de control correspondiente a un módulo de calidad se encuentre en las proximidades de sus límites superior (100%) o inferior (0%);
- que el valor del módulo de calidad esté alejado de su consigna en una cierta cantidad;
- y que en esta situación, la pendiente de aproximación del módulo de calidad a su consigna, evaluada durante un determinado número de ciclos de control, sea inferior a un valor fijado.

Siempre que se cumplan estas condiciones se emitirá una diagnóstico de deficiencia de composición y, si existen alimentadores correctivos en la fuente de compuesto correspondiente, estos se utilizarán de forma incremental.

También se emitirá dicha diagnóstico cuando, a pesar de no cumplirse esas condiciones, se esté utilizando un alimentador correctivo en una alguna de las fuentes de compuesto (el cual, de acuerdo a la optimización del uso de las fuentes que lleva a cabo el sistema de control, sólo se estará utilizando porque inicialmente en algún momento se cumplieron estas condiciones de emisión de diagnóstico).

La siguiente Tabla 6 muestra, de forma resumida, todas las posibles diagnósticos que se pueden emitir en este ejemplo ilustrativo de control de LSF; SM e IM en la industria del cemento. Los valores asignados a los parámetros son los más convenientes de acuerdo a la experimentación realizada, si bien, se podrían modificar. Estos parámetros son necesarios para la formalización de las condiciones de diagnóstico, y hacen referencia al valor de la señal de control próximo a sus límites inferior o superior, a la diferencia entre el valor del módulo de calidad y su consigna, y al número de ciclos de control durante los cuales se evalúa el incremento del módulo de calidad, obteniendo así la tendencia de aproximación del módulo de calidad a su consigna.

Fuente de CaO	Módulo de Calidad	PCFLSF(k)	LSFsp(k) – LSF(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	LSF(k) – LSF(k-Ciclos)
	LSF	≥ 98%	≥ 2	5	≤ 0.5
	Diagnosis Acción	Falta de Cao en la Fuente de CaO para el LSF Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de CaO			
Fuente de SiO ₂	Módulo de Calidad	PCFLSF(k)	LSF(k) – LSFsp(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	LSF(k-Ciclos) – LSF(k)
	LSF	≤ 1%	≥ 2	5	≤ 0.5
	Diagnosis Acción	Falta de SiO ₂ en la Fuente de SiO ₂ para el LSF Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de SiO ₂			
Fuente de Al ₂ O ₃	Módulo de Calidad	PCFSM(k)	SMsp(k) – SM(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	SM(k) – SM(k-Ciclos)
	SM	≥ 98%	≥ 0.1	5	≤ 0.05
	Diagnosis Acción	Falta de SiO ₂ en la Fuente de SiO ₂ para el SM Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de SiO ₂			
Fuente de Al ₂ O ₃	Módulo de Calidad	PCFSM(k)	SM(k) – SMsp(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	SM(k-Ciclos) – SM(k)
	SM	≤ 1%	≥ 0.1	5	≤ 0.05
	Diagnosis Acción	Falta de Al ₂ O ₃ en la Fuente de Al ₂ O ₃ para el SM Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de Al ₂ O ₃			
Fuente de Fe ₂ O ₃	Módulo de Calidad	PCFIM(k)	IMsp(k) – IM(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	IM(k) – IM(k-Ciclos)
	IM	≥ 98%	≥ 0.1	5	≤ 0.05
	Diagnosis Acción	Falta de Al ₂ O ₃ en la Fuente de Al ₂ O ₃ para el IM Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de Al ₂ O ₃			
Fuente de Fe ₂ O ₃	Módulo de Calidad	PCFIM(k)	IM(k) – IMsp(k)	Ciclos Evaluación – Tendencia	IM(k-Ciclos) – IM(k)
	IM	≤ 1%	≥ 0.1	5	≤ 0.05
	Diagnosis Acción	Falta de Fe ₂ O ₃ en la Fuente de Fe ₂ O ₃ para el IM Incremento en la aplicación del alimentador correctivo de Fe ₂ O ₃			

Tabla 6. Diagnóstico de deficiencias de composición en la industria del cemento y utilización de alimentadores correctivos

Vemos por tanto, que la fuente de CaO y la de Fe₂O₃ tienen una diagnosis asociada, mientras que las fuentes de SiO₂ y la de Al₂O₃ tienen dos. Así por ejemplo, para la fuente de SiO₂, se puede decir que:

- Si a pesar de que la señal de control PCFLSF es igual o inferior a 0.1 % (es decir, para regular el LSF, se está asignando casi todo el caudal a las fuentes de compuesto que deberían dar un LSF bajo, es decir, la de SiO₂, Al₂O₃ y la de Fe₂O₃), ocurre que el LSF sigue por encima de su consigna en más de 2 unidades, y además la tendencia de aproximación en los últimos 5 ciclos de control es inferior a 0.5 unidades cada cinco ciclos, es claro que las fuentes del módulo LSF menos la fuente de compuesto asociado al LSF (que es la de CaO), es decir, las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y la de Fe₂O₃ proporcionan un LSF que no es suficientemente bajo. Sin embargo, la de mayor influencia cuantitativa en el módulo, y la principal responsable de hacer bajar el LSF es de la fuente de SiO₂ mediante su contenido en SiO₂; por ello la diagnosis desplegada es de *“Falta de SiO₂ en la Fuente de SiO₂ para el LSF”*.

- Por otro lado, la fuente de SiO₂ tiene otra posible diagnosis asociada en relación con el SM. Es decir, si a pesar de que la señal de control PCFSM es igual o superior al 95% (es decir, para regular el SM, se está asignando casi todo el caudal a la fuente de compuesto que debe aportar un SM alto, la de SiO₂), ocurre que el SM sigue por debajo de su consigna en más de 0.02 unidades, y además la tendencia de aproximación en los últimos 5 ciclos de control es inferior a 0.05 unidades cada cinco ciclos, es claro que la fuente de compuesto asociado al SM (que es la de SiO₂), proporciona un SM que no es suficientemente alto. Por ello la diagnosis desplegada es de *“Falta de SiO₂ en la Fuente de SiO₂ para el SM”*.

La ocurrencia de una u otra diagnosis puede ayudar al operador a tomar una decisión sobre el material que se esté utilizando como principal aportador de SiO₂ o sobre la consigna de LSF o SM que se está fijando en el proceso.

El análisis explicativo de las diagnosis correspondientes a las otras fuentes es equivalente al realizado para la fue de SiO₂.

3.6.6.1 Aplicación de alimentadores correctivos

Tal y como ya se mencionó en la sección 3.5.6.1, la estrategia de incremento en la utilización de los alimentadores correctivos se corresponde con la ocurrencia de las condiciones anteriores de diagnosis especificadas en la en la Tabla 6. Para la aplicación de los alimentadores correctivos, se divide la consigna de caudal calculado $SPFi(k)$ para la fuente del compuesto en cuestión en dos partes. La primera parte $SPNCFi(k)$ a aplicar a los alimentadores de la fuente de compuesto no correctivos y la segunda parte $SPCFi(k)$ a aplicar al alimentador o alimentadores correctivos. Dicha segunda parte se calcula como un porcentaje (“*CorrectionRate*”) de la consigna del caudal calculado para la fuente del compuesto.

Así, siguiendo con el ejemplo de la fuente de SiO_2 explicado en la sección anterior, el incremento de los alimentadores correctivos disponibles en dicha fuente de compuesto se lleva a cabo de la siguiente forma

$$SPCFSi(k) = SPCFSi(k-1) + SPFSi(k) \cdot CRFSi \quad (Ec.3.53)$$

$$SPNCFSi(k) = SPFSi(k) - SPCFSi(k) \quad (Ec.3.54)$$

en donde $SPFSi(k)$ es la consigna de caudal de la fuente de SiO_2 , $CRFSi$ es el porcentaje de la consigna de caudal calculada para la fuente de SiO_2 que será demandada de los alimentadores correctivos, es un valor que se fija entre el 1% y el 5%, $SPCFSi(k)$ es el caudal a aplicar a los alimentadores correctivos y $SPNCFSi(k)$ el correspondiente a los no correctivos. De esta forma, la estrategia de aplicación de alimentadores correctivos lo que hace es “*sustituir*” caudal de los alimentadores no correctivos por caudal de los correctivos.

La estrategia de decremento en la utilización de los alimentadoras correctivos requiere

- que el módulo de calidad en cuestión alcance la consigna y se mantenga en un entorno suficientemente cercano a la misma, y
- que al mismo tiempo la correspondiente señal de control avanzado se aleje suficientemente del límite absoluto correspondiente a la diagnosis.

La comprobación de que el módulo de calidad está en consigna se realiza calculando la media de los valores de dicho módulo durante un período de evaluación. La Tabla 7 muestra los valores asignados a estos parámetros de reducción en la aplicación de los alimentadores correctivos.

Fuente de CaO	Módulo de Calidad	Recuperación PCFLSF(k)	Media de $ \text{LSF}_{\text{sp}}(k) - \text{LSF}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	LSF	$\leq 96\%$	≤ 1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de CaO			
Fuente de SiO ₂	Módulo de Calidad	Recuperación PCFLSF(k)	Media de $ \text{LSF}(k) - \text{LSF}_{\text{sp}}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	LSF	$\geq 2\%$	≤ 1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de SiO ₂			
	Módulo de Calidad	Recuperación PCFSM(k)	Media de $ \text{SM}_{\text{sp}}(k) - \text{SM}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	SM	$\leq 96\%$	≤ 0.1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de SiO ₂			
Fuente de Al ₂ O ₃	Módulo de Calidad	Recuperación PCFSM(k)	Media de $ \text{SM}(k) - \text{SM}_{\text{sp}}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	SM	$\geq 2\%$	≤ 0.1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de Al ₂ O ₃			
	Módulo de Calidad	Recuperación PCFIM(k)	Media de $ \text{IM}_{\text{sp}}(k) - \text{IM}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	IM	$\leq 96\%$	≤ 0.1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de Al ₂ O ₃			
Fuente de Fe ₂ O ₃	Módulo de Calidad	Recuperación PCFIM(k)	Media de $ \text{IM}(k) - \text{IM}_{\text{sp}}(k) $	Ciclos Evaluación Media
	IM	$\geq 2\%$	≤ 0.1	5
	Acción Reducción en la aplicación del Alimentador Correctivo de Fe ₂ O ₃			

Tabla 7. Condiciones para la reducción de la utilización de alimentadores correctivos

Cumpléndose estas condiciones para la reducción de la utilización de los alimentadores correctivos, ésta se realiza de la misma forma incremental que el aumento, es decir:

$$SPCFSi(k) = SPCFSi(k-1) - SPFSi(k) \cdot CRFSi \quad (Ec.3.55)$$

$$SPNCFSi(k) = SPFSi(k) - SPCFSi(k) \quad (Ec.3.56)$$

3.6.7 Control de C₃S, SM y C₃A

En el caso de que los módulos elegidos para definir la calidad deseada en la mezcla hubieran sido C₃S, SM y C₃A, el sistema se aplica de la forma descrita previamente para los módulos de calidad LSF, SM e IM, con las siguientes modificaciones.

En el paso 2.a), las ecuaciones (3.11) y (3.13) correspondientes al LSF e IM deberían ser sustituidas por las siguientes:

$$C_3S(k) = 4,071 \cdot CaO(k) - (7,602 \cdot SiO_2(k) + 6,718 \cdot Al_2O_3(k) + 1,43 \cdot Fe_2O_3(k)) \quad (Ec.3.57)$$

$$C_3A(k) = 2,65 \cdot Al_2O_3(k) - 1,692 \cdot Fe_2O_3(k) \quad (Ec.3.58)$$

En el paso 3.a), las ecuaciones (3.14) y (3.16) deberían ser sustituidas por las siguientes:

$$PFCC3S(k) = ADEXCOP(C3SLAZO, "C3S(k)", "C3SSP(k)", "PFCC3SR(k-1)") \quad (Ec.3.59)$$

$$PFCC3A(k) = ADEXCOP(C3ALAZO, "C3A(k)", "C3ASP(k)", "PFCC3AR(k-1)") \quad (Ec.3.60)$$

en donde PFCC3S(k) y PFCC3A(k) son los % de caudal de las fuentes de CaO y Al₂O₃ en las de los módulos C₃S y C₃A, respectivamente, es decir, las señales de control avanzado producidas en el instante k por los lazos de control avanzado para los módulos C₃S y C₃A. El resto de los argumentos que utiliza la herramienta

software de control avanzado en las ecuaciones (3.55) y (3.56) tienen un significado equivalente al definido en (3.14) y (3.16) para los módulos LSF e IM.

Por último en la operación 5.a) las ecuaciones (3.17) y (3.19) deben ser sustituidas por las siguientes:

$$PCFC3S(k) = 100 \frac{SPFCa(k)}{(SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAl(k) + SPFFe(k))} \quad (Ec.3.61)$$

$$PCFC3A(k) = 100 \frac{SPFAl(k)}{(SPFAl(k) + SPFFe(k))} \quad (Ec.3.62)$$

La figura 39 ilustra de forma sintética la aplicación del sistema de control de la mezcla de materiales en la industria del cemento al control de C_3S , SM y C_3A .

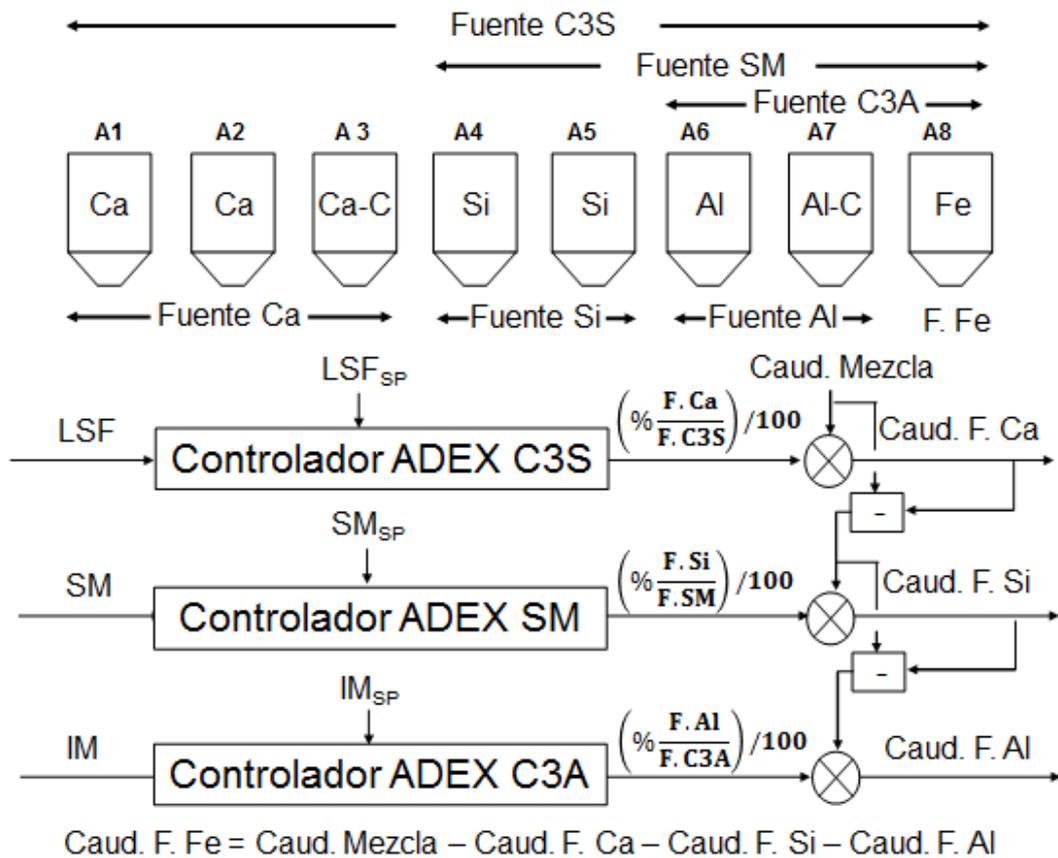


Figura 39. Control de C_3S , SM y C_3A

Capítulo 4

INTEGRACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL *MIX ADEX CONTROLLER*

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la implementación del sistema de control avanzado para la mezcla de materiales objeto de la presente tesis para el caso de su aplicación a la mezcla de materiales en la industria del cemento. El sistema de control avanzado para este supuesto del cemento se denomina MAC (*Mix ADEX Controller*) y ha sido implementado como un Servidor ActiveX, habiendo denominado MAC.exe a este servidor. Ha sido programado en el lenguaje de programación C++ (Stroustrup, 2013), (Gottfried, 2010) empleando la herramienta de programación Microsoft Visual C++ 6.0 (Ceballos, 2007), (Ceballos, 2008). En la primera parte del capítulo se describe su interfaz, tal y como ha sido definida y especificada, detallándose la jerarquía de objetos que componen la interfaz y las propiedades, métodos y eventos de cada uno de ellos.

Por otra parte, se ha desarrollado una interfaz gráfica de configuración para el controlador del sistema, que se describe en la segunda parte del capítulo. Esta interfaz ha sido programada empleando la herramienta Visual C++, al igual que se ha hecho con el servidor MAC.exe. Esta interfaz gráfica de configuración comunica con el Servidor MAC.exe a través de la interfaz del propio Servidor MAC.exe, la cual fue ideada precisamente con este objetivo, que esté abierta a cualquier aplicación que soporte DCOM. En particular, la simulación del proceso de mezcla de la industria del cemento desarrollada en Visual C++, a la que nos referiremos en el Capítulo 5, también emplea esta interfaz para comunicar con MAC.exe, pero otras posibles simulaciones del proceso de mezcla desarrolladas, por ejemplo, en Matlab (The Mathworks, Inc, 2015), también podrían comunicar con el servidor MAC.exe ya que Matlab es otra de las muchas aplicaciones que soporta DCOM.

En la parte final del capítulo se describe cómo el servidor MAC.exe comunica con la plataforma software ADEXCOP v.1 (ADEXCOP, 2015), para la creación y ejecución de los lazos de control correspondientes al LSF, SM, IM, C₃S y C₃A, describiéndose además cómo quedan configurados estos controladores ADEX de LSF, SM, IM, C₃S y C₃A.

4.2 Integración del MAC en una planta industrial

La Figura 40 ilustra la integración del sistema MAC en una planta industrial de cemento, así como los flujos de información. El analizador PGNAA comunica las medidas de los porcentajes de los óxidos en la mezcla al sistema local de control cada período de análisis. El sistema local de control también recibe de los controladores de campo los caudales actualmente aplicados en las fuentes. Ambas informaciones son pasadas por el sistema de control local al servidor MAC.exe, el cual ejecuta los cálculos de control, y devuelve al sistema de control local los nuevos caudales demandados de cada fuente. Éste se encargará de pasar dichas consignas a los controladores de caudal de campo, para que sean efectivamente aplicadas.

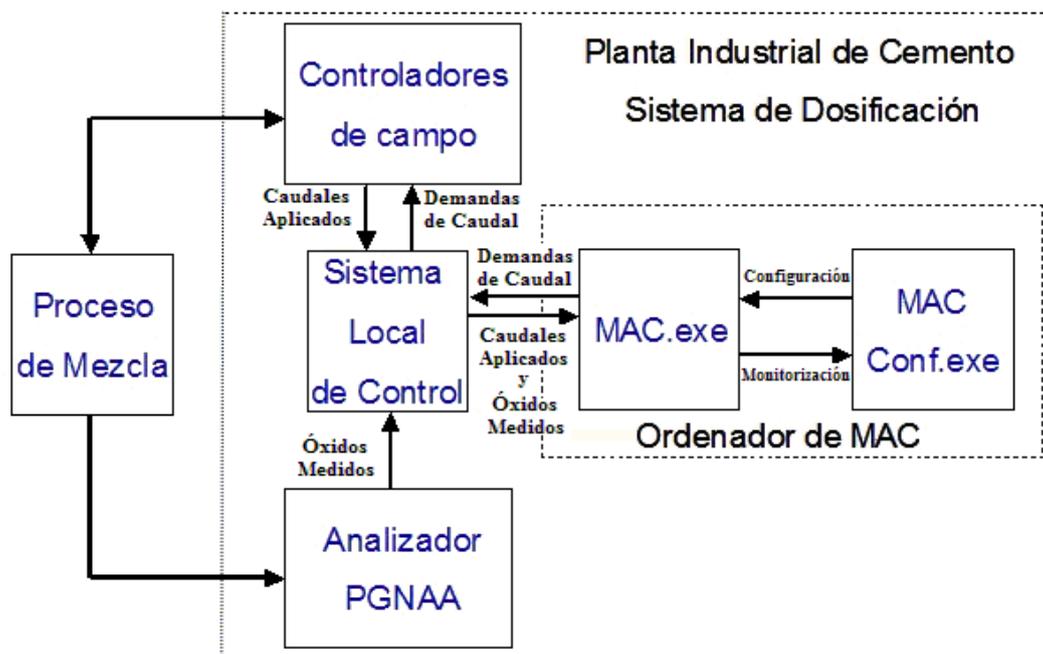


Figura 40. Integración del MAC en una planta industrial real

La comunicación entre el sistema de control local y el servidor MAC.exe podrá implementarse, bien vía ActiveX, bien vía OPC (OLE for Process Control), siendo más recomendada esta última opción, por tratarse de un estándar industrial. La interfaz gráfica del servidor MAC.exe, denominada MACConf.exe en la Figura 40, permite la configuración de las variables de estructura del citado servidor, y

asimismo también permite la monitorización de ciertas variables del proceso. Las dos secciones siguientes desarrollan estos aspectos mencionados.

4.3 Diseño del software de control del MAC

Como ya hemos indicado, en relación con el servidor ActiveX que implementa el sistema MAC, hemos denominado MAC.exe a este servidor. Ha sido programado en el lenguaje de programación C++ empleando la herramienta de programación Microsoft Visual C++. Su interfaz ha sido definida y especificada tal y como se indica en la siguiente sección, en la cual se detalla la jerarquía de objetos que componen la interfaz y las propiedades, métodos y eventos de cada uno de ellos.

La estructura fundamental de esta interfaz es la siguiente:

- 1) El objeto superior de la citada jerarquía es el llamado “Control Object”, que es el único objeto que un cliente puede crear en la interfaz del MAC.exe. Los demás objetos del MAC.exe son accesibles a través de él. Este “Control Object” tiene una serie de Propiedades (Pause, ManualPause, PauseReason, PauseReasonIndex, AnalysisPeriod, ControlPeriod y MAC_on), Métodos (Execute) y Eventos (OnDiagnosticEvent(long Id, string Message)).
- 2) Se definen tres tipos de objetos más, Module, Source y Oxide. El objeto Module representa uno de los módulos de calidad de la mezcla a ser controlados, el objeto Source una de las fuentes de compuesto del proceso de mezcla y el objeto Oxide uno de los óxidos a tener en cuenta en la composición de la mezcla, teniendo cada uno de estos tipos de objetos sus propias propiedades y métodos.
- 3) A partir de estos objetos se crean tres Colecciones, la colección Modules de objetos Module, la colección Sources de objetos Source y la colección Composition de objetos Oxide. La primera de ellas contiene cinco objetos Module correspondientes a los cinco módulos de calidad de la mezcla, siendo accesibles por clave (LSF, SM, IM, C3S y C3A); la segunda contiene cuatro objetos Source, que

corresponden a los cuatro tipos de fuentes de compuesto que considera la estrategia del MAC, siendo accesibles por clave (Ca, Si, Al, Fe); la tercera colección comprende cuatro objetos del tipo Oxide, correspondiente a los cuatro óxidos de la mezcla cuyas medidas nos interesan para calcular los módulos de calidad, también identificados por clave, Ca, Si, Al y Fe. Estas tres colecciones son accesibles también desde el objeto superior de la jerarquía, el objeto “Control Object”.

A continuación, exponemos en detalle la jerarquía de objetos de esta interfaz.

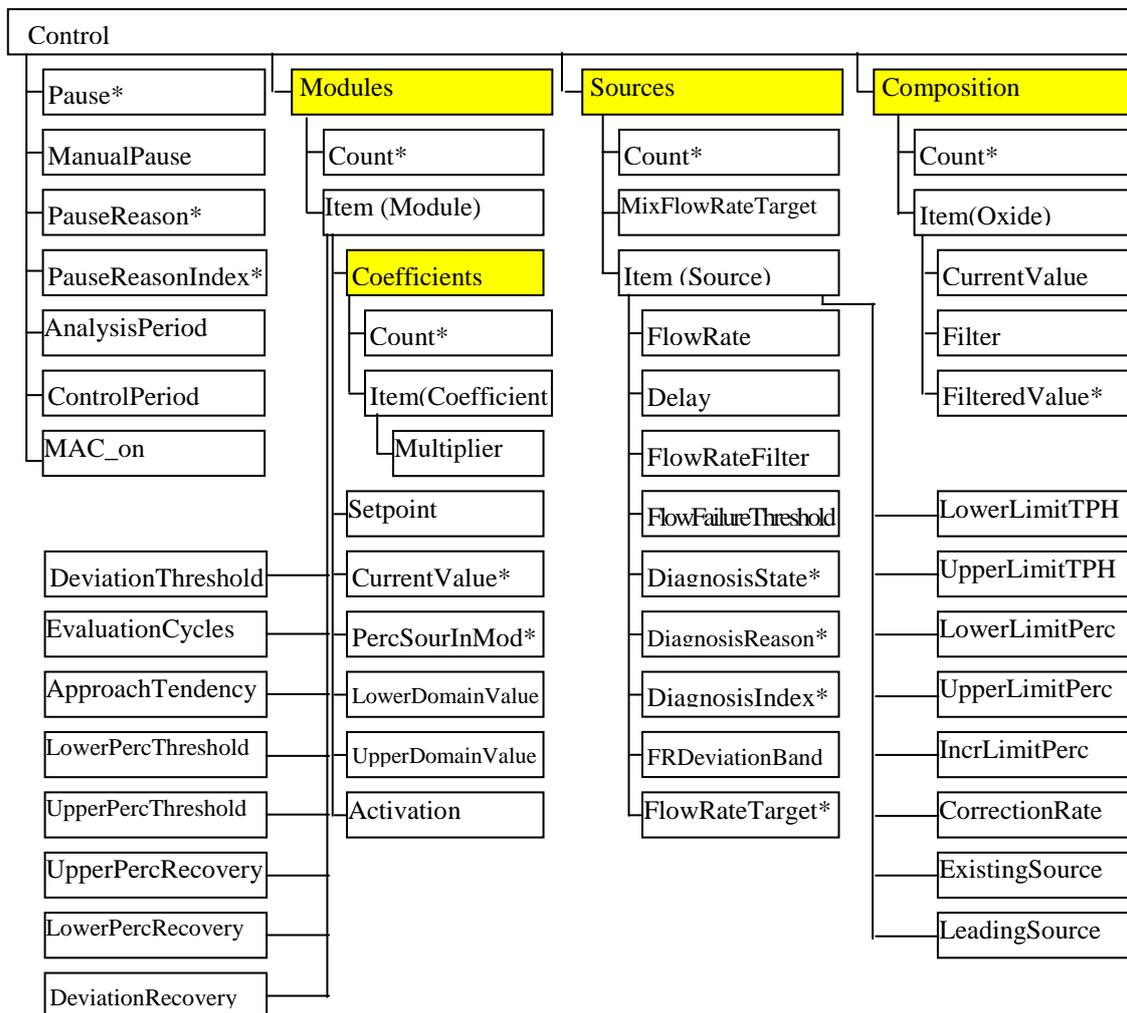


Figura 41. Jerarquía de objetos de la interfaz del MAC

4.3.1 Jerarquía de objetos de la interfaz

Debido a que MAC se ha implementado como un servidor ActiveX con interfaz dual, cualquier aplicación orientada a componentes puede utilizarla. Esta sección describe los objetos que configuran la interfaz de este servidor.

La Figura 41 muestra la jerarquía de los objetos de la interfaz. Las propiedades de los objetos de esta estructura tienen un valor por defecto que puede ser accedido y modificado, si es posible, por cualquier cliente. La caja de cada objeto dentro de la Figura 41 contiene el nombre del objeto. Los objetos marcados con un asterisco pueden ser leídos, pero no escritos. Los restantes pueden ser leídos y escritos. Describimos a continuación los objetos de la jerarquía.

4.3.1.1 Objeto Control

Es el único objeto que puede crear un cliente. Los demás objetos dentro del servidor, son accesibles a través de él.

- **Propiedades**

Las propiedades del objeto Control son las colecciones Modules, Sources y Composition, descritas las tres más adelante; posee además las siguientes:

Pause

_Booleana. Indica si el sistema de control está en pausa (true) o no (false). Sólo lectura.

ManualPause

_Booleana. Se fija a true por el cliente para ir a estado de pausa manual y a false para salir de dicho estado. Este flag se fija a true siempre que el sistema de control es arrancado. Lectura-escritura.

PauseReason

_String. Contiene la razón por la cual el sistema de control llegó al estado de pausa. Sólo lectura.

PauseReasonIndex

_Long. Representa un entero asociado a la string que esté tomando la propiedad PauseReason en ese momento. Cero significa que no hay pausa. Sólo lectura.

AnalysisPeriod

_Long. Tiempo máximo en segundos entre dos llamadas al método Execute. El Sistema de Control pasará a estado de pausa siempre que este valor sea sobrepasado. Lectura-escritura.

ControlPeriod

_Integer. Determina el tiempo entre dos acciones de control generadas por el MAC. Es un múltiplo del AnalysisPeriod. Lectura-escritura.

MAC_On

_Booleana. Es una variable que vale true cuando la comunicación entre el sistema local y MAC está establecida y funciona correctamente, en caso contrario toma el valor false. Lectura-escritura.

- Métodos

Execute

Hace que el servidor de control calcule los siguientes caudales que se deben aplicar en las fuentes. El cliente debe introducir la composición más reciente que provenga del analizador en la propiedad CurrentValue de cada objeto Oxide antes de llamar ese método. Después de llamar a Execute, los nuevos caudales a ser aplicados en las fuentes estarán disponibles en la propiedad FlowRateTarget de cada objeto Source.

- Eventos

OnDiagnosticEvent (long Id, string Message)

Este evento es enviado por el sistema de control siempre que ocurra un diagnostico relacionado con una fuente o cuando el sistema pase a estado de pausa. Id es el identificador del texto contenido en el Message. Message contiene la razón por la que el evento fue enviado. Si se debió a una deficiencia de composición, comienza con la clave de la fuente entre “[]”.

4.3.1.2 Colección Modules y objeto Module

Modules es una colección de objetos Module, los cuales están relacionados con los módulos de calidad que determinan la composición química de la mezcla. Esta colección siempre tiene cinco objetos Module, identificados por las siguientes claves: LSF, SM, IM, C3S y C3A.

La colección Modules tiene dos propiedades:

Count

_Long. Número de objetos en la colección. Sólo lectura. Su valor es siempre 5.

Item(Key)

_Devuelve una referencia al correspondiente objeto Module. La clave debe ser una de las strings “LSF”, “SM”, “IM”, “C3S”, “C3A”.

El Objeto Module representa uno de los módulos de calidad de la mezcla que ha de ser controlado.

- Propiedades

Coefficients

_Colección de objetos Coefficient descritos más adelante.

Setpoint

_Double. Setpoint del módulo de calidad que se ha de alcanzar en la mezcla.

Lectura-escritura.

CurrentValue

_Double. Último valor del módulo de calidad calculado por el servidor a partir del análisis filtrado. Sólo lectura.

PercSourInMod

_Double. Es la señal de control del lazo ADEX del módulo de calidad. Sólo lectura.

LowerDomainValue

_Double. Valor inferior del dominio de operación del módulo de calidad. Lectura-escritura.

UpperDomainValue

`_Double`. Valor superior del dominio de operación del módulo de calidad. Lectura-escritura.

Activation

`_Boolean`. Se fija a `true` por el cliente para controlar el módulo de calidad y a `false` para no controlarlo. Lectura-escritura.

DeviationThreshold

`_Double`. Desviación entre el setpoint del módulo y su valor actual que es tenida en cuenta en las condiciones de diagnóstico. Lectura-escritura. En caso de diagnóstico, se fija el flag `DiagnosisState` del objeto `Source` correspondiente.

EvaluationCycles

`_Integer`. Número de períodos de control en los cuales se calcula la tendencia del módulo de calidad, con el objeto de activar o no el flag `SourceDiagnosis`. Lectura-escritura.

ApproachTendency

`_Double`. Umbral que se aplica a la tendencia del módulo de calidad en las condiciones de diagnóstico. Lectura-escritura.

LowerPercThreshold

`_Double`. Umbral inferior que se aplica a la señal de control del lazo ADEX del módulo de calidad, dentro de las condiciones de diagnóstico. Lectura-escritura.

UpperPercThreshold

`_Double`. Umbral superior que se aplica a la señal de control del lazo ADEX del módulo de calidad, dentro de las condiciones de diagnóstico. Lectura-escritura.

DeviationRecovery

`_Double`. Desviación entre el setpoint del módulo y su valor actual que es tenida en cuenta en las condiciones de reducción de la utilización de un alimentador correctivo, cuando se está aplicando un alimentador correctivo. Lectura-escritura.

LowerPercRecovery

`_Double`. Umbral inferior que se aplica a la señal de control del lazo ADEX del módulo de calidad que es tenido en cuenta en las condiciones de reducción de la

utilización de un alimentador correctivo, cuando se está aplicando un alimentador correctivo. Lectura-escritura.

UpperPercRecovery

_Double. Umbral superior que se aplica a la señal de control del lazo ADEX del módulo de calidad que es tenido en cuenta en las condiciones de reducción de la utilización de un alimentador correctivo, cuando se está aplicando un alimentador correctivo. Lectura-escritura.

- Métodos

Ninguno.

4.3.1.3 Colección Sources y objeto Source

Sources es una colección de objetos Source con los que trabaja el servidor. Esta colección siempre tiene cuatro objetos Source, identificados por las siguientes claves: Ca, Si, Al, Fe.

La colección Sources tiene tres propiedades:

Count

_Long. Número de objetos de la colección. Sólo lectura. Su valor es siempre 4.

Item(Key)

_Devuelve una referencia a la fuente de compuesto especificada. La clave debe ser una de las strings “Ca”, “Si”, “Al”, “Fe”.

MixFlowRateTarget

_Double. Caudal total de la mezcla deseado, fijado por el operador en TPH. Lectura-escritura.

El objeto Source representa a cada una de las fuentes de compuesto presentes en el proceso de mezcla.

- Propiedades

FlowRate

`_Double`. Caudal medido de esta fuente en TPH. Lectura-escritura. Esta propiedad se debe actualizar siempre que el caudal cambie.

`Delay`

`_Long`. Tiempo de retardo entre la fuente y el analizador en segundos. Cuando una fuente tenga varios alimentadores, el retardo de la fuente será igual al retardo del alimentador variable. Lectura-escritura.

`FlowRateFilter`

`_Double`. Constante de filtro de primer orden que se aplica a las medidas de caudal recibidas. Lectura-escritura.

`FlowFailureThreshold`

`_Double`. Umbral en TPH que determina un fallo de caudal en una de la fuente. Lectura-escritura.

`DiagnosisState`

`_Booleana`. Flag que indica si existe una deficiencia de composición química en la fuente (en el sentido de que el contenido del elemento para el cual la fuente es la principal suministradora, no es suficiente para alcanzar el objetivo de control) o si existe una desviación significativa del caudal de la fuente con respecto a la demanda pedida. Sólo lectura. Como ya se ha dicho, este flag es activado dependiendo de las condiciones de `Diagnosis`, las cuales vienen determinadas por las propiedades `DeviationThreshold`, `EvolutionCycles`, `ApproachTendency`, `LowerPercThreshold` y `UpperPercThreshold`.

`DiagnosisReason`

`_String`. Describe la causa de la diagnosis. Sólo lectura.

`DiagnosisIndex`

`_Long`. Índice asociado a cada diagnosis. Sólo lectura.

`FRDeviationBand`

`_Double`. Umbral que determina si el caudal medido presenta una desviación significativa respecto de la demanda establecida por MAC. Lectura-escritura.

`FlowRateTarget`

_Double. Señal de control de caudal en TPH que ha de ser enviada al controlador de caudal de la fuente. Sólo lectura.

LowerLimitTPH

_Double. Mínimo caudal en TPH que se puede aplicar a esta fuente. Lectura-escritura.

UpperLimitTPH

_Double. Máximo caudal en TPH que se puede aplicar a esta fuente. Lectura-escritura.

LowerLimitPerc

_Double. Mínimo caudal en porcentaje del total que se puede aplicar a esta fuente. Lectura-escritura.

UpperLimitPerc

_Double. Máximo caudal en porcentaje del total que se puede aplicar a esta fuente. Lectura-escritura.

IncrLimitPerc

_Double. Máximo valor absoluto para el incremento de caudal en un período de control. En porcentaje con respecto al caudal total de la mezcla. Lectura-escritura.

CorrectionRate

_Double. Porcentaje del setpoint de caudal calculado por MAC para la fuente de compuesto que será demandado del alimentador correctivo. Lectura-escritura.

ExistingSource

_Boolean. Se fija a true por el cliente para declarar la existencia de esta fuente de compuesto en el proceso de mezcla. Lectura-escritura.

LeadingSource

_Boolean. Se fija a true por el cliente para declarar que se establece esta fuente de compuesto como fuente conductora. Lectura-escritura.

- Métodos

Ninguno.

4.3.1.4 Colección **Composition** y objeto **Oxide**

Composition es una colección de objetos Oxide, los cuales están relacionados con los óxidos presentes en la mezcla y determinan su composición química. Esta colección siempre tiene cuatro objetos Oxide, identificados por las siguientes claves: Ca, Si, Al y Fe.

La colección Composition tiene dos propiedades:

Count

_Long. Número de objetos en la colección. Sólo lectura. Su valor es siempre 4.

Item(Key)

_Devuelve una referencia al óxido especificado. La clave ha de ser una de las strings "Ca", "Si", "Al", "Fe".

El objeto Oxide representa uno de los óxidos en la mezcla.

- **Propiedades**

CurrentValue

_Double. Última medición del porcentaje del óxido. Lectura-escritura.

Filter

_Double. Constante de filtro empleada para filtrar las mediciones de los porcentajes de los óxidos que vienen del analizador. Lectura-escritura.

FilteredValue

_Double. Último valor filtrado del porcentaje del óxido. Sólo lectura.

- **Métodos**

Ninguno.

4.3.1.5 Colección **Coefficients** y objeto **Coefficient**

Coefficients es una colección de los objetos Coefficient que son utilizados en el cálculo del módulo de calidad específico. Se identifican por las claves Ca, Si, Al, Fe.

La colección Coefficients tiene dos propiedades.

Count

_Long. Número de objetos en la colección. Sólo lectura. Su valor depende del módulo específico: 4 para el LSF, 3 para el SM, 2 para el IM, 4 para el C3S y 2 para el C3A.

Item(Key)

_Devuelve una referencia al objeto Coefficient correspondiente. La clave debe ser una de las strings “Ca”, “Si”, “Al”, “Fe”, siempre que dicho coeficiente exista en el módulo en cuestión.

El objeto Coefficient contiene el multiplicador del porcentaje del óxido que se utiliza en el cálculo del módulo de calidad.

- Propiedades

Multiplier

_Double. Multiplicador del porcentaje del óxido relacionado. Lectura-escritura.

- Métodos

Ninguno.

4.4 Diseño del configurador

Como hemos señalado anteriormente, se ha desarrollado una interfaz gráfica de configuración para el controlador del sistema MAC. Esta interfaz gráfica, entre otras cosas, permite al usuario del sistema:

- (a) definir las fuentes de los compuestos y los alimentadores correctivos que existen en el proceso de mezcla bajo control;
- (b) activar los correspondientes controladores ADEX para los módulos de calidad e introducir sus consignas;
- (c) fijar los parámetros específicos del MAC, y;

(d) fijar el modo de operación, manual o automático, una vez que el MAC está en funcionamiento.

Asimismo, el configurador de MAC cumple una función de monitorización, ya que:

(i) muestra las variables de entrada/salida actuales del proceso de mezcla, adquiridas y enviadas por MAC;

(ii) despliega las correspondientes diagnosis cuando se detecta una deficiencia de composición en una de las fuentes de compuesto, e;

(iii) informa del empleo de alimentadores correctivos.

El operador también podrá guardar a disco diferentes escenarios de control y recuperarlos posteriormente antes de comenzar la operación.

4.4.1 Configuración y monitorización

Cuando se arranca el MAC, se despliega la interfaz gráfica mostrada en la Figura 42. Esta interfaz gráfica de MAC presenta:

- Tres bloques de configuración y monitorización de MAC, bajo los títulos de “QC Modules ADEX Controllers”, “MAC Parameters” y “Element Sources”.
- Un bloque de operación de MAC, bajo el título “Mode of Operation”.
- Un campo “Diagnosis” en la parte inferior de la pantalla.

A la derecha del título “MIX ADVANCED CONTROLLER” se despliega un campo que indica el estado de operación de MAC. Este estado es inicialmente “OFF” tal y como muestra la Figura 42. En este estado, es posible llevar a cabo la configuración de MAC, pero no se permite fijar el modo de operación, manual o automático. La variable que determina el estado de MAC se recibe de un sistema externo, el cual puede ser, por ejemplo, un sistema de control local operando en el proceso de

mezcla, o una simulación, como la empleada en el Capítulo 5. Por tanto, el estado “OFF” ha de ser cambiado a “ON” desde el citado sistema externo.

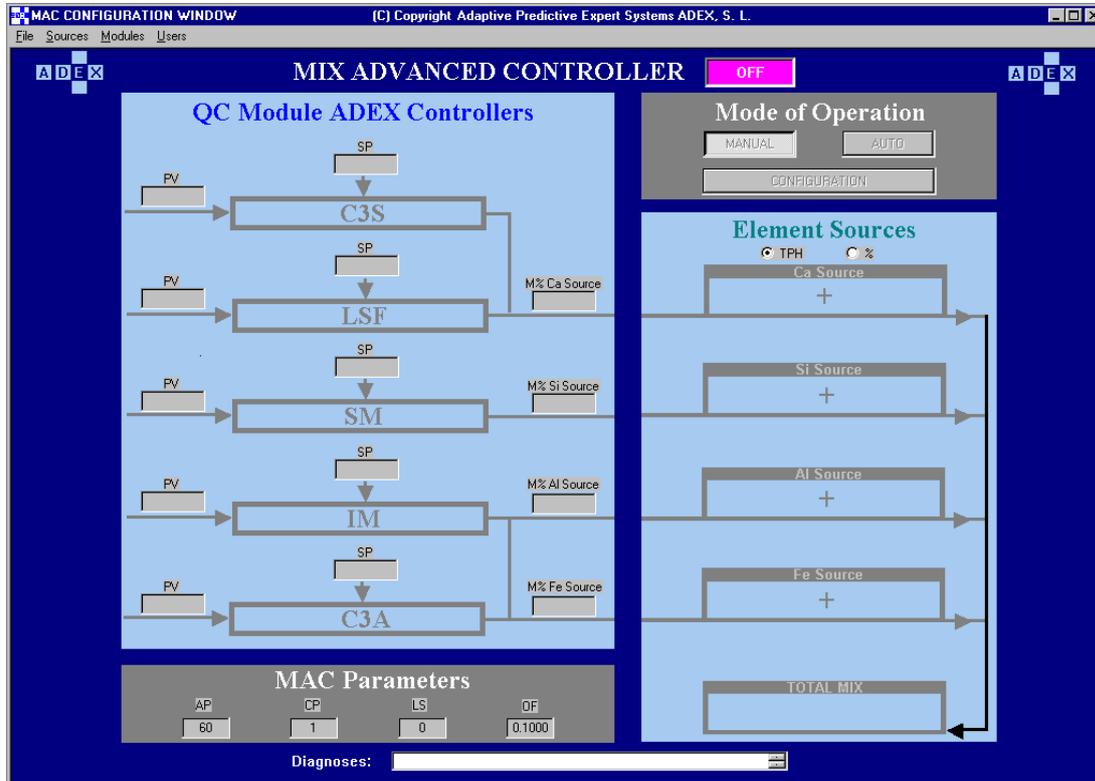


Figura 42. Interfaz gráfica del MAC

El operador debe hacer un “Login” al sistema para poder activar el modo de configuración dentro de la operación de MAC. Para ello, se hace clic en la opción “Users” del menú de la pantalla inicial, y se elige la opción “Login”, lo cual despliega la ventana de “Login” mostrada en la Figura 43.

La introducción de un User Name y un Password que sean válidos hará que se habilite el botón “CONFIGURATION”, situado dentro del bloque “Mode of Operation”. Haciendo clic en este botón, el operador será capaz de configurar consecutivamente los bloques “Element Sources”, “QC Module ADEX Controllers” y “MAC Parameters”, siendo éste el orden de configuración recomendado.

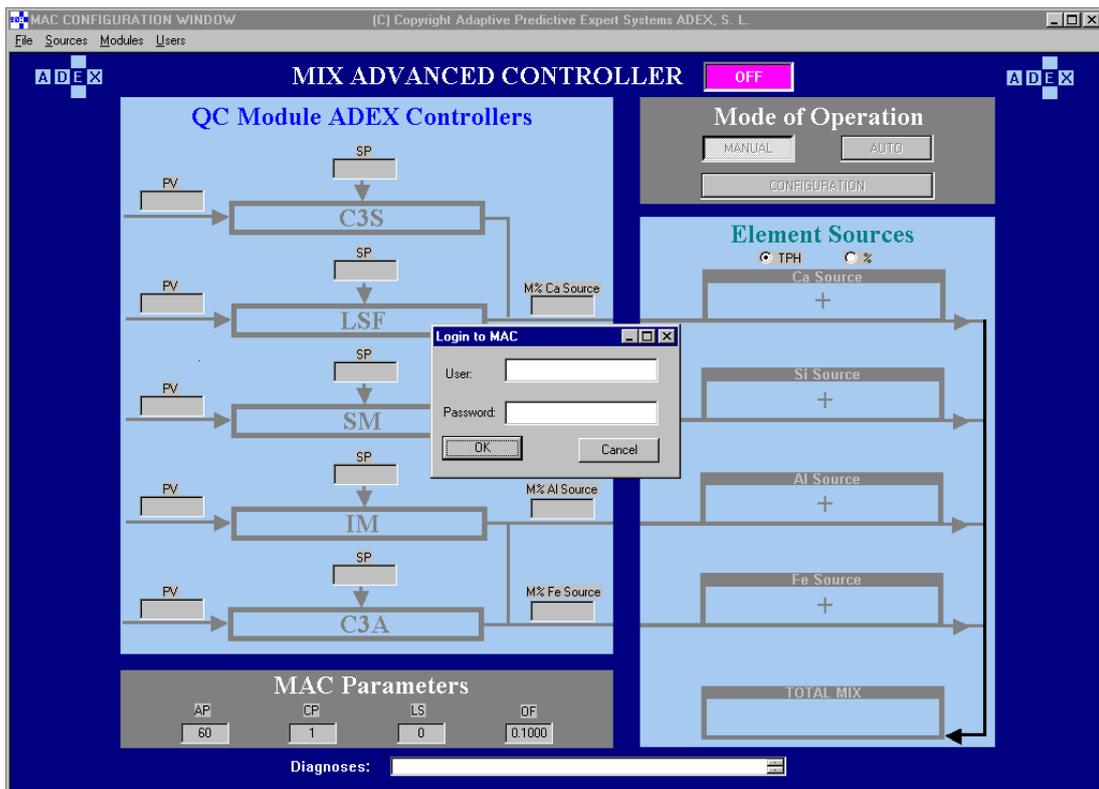


Figura 43. Login a MAC

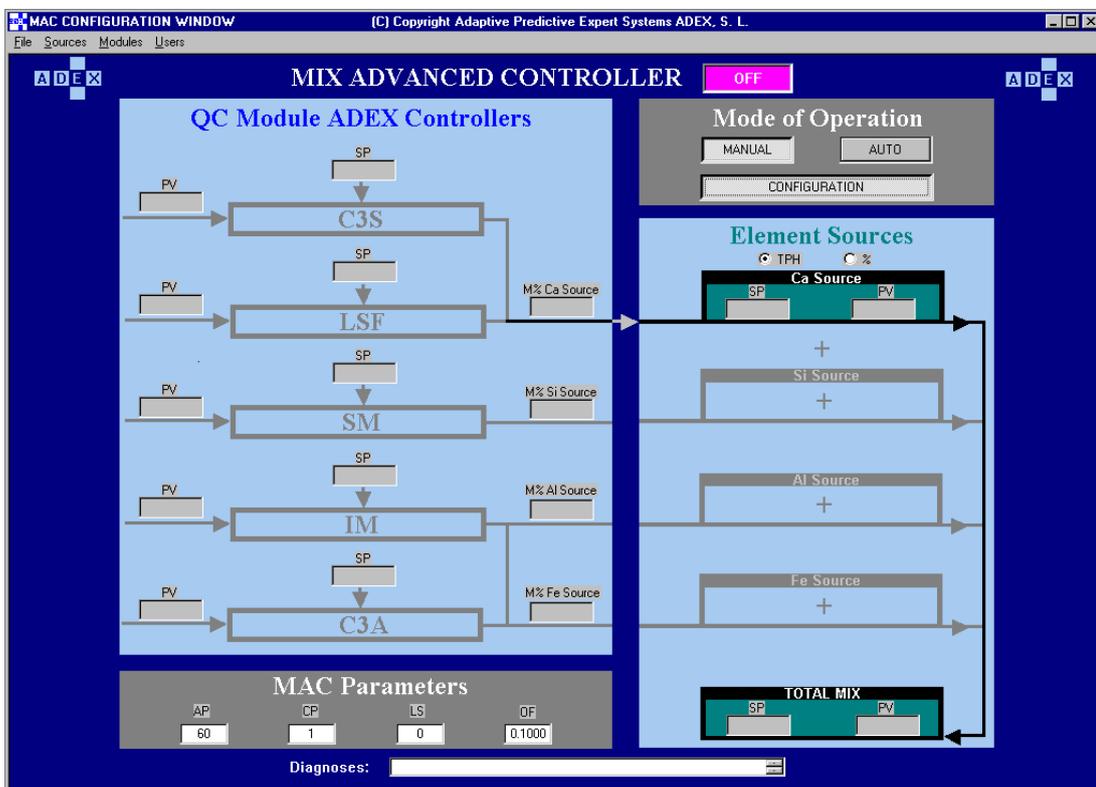


Figura 44. Declaración de una fuente de compuesto

4.4.1.1 Bloque Element Sources

Estando en modo de configuración el operador es capaz de declarar en el bloque Element Sources, cuáles son las fuentes de compuesto presentes en su proceso de mezcla. Por ejemplo, para declarar que una fuente de CaO es parte del proceso de mezcla, se deberá hacer clic en el signo + de color gris claro situado bajo el título “Ca Source”, de manera que la fuente de CaO aparecerá como declarada tal y como muestra la Figura 44.

Se puede observar en la Figura 44 que dentro del bloque verde de la fuente de CaO declarada, existen dos campos de títulos SP (*Setpoint*) y PV (*Process Variable*), respectivamente. Una vez que MAC arranca el control del proceso, el campo SP desplegará el setpoint calculado por MAC para el caudal a aplicar a la fuente del compuesto, mientras que el campo PV mostrará el caudal medido, que viene de campo, de dicha fuente de compuesto. MAC envía el mencionado setpoint de caudal al sistema de control local del proceso de mezcla, el cual debería asegurar la eficaz aplicación de dicho valor a través de los correspondientes controladores locales de caudal. En la parte superior del bloque de la fuente de CaO, dos etiquetas, TPH y % respectivamente, permiten que el operador elija las unidades en que se desplegarán los caudales.

Además se puede observar en la Figura 44 que, bajo el bloque verde de la fuente de CaO declarada, ha aparecido un nuevo signo + en color gris claro. Haciendo clic en este signo, el operador podrá declarar la presencia de un alimentador correctivo de CaO en el proceso de mezcla. Ese hecho se reflejaría en que el color gris claro del citado signo + cambiará a color negro.

Asimismo, podemos notar en la Figura 44 que, cuando se declara una fuente, se activa el bloque TOTAL MIX de la parte inferior. Los dos campos dentro de este bloque tienen el mismo significado que el explicado para la fuente de CaO, pero para el caudal total de mezcla.

Una vez que se ha declarado una fuente de compuesto, el operador es capaz de fijar sus parámetros de control específicos. Haciendo clic en la etiqueta “Ca Source”, se

despliega la ventana de configuración de la fuente, mostrada en la Figura 45. Esta ventana de configuración de fuente permite que el operador establezca los siguientes parámetros de Control, Diagnóstico y Límite.

The screenshot shows a software window titled "CALCIUM SOURCE CONFIGURATION WINDOW" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into three main sections: "Control Parameters", "Limit Parameters", and "Diagnosis Parameter".

Section	Parameter	Value
Control Parameters	Time Delay [in sec.]:	30
	Flow Rate Filter:	0.5000
	Correction Rate [%]:	1.0000
Limit Parameters	Physical Upper Limit (TPH):	100.0000
	Physical Lower Limit (TPH):	0.0000
	Chosen Upper Limit [%]:	100.0000
	Chosen Lower Limit [%]:	0.0000
Diagnosis Parameter	Flow Rate Deviation Band (TPH):	10.0000
Limit Parameters	Chosen Incremental Limit [%]:	5.0000

Figura 45. Configuración de la fuente de CaO

4.4.1.1.1 Parámetros de control

- Time Delay (en segundos) – Tiempo de retardo de transporte de la fuente del compuesto desde su/s alimentador/es hasta el analizador. Cuando una fuente posea varios alimentadores, este tiempo de retardo se establece igual al retardo de los alimentadores de caudal variable. Con el objeto de controlar el caudal de la fuente del compuesto, el caudal de éstos alimentadores es el que debería estar bajo control.
- Flow Rate Filter – Constante de filtro de primer orden que se aplica a las medidas de caudal recibidas.
- Correction Rate (%) – Cuando se detecta una deficiencia de composición en una fuente de compuesto, un porcentaje del setpoint de caudal calculado por MAC para la fuente será demandado del alimentador correctivo. Esta velocidad de corrección (Correction Rate) determina el máximo incremento de dicho porcentaje que se aplicará para compensar la mencionada deficiencia en cada período de control.

4.4.1.1.2 Parámetros de diagnosis

- Flow Rate Deviation Band (TPH) – Umbral en TPH que determina si la medición del caudal de la fuente presenta una desviación significativa en relación con el setpoint establecido por MAC. Este parámetro se utiliza para la detección y emisión de las diagnosis de falta de precisión en los controladores de caudal.

4.4.1.1.3 Parámetros de límite

- Physical Upper Limit (TPH) – Máximo caudal que puede dar la fuente en TPH.
- Physical Lower Limit (TPH) – Mínimo caudal que puede dar la fuente en TPH.
- Chosen Upper Limit (%) -Máximo caudal que puede dar la fuente en porcentaje respecto al caudal total de la mezcla.
- Chosen Lower Limit (%) - Mínimo caudal que puede dar la fuente en porcentaje respecto al caudal total de la mezcla.
- Chosen Incremental Limit (%) - Máximo incremento de caudal que puede dar la fuente en un período de control, en porcentaje respecto al caudal total de la mezcla.

Suponiendo que el proceso de mezcla tenga las cuatro fuentes de compuestos y un alimentador correctivo de Al, después de que el operador haya hecho la correspondiente declaración, el aspecto de la pantalla del MAC sería el desplegado en la Figura 46.

Tal y como se explica posteriormente, MAC desplegará bloques para los alimentadores correctivos cuando, habiendo sido declarados, se necesite utilizarlos.

Estos bloques son similares a los descritos para las fuentes de elementos, pero su color de fondo es rojo, en vez de verde.

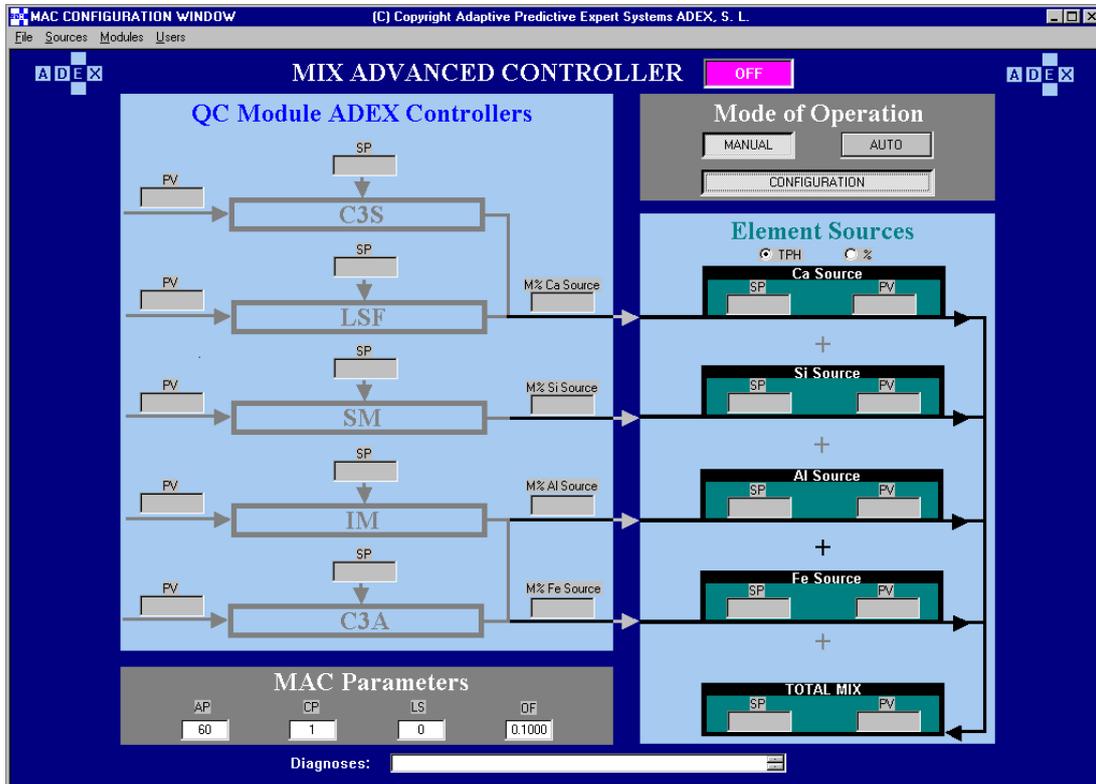


Figura 46. Fuentes de compuestos y alimentador correctivo de Aluminio

4.4.1.1 Bloque de Controladores ADEX de los Módulos de Calidad

Una vez que se ha efectuado la configuración del bloque de fuentes de compuesto, Element Sources, se procede a la configuración del bloque de los controladores ADEX de los Módulos de Calidad, "QC Module ADEX Controllers". Para ello se declararán los módulos de calidad que hayan de estar bajo control haciendo clic dentro de este bloque en los acrónimos de los mencionados módulos. Esto hará que los correspondientes controladores ADEX se activen y estén preparados para ser configurados, lo cual se notará en el cambio de su color, de azul claro a azul intenso, tal y como se despliega en la Figura 47 para el caso de LSF, SM e IM.

En caso de que los módulos de calidad no puedan ser controlados con las fuentes que estén declaradas, o si se ha efectuado una elección incorrecta de módulos a controlar

(el LSF no se puede controlar simultáneamente con el C3S, y lo mismo ocurre con el IM y el C3A), entonces MAC desplegará una ventana de información.

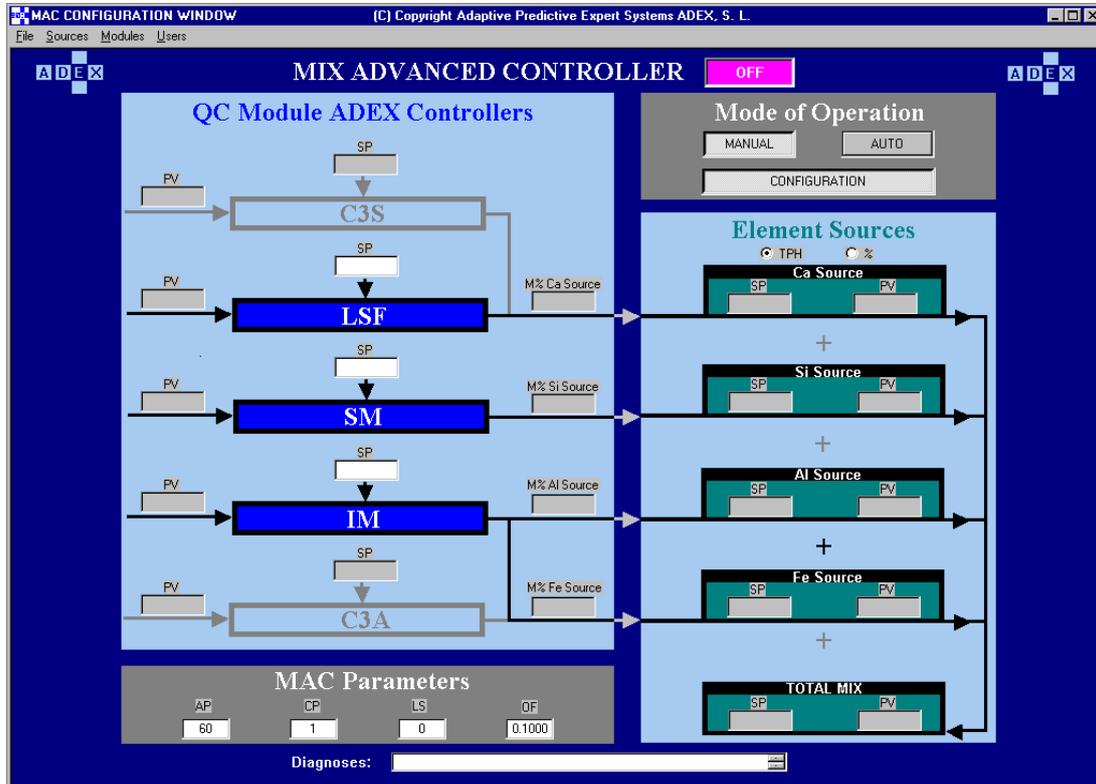


Figura 47. Módulos de calidad bajo control

Para eliminar la declaración de un módulo de calidad, basta con hacer clic a la derecha o a la izquierda del nombre del módulo en el bloque del controlador ADEX correspondiente.

En la parte superior del bloque de cada módulo hay campo de etiqueta SP (*Setpoint*), donde el operador podrá introducir el setpoint deseado para el correspondiente módulo de calidad. Sendos campos, a la derecha y a la izquierda del bloque de cada módulo, despliegan, cuando el MAC está en operación, las variables de entrada/salida del correspondiente controlador:

- Variable de Proceso (*Process Variable, PV*) – Despliega la última medición del módulo de calidad, calculada por MAC, a partir de las medidas filtradas de las composiciones de los óxidos en la mezcla.
- M % "Element" Source. – Señal de salida del controlador ADEX, es decir, el porcentaje del caudal de la fuente del compuesto contenida en la fuente del módulo.

Para configurar los parámetros relacionados con el control de un módulo de calidad, una vez que ha sido declarado, el operador sólo tiene que hacer clic en su acrónimo, desplegándose la correspondiente ventana de configuración.

Las Figuras 48 a 52 muestran las ventanas de configuración para el LSF, C₃S, SM, IM y C₃A, respectivamente. En la parte superior de todas estas ventanas se muestra la definición del correspondiente módulo de calidad, cuyos coeficientes pueden ser modificados por el operador. Bajo la definición del módulo se definen la fuente del módulo y la señal de salida del controlador ADEX. En la parte inferior de estas ventanas, se configuran los siguientes dos parámetros:

- Límite superior (Upper Limit) – Valor límite superior del módulo de calidad dentro del rango de operación.
- Límite inferior (Lower Limit) - Valor límite inferior del módulo de calidad dentro del rango de operación.

Se despliega una alarma en el campo Diagnoses si la medida del módulo de calidad sale fuera de este rango definido por los límites anteriores.

LSF MODULE CONFIGURATION WINDOW

Module Definition

$$\text{LSF} = \frac{100.0000 * \text{CaO}}{2.8000 * \text{SiO}_2 + 1.1800 * \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.6500 * \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Module Source

LSF Source = Ca Source + Si Source + Al Source + Fe Source

Module Control Signal

$$\text{M \% Ca Source} = \frac{\text{Ca Source}}{\text{LSF Source}} \times 100$$

Module Limit Parameters

Upper Limit = 115.000 Lower Limit = 85.0000

Figura 48. Configuración del LSF

C3S MODULE CONFIGURATION WINDOW

Module Definition

$$\text{C3S} = 4.0710 * \text{CaO} + -7.6020 * \text{SiO}_2 + -6.7180 * \text{Al}_2\text{O}_3 + -1.4300 * \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Module Source

C3S Source = Ca Source + Si Source + Al Source + Fe Source

Module Control Signal

$$\text{M \% Ca Source} = \frac{\text{Ca Source}}{\text{C3S Source}} \times 100$$

Module Limit Parameters

Upper Limit = 70.0000 Lower Limit = 40.0000

Figura 49. Configuración del C₃S

SM MODULE CONFIGURATION WINDOW [X]

Module Definition

$$SM = \frac{1.0000 * SiO_2}{1.0000 * Al_2O_3 + 1.0000 * Fe_2O_3}$$

Module Source

SM Source = Si Source + Al Source + Fe Source

Module Control Signal

$$M \% Si Source = \frac{Si Source}{SM Source} \times 100$$

Module Limit Parameters

Upper Limit = 3.50000 Lower Limit = 1.50000

Figura 50. Configuración del SM

IM MODULE CONFIGURATION WINDOW [X]

Module Definition

$$IM = \frac{1.0000 * Al_2O_3}{1.0000 * Fe_2O_3}$$

Module Source

IM Source = Al Source + Fe Source

Module Control Signal

$$M \% Al Source = \frac{Al Source}{IM Source} \times 100$$

Module Limit Parameters

Upper Limit = 3.0000 Lower Limit = 1.0000

Figura 51. Configuración del IM

The screenshot shows a software window titled "C3A MODULE CONFIGURATION WINDOW" with a close button in the top right corner. The window is divided into four sections:

- Module Definition:** Displays the chemical formula $C3A = 2.6500 *Al_2O_3 + -1.6920 *Fe_2O_3$. The coefficients 2.6500 and -1.6920 are in input fields.
- Module Source:** Displays the equation $C3A Source = Al Source + Fe Source$.
- Module Control Signal:** Displays the formula $M \% Al Source = \frac{Al Source}{C3A Source} \times 100$.
- Module Limit Parameters:** Displays $Upper Limit = 6.50000$ and $Lower Limit = 3.50000$. The values 6.50000 and 3.50000 are in input fields.

Figura 52. Configuración del C₃A

4.4.1.3 Parámetros del MAC

Una vez que el operador ha configurado el bloque de *Element Sources* y el de *QC Module ADEX Controllers*, podrá proceder a establecer los parámetros específicos del MAC en el bloque *MAC Parameters* block. Estos parámetros son los siguientes:

- Período de Análisis (Analysis Period, AP) – Período en segundos entre dos mediciones de análisis recibidas por MAC, suponiendo que no existe pérdida de análisis. Siempre que este tiempo se sobrepase, MAC pasará a modo MANUAL y desplegará una alarma en el campo Diagnoses.
- Periodo de Control (Control Period, CP) – Número de períodos de análisis por cada acción de control de MAC.
- Filtro de los Óxidos (Oxide Filter, OF) – Constante de filtrado de primer orden que se aplica a las mediciones de los porcentajes de los óxidos en la mezcla.

MAC emplea estos porcentajes filtrados para calcular los módulos de calidad a efectos de control.

- Fuente Conductora (Leading Source, LS) – Cuando el caudal de una fuente no está bajo control automático o está sujeto a cambios aleatorios o discontinuos, dicha fuente puede ser declarada como una Leading Source. En este caso, MAC controlará el caudal de las otras fuentes con el objeto de mantener los módulos de calidad de la mezcla en sus consignas ajustándose al caudal no controlado de la fuente de compuesto elegida como Leading Source, si bien el caudal total de la mezcla no estará bajo control. Introduciendo un entero de 1 a 4, el operador determinará cuál es la Leading Source: 1 para la fuente de CaO, 2 para la de SiO₂, 3 para la de Al₂O₃ y 4 para la de Fe₂O₃, respectivamente. Cuando se introduce 0, no se selecciona ninguna fuente como Leading Source. En este caso, MAC controlará el caudal de todas las fuentes de elementos y, por tanto, también el caudal total de la mezcla. El rendimiento del sistema en un escenario de control con Leading Source es, generalmente, plenamente satisfactorio, pero puede que se deteriore si la Leading Source es una fuente de compuesto que aporta poco caudal.

4.4.2 Escenarios de control de la mezcla

Una vez configurados los bloques *Element Sources*, *QC Module ADEX Controllers* y *MAC Parameters* se ha definido un escenario de control de la mezcla. Con objeto de facilitar la operación, MAC permite guardar a disco diferentes escenarios de control, incluyendo cada escenario:

- 1) las fuentes de compuestos configuradas y los alimentadores correctivos;
- 2) los módulos de calidad declarados y sus consignas; y,
- 3) los parámetros propios de MAC.

Haciendo clic en la opción “file” del menú, se desplegarán las opciones de guardar (save) y cargar (load), tal y como muestra la Figura 53.

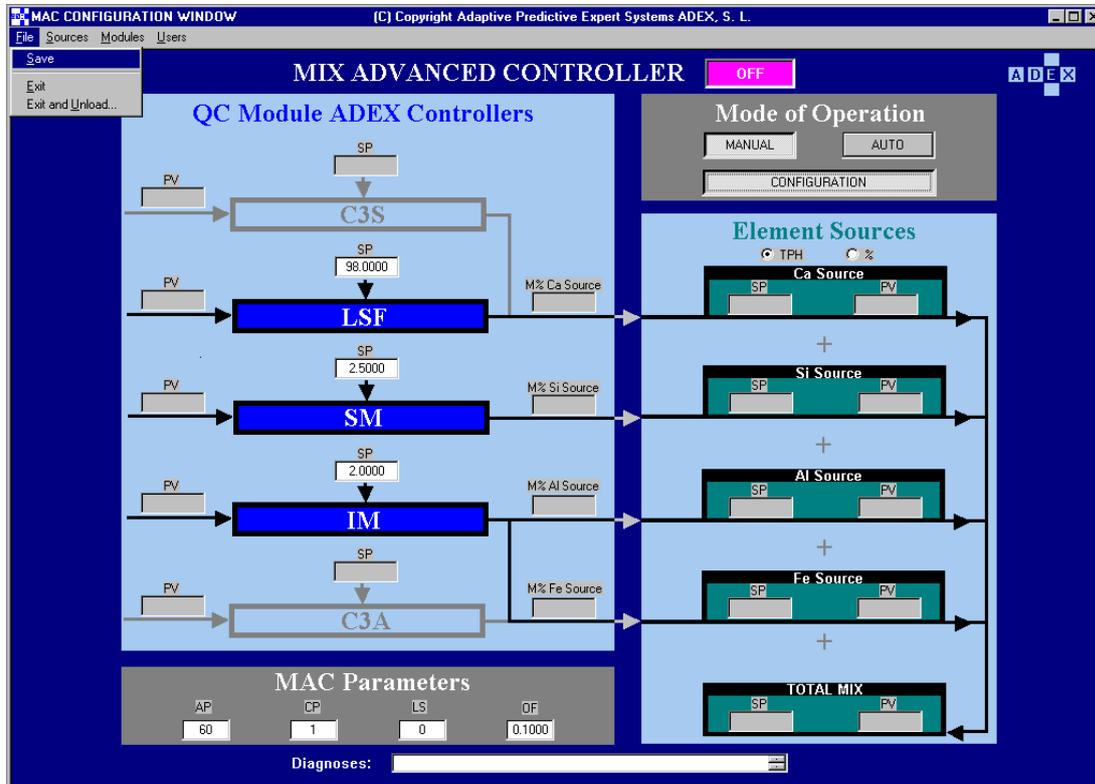


Figura 53. Escenario de control de mezcla

4.4.3 Descripción de la operación

El estado OFF es, generalmente, el estado inicial de MAC, tal y como ya se mencionó. En este estado de OFF, se puede supervisar en la pantalla de MAC, las variables de entrada /salida del proceso de mezcla en curso. El mecanismo de “login” ya explicado, permite, haciendo clic en el botón CONFIGURATION, tener acceso a la configuración de los diferentes bloques de MAC, lo cual determina su operación. Una vez concluida la configuración de MAC, se puede salir de este modo haciendo clic de nuevo en el botón CONFIGURATION. Mientras que el sistema permanezca en estado de OFF, MAC no enviará señales de control al proceso de mezcla.

Cuando hay un cambio de estado de OFF a ON, MAC pasará a modo manual, y los valores iniciales que tomará como demandas de caudal de las diferentes fuentes de compuesto serán las últimas mediciones recibidas, tal como muestra la Figura 54. En modo manual, el operador puede modificar las demandas de caudal de las diferentes fuentes de compuesto, indicando el campo Diagnosis que MAC se encuentra en dicho modo manual.

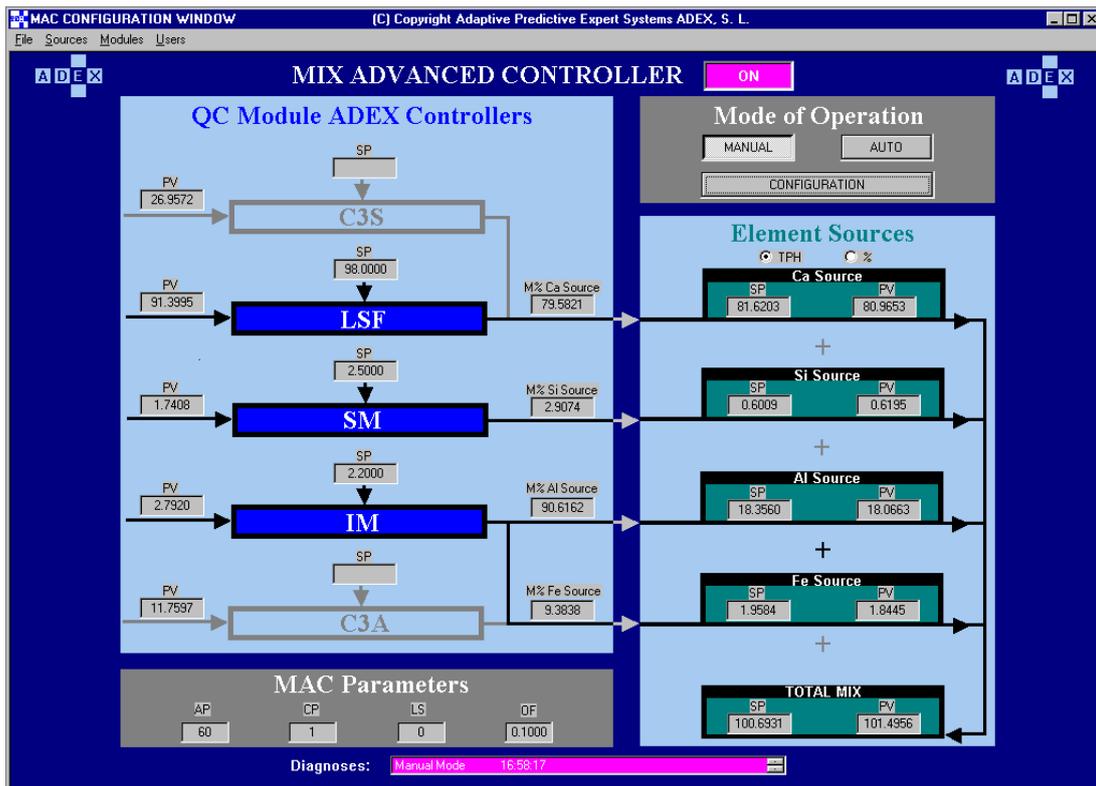


Figura 54. Modo manual de operación

Haciendo clic en el botón “AUTO”, MAC pasa de modo manual a modo automático, como ilustra la Figura 55. En este modo, MAC genera automáticamente las demandas para los caudales de las diferentes fuentes de elemento. Para volver al modo manual, basta con hacer clic en el botón “MANUAL”. En ambos modos el operador tiene siempre acceso a configuración de MAC a través del botón CONFIGURATION, y particularmente, a la determinación de los setpoints para los módulos de calidad.

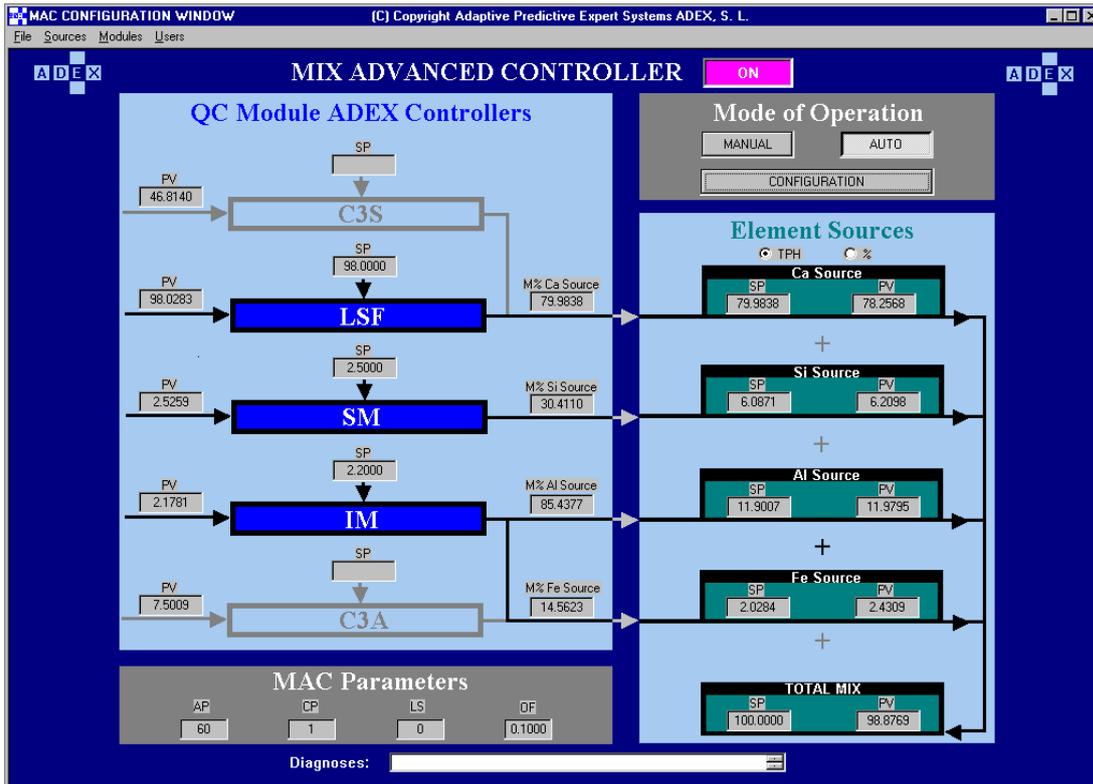


Figura 55. Modo automático de operación

Cuando ocurre una pérdida de análisis, el modo automático de operación pasa a manual, desplegándose un texto explicativo de esta ocurrencia en el campo Diagnosis. Este campo contiene una lista de textos explicativos para las diferentes situaciones de Diagnosis ocurridas.

4.4.4 Diagnosis y uso de alimentadores correctivos

Las condiciones que hacen que MAC detecte y despliegue una situación de Diagnosis son las siguientes:

- Una pérdida de análisis, condición ya mencionada anteriormente, la cual hace que MAC pase de modo automático a manual.

- Una falta de precisión significativa en el caudal de una de las fuentes de compuesto con respecto a su consigna. En esta situación, MAC permanece en modo automático y ajusta los caudales de las otras fuentes de compuesto para que los módulos de calidad de la mezcla se mantengan en consigna.
- Un módulo de calidad que sale de su rango admisible, lo cual debería ser corregido si es físicamente posible, por la actuación de MAC en modo automático.
- Una deficiencia de composición en una de las fuentes de compuesto. Cuando esté disponible el correspondiente alimentador correctivo, MAC lo empezará a utilizar.

Este último tipo de condición es detectada fácilmente por MAC. Las condiciones exactas para la emisión de estas diagnósticos de deficiencia de composición en una fuente de compuesto en el proceso de mezcla del cemento han sido explicadas en detalle en la sección 3.6.6 del Capítulo 3, y por tanto no se repiten ahora. Únicamente aclaramos que el único parámetro que se puede fijar desde el configurador en relación a las diagnósticos de deficiencia de composición es el `DeviationThreshold`, es decir, el rango de separación entre el módulo de calidad y su consigna, fuera del cual se verifican las condiciones de diagnóstico. Los otros parámetros de diagnóstico, aunque están disponibles a través de la interfaz que ofrece `MAC.exe`, no se pueden fijar directamente desde el configurador. Las posibles diagnósticos de deficiencia de composición que se pueden emitir son las siguientes.

1. Falta de CaO en la fuente de CaO para el LSF.
2. Falta de SiO_2 en la fuente de SiO_2 para el LSF.
3. Falta de SiO_2 en la fuente de SiO_2 para el SM.
4. Falta de Al_2O_3 en la fuente de Al_2O_3 para el SM.
5. Falta de Al_2O_3 en la fuente de Al_2O_3 para el IM.

6. Falta de Fe_2O_3 en la fuente de Fe_2O_3 para el IM.

Reemplazando LSF por C_3S en las diagnosis 1 y 2 se obtiene las correspondientes posibles diagnosis cuando se considera el C_3S . De la misma forma, el IM debe ser reemplazado por el C_3A en las Diagnosis 5 y 6 cuando el considerado sea el C_3A .

La Figura 56 muestra la operación de MAC cuando se detecta una falta de Al_2O_3 en la fuente de Al_2O_3 para alcanzar el setpoint de SM (diagnosis 4, antes mencionada).

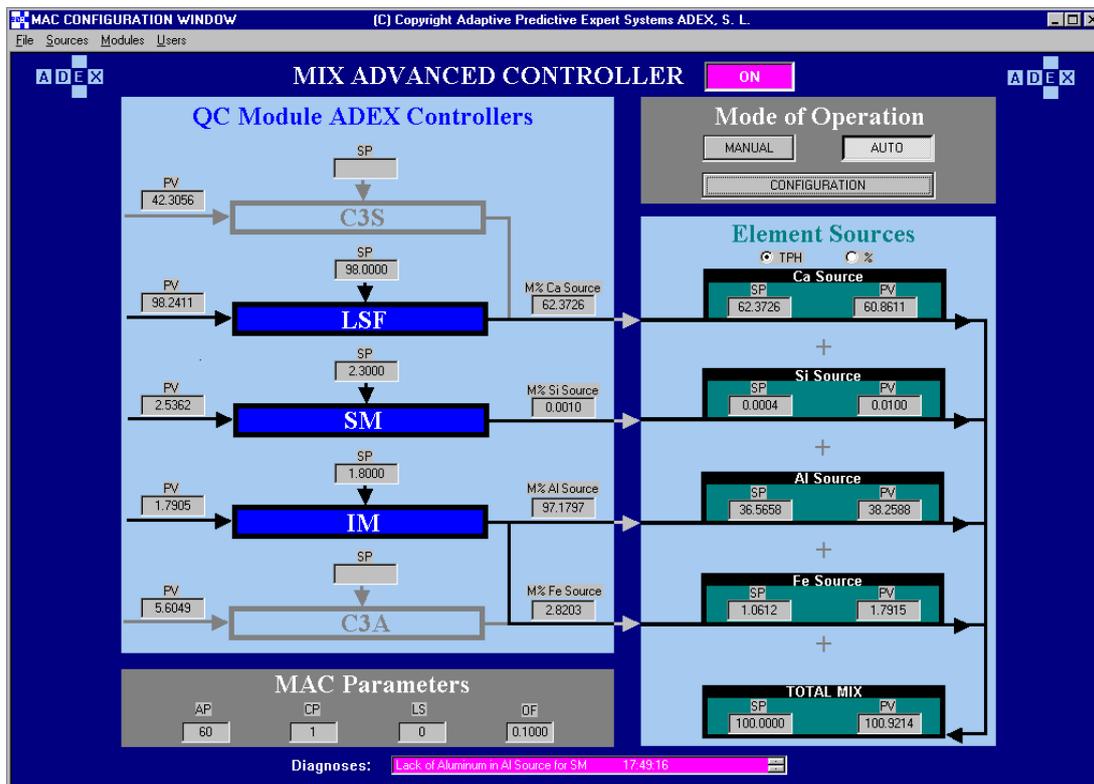


Figura 56. Deficiencia de composición en la fuente de Al_2O_3

Se puede observar en la Figura 56 como la salida del controlador ADEX del módulo de SM está al 0%, y a pesar de ello, el módulo permanece por encima de su consigna.

La Figura 57 muestra cómo MAC utiliza un alimentador correctivo de Al_2O_3 para compensar la deficiencia previamente considerada.

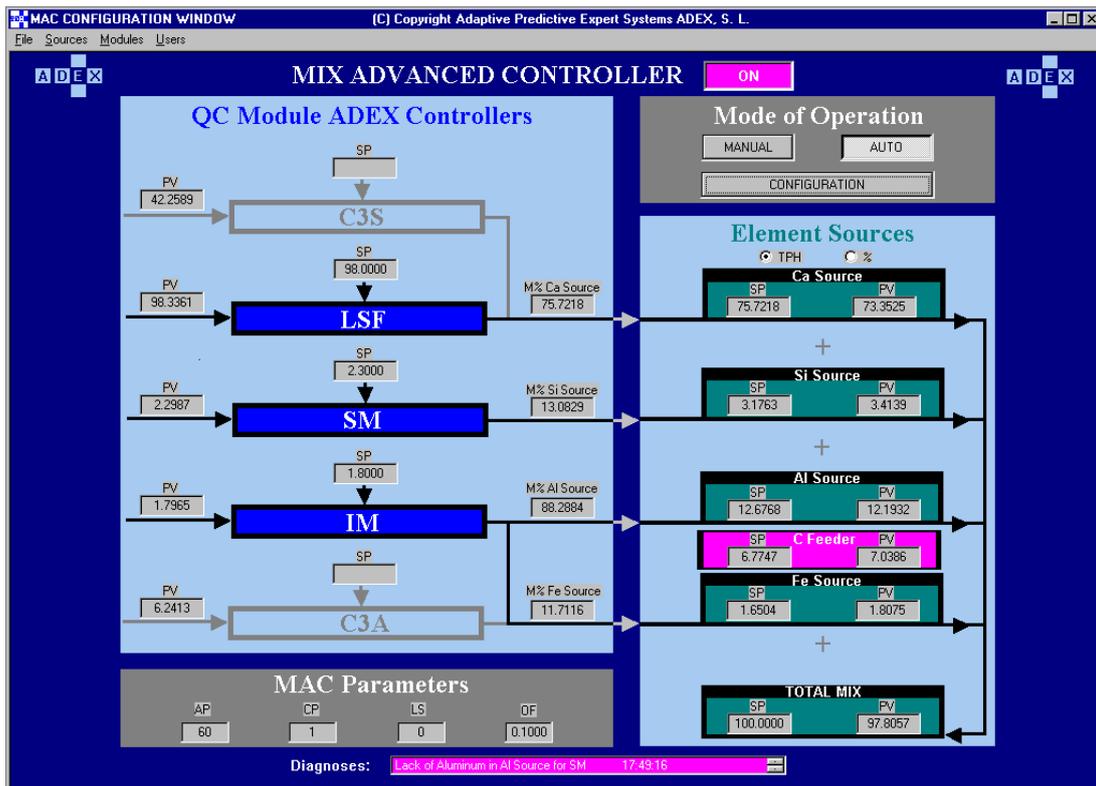


Figura 57. Uso de un alimentador correctivo de Al_2O_3

En la Figura 57 se puede observar el color rojo del bloque del alimentador correctivo de Al_2O_3 , el cual muestra la demanda de caudal, calculada por MAC, así como el correspondiente caudal medido. El módulo de SM se mantiene en consigna gracias al uso de este alimentador correctivo.

Como ya se dijo previamente, MAC utiliza el alimentador correctivo en la mínima cantidad necesaria para compensar la deficiencia de composición. Por tanto, se minimiza siempre el empleo de los citados alimentadores correctivos, optimizando así el proceso de mezcla.

4.5 Controladores ADEX de los módulos de calidad

Como ya se mencionó en la sección 3.5.3, la herramienta software de control utilizada para crear y utilizar controladores ADEX dentro de la estrategia de control

es la plataforma software ADEXCOP v.1 (ADEXCOP, 2015). Describimos a continuación cómo comunica MAC.exe con ADEXCOP v.1 al objeto de crear los controladores de los módulos de calidad, configurar algunos de sus parámetros y hacer las llamadas para la ejecución de los mismos.

ADEXCOP v.1 es un servidor ActiveX que corre sobre Windows que incluye, de forma esquemática, los siguientes componentes es su estructura software (Figura 58):

- Un programa ejecutor (*Executor*) que se encarga de ejecutar el código de los controladores ADEX.
- Una base de datos, que proporciona al ejecutor la información requerida para su operación.
- Una DLL que actúa como driver, que se encarga de actualizar la base de datos del ejecutor con las variables de entrada/salida del sistema local (*Local System*), y que se utiliza en la ejecución de los controladores, para transferir las acciones de control al sistema local.
- Un programa de configuración, que permite la definición, configuración, monitorización de los controladores ADEX.

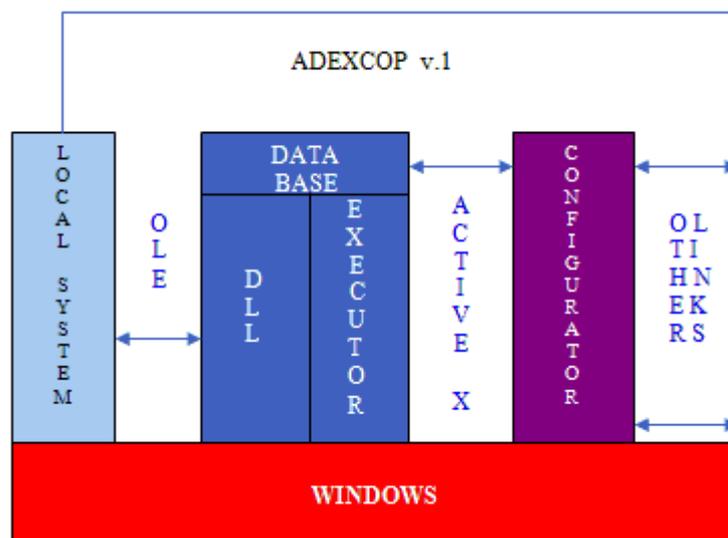


Figura 58. Estructura software de ADEXCOP v.1

El hecho de que ADEXCOP v.1 esté implementado con lenguaje de programación orientado a componentes, permite que pueda intercambiar datos con cualquier otra aplicación que soporte dicha modalidad de programación; y en particular con MAC, que está definido como un Servidor ActiveX, como ya se ha mencionado.

```
#include "adexcopr.h"
extern IADEXRunner adex2;

//Creación de lazos
HRESULT hRes = CoInitialize(NULL);
LPCTSTR lp="ADEXCOPr.ADEXRunner.1";
adex2.CreateDispatch(lp,NULL);

IControllers Controladores(adex2.GetControllers());

Controladores.Add("LSF",3,1,1);
Controladores.Add("SM",3,1,1);
Controladores.Add("IM",3,1,1);
Controladores.Add("C3S",3,1,1);
Controladores.Add("C3A",3,1,1);

//Configuración de los parámetros del bloque conductor
IController LSFloop(Controladores.GetItem("LSF"));
IController SMloop(Controladores.GetItem("SM"));
IController IMloop(Controladores.GetItem("IM"));
IController C3Sloop(Controladores.GetItem("C3S"));
IController C3Aloop(Controladores.GetItem("C3A"));

IParameter(LSFloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.rc")).SetValueD(0.5);
IParameter(LSFloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.ln")).SetValueD(5);
IParameter(LSFloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.tc")).SetValueD(1.5);

IParameter(SMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.rc")).SetValueD(0.05);
IParameter(SMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.ln")).SetValueD(5);
IParameter(SMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.tc")).SetValueD(1.5);

IParameter(IMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.rc")).SetValueD(0.025);
IParameter(IMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.ln")).SetValueD(0.5);
IParameter(IMloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.udl")).SetValueD(5);

IParameter(C3Sloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.rc")).SetValueD(0.5);
IParameter(C3Sloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.ln")).SetValueD(5);
IParameter(C3Sloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.tc")).SetValueD(1.5);

IParameter(C3Aloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.rc")).SetValueD(0.025);
IParameter(C3Aloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.ln")).SetValueD(5);
IParameter(C3Aloop.GetParameter("Pvg1.Ap2.tc")).SetValueD(1.5);

//Ejecución de los controladores
LSFloop.Execute();
SMloop.Execute();
IMloop.Execute();
C3Sloop.Execute();
C3Aloop.Execute();

//Cogiendo la señal de control generada por los controladores
modLSF.ADEXControl=IParameter(LSFloop.GetParameter("Pvg1.out")).GetValueD();
modSM.ADEXControl=IParameter(SMloop.GetParameter("Pvg1.out")).GetValueD();
modIM.ADEXControl=IParameter(IMloop.GetParameter("Pvg1.out")).GetValueD();
modC3S.ADEXControl=IParameter(C3Sloop.GetParameter("Pvg1.out")).GetValueD();
modC3A.ADEXControl=IParameter(C3Aloop.GetParameter("Pvg1.out")).GetValueD();
```

Figura 59. Creación, configuración y ejecución de los controladores ADEX

4.5.1 Creación y ejecución

Por tanto, para la creación, configuración de algunos parámetros de los controladores de los módulos de calidad y ejecución de los mismos, MAC, en este caso actuando como cliente de ADEXCOP, utiliza la interfaz que éste expone. En la Figura 59 se muestra como ejemplo, parte del código fuente en C++ de creación de los lazos de LSF, SM, IM, C3S y C3A, la configuración de los parámetros del bloque conductor (*rate of change, prediction horizon y time constant*), a efectos ilustrativos, y la ejecución de los controladores al objeto de obtener la señal de control.

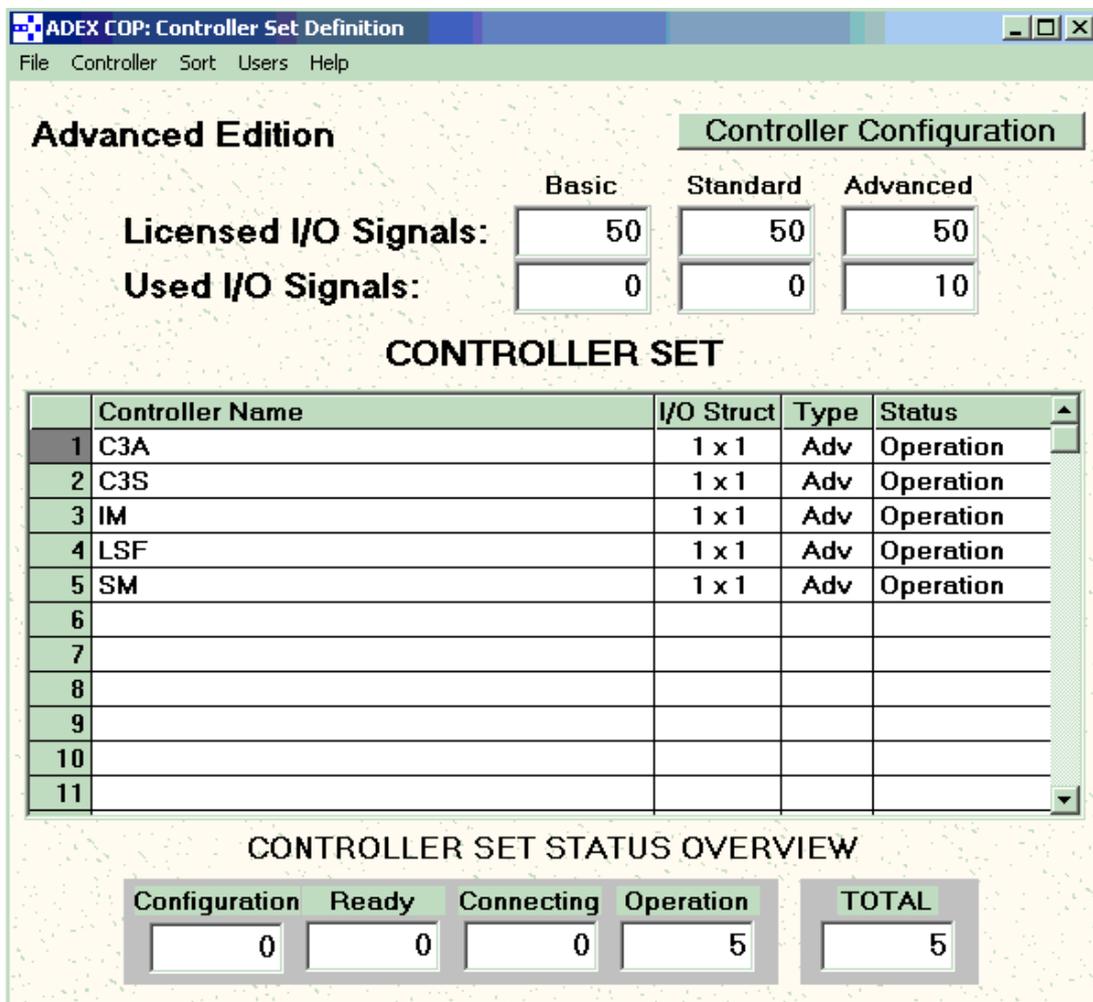


Figura 60. Controladores ADEX de los módulos de calidad en ADEXCOP v.1

4.5.2 Configuración

Describimos a continuación la configuración elegida para las variables más relevantes de cada uno de los controladores ADEX de los módulos de calidad. Dicha configuración se lleva a cabo a través del programa de configuración de ADEXCOP v.1 antes mencionado, por medio de su ventana “*Controller Set Definition*”, cuyo aspecto tras la creación de los controladores ADEX de los módulos de calidad por parte de la estrategia de MAC, es la mostrada en la Figura 60.

En la Figura 60 se aprecia la estructura monovariante, 1 x 1, de cada lazo de control, siendo la entrada el valor del módulo de calidad en cuestión, obtenido a partir de las medidas filtradas de los óxidos de la composición de la mezcla, y la salida los ya conocidos “% de la fuente del compuesto en la del módulo”.

La Figura 61 muestra la ventana de configuración del dominio adaptativo predictivo central (AP-C) del controlador de LSF. En dicha figura se muestran desplegados los cuadros relativos al bloque de control (*Control Block*, en la parte superior izquierda), al bloque conductor (*Driver Block*, en la parte inferior izquierda) y al mecanismo adaptativo (*Adaptive Mechanism*, en la parte inferior de la figura). También se muestra desplegado en la parte superior derecha el operador ADEX “*ADEX Operator*”.

- En el bloque de proceso, hay que destacar que el sampling time es de 60 segundos, correspondiente con el tiempo en que MAC espera recibir un nuevo análisis. Y el control period es 1, es decir, cada vez que se recibe un nuevo análisis se ejecuta el lazo de control, para obtener nuevas señales de control de los lazos y, a partir de ellas, calcular las nuevas consignas de caudal a aplicar de las fuentes. Sin embargo, en el esquema software de la solución propuesta, no es ADEXCOP v.1 el que muestrea al sistema local para obtener los datos de los análisis, sino que es la estrategia de control de MAC la que pasa a los controladores los *actual input* de cada instante y llama a la ejecución de los lazos a través de su interfaz ActiveX, tal y como hemos visto en la sección anterior,

siendo por tanto estos valores simbólicos pero no indicativos de que de ADEXCOP v.1 muestree el sistema local. Es decir, es MAC, y no ADEXCOP v.1, el que se comunica con el sistema local, como vimos en el esquema de la Figura 40.

- En el bloque experto se introducen los límites superior e inferior que permiten determinar en qué dominio nos encontramos y el tipo de control que hay aplicar en cada caso. El dominio adaptativo predictivo central se corresponde con valores de LSF entre 75 y 125. Fuera de estos valores se han definido dos dominios expertos superior (EX-U) e inferior (EX-L) al objeto de no perder la dinámica identificada del proceso cuando salgamos de este dominio central de control adaptativo predictivo. En estos dominios expertos, que se muestra en las Figuras 62 y 63, respectivamente, no se considera un modelo entrada/salida del proceso –véase que el bloque del mecanismo adaptativo aparece desactivado- y lo único que se ha considerado es aplicar el límite incremental (IL) del 5% (explicado a continuación) hasta que la variable, el LSF, vuelva al dominio AP-C, en el cual se vuelve a aplicar control adaptativo predictivo, de acuerdo al modelo identificado. No se ha considerado necesario definir reglas más complejas en estos dominios expertos, aunque se podrían haber especificado utilizando los parámetros OUT, INCOUT y WT del bloque “*Expert Configuration*” (ADEXCOP, 2015). La causa que origina estos valores erráticos del módulo puede ser, por ejemplo, un atasco en una fuente, de manera que en esa situación donde no existe relación causa-efecto se aplica control experto. Cuando se recupera la causa origen de este comportamiento extraño y el LSF vuelve al rango entre 75 y 125, se vuelve a aplicar control AP.
- En el bloque de control destaca el límite incremental, IL, *Incremental Limit*, fijado a 5, es decir, el porcentaje de la fuente de CaO en la fuente de LSF como mucho se cambiará de un periodo de control a otro en un 5%. Asimismo, vemos que el filtro (FL) se deja a 1, porque la variable de proceso es el módulo de calidad, ya obtenido a partir del filtrado de los óxidos por la estrategia de control.

- El parámetro más importante del bloque conductor es la tasa de cambio (*rate of change*), que indica la pendiente máxima que se considera cuando se genera una trayectoria deseada que conduce el módulo a su consigna. Como vemos, es de 0.5, es decir, deseamos que el LSF cambie como mucho en 0.5 unidades en un tiempo de 60 segundos.
- Por último, se muestra desplegado el bloque del mecanismo adaptativo. En él apreciamos que se han considerado dos parámetros A_s (los relativos a la PV, el LSF) y dos parámetros B_s (relativos al OUT, el porcentaje de la fuente de CaO en la fuente de LSF). Los valores iniciales considerados, se ve que son

$$A_1 = 1.0; \quad A_2 = -0.2$$

$$B_1 = 0.85; \quad B_2 = 0.05$$

La ganancia del proceso se puede calcular a partir de los valores de los parámetros A_s y B_s (Martín-Sánchez & Rodellar, 2015):

$$G = \frac{\sum_i B_i}{1 - \sum_i A_i}$$

Por tanto, vemos que la ganancia correspondiente a los valores iniciales es de

$$G_{inicial} = \frac{\sum_i B_i}{1 - \sum_i A_i} = 4.5$$

Sin embargo, el mecanismo adaptativo va modificando estos parámetros con el objeto de llegar a valores del cuadrado del error de predicción próximos a cero. El resultado de esa adaptación son los parámetros actuales, de la fila superior, que son los que el control predictivo utiliza al hacer el cálculo de la acción de control. En el caso de la dinámica identificada en el instante de la Figura 60, los parámetros tienen los valores

$$A_1 = 0.88562; \quad A_2 = -0.2261$$

$$B_1 = 0.88468; \quad B_2 = 0.04920$$

que corresponden a una ganancia de

$$G = \frac{\sum_i B_i}{1 - \sum_i A_i} = 2.74$$

Es esta capacidad de adaptación para la identificación de las distintas dinámicas del proceso, junto con la estrategia de control propuesta, la que sienta las bases del rendimiento satisfactorio del sistema de control de la mezcla de materiales objeto de la presente tesis.

Dentro del mecanismo adaptativo, también merece la pena destacar el *noise level*, NL, que representa una banda de oscilación del LSF cuya dinámica no se desea, ni se puede, identificar, ya que proviene del ruido asociado a la mediación de la PV. Como en nuestro caso la PV ya viene obtenida de unas medidas filtradas, fijamos ese valor bajo, a 0.2 unidades de LSF. Dentro de la banda de LSF no se produce adaptación de los parámetros del modelo.

Las Figuras 64, 65, 66 y 67, muestran las ventanas de configuración del dominio adaptativo predictivo central (AP-C) de los controladores de SM, IM, C₃S y C₃A, respectivamente. La interpretación de los parámetros es análoga la que se acaba de hacer para el controlador de LSF. Para cada uno de ellos también se han considerado unos dominios expertos superior e inferior, en los que únicamente se aplica el límite incremental correspondiente (que es del 5% en todos los lazos), hasta que el módulo correspondiente retorne al dominio de control adaptativo predictivo central, si bien no se han incluido las figuras correspondientes por ser análogas a las ya presentadas para el LSF.

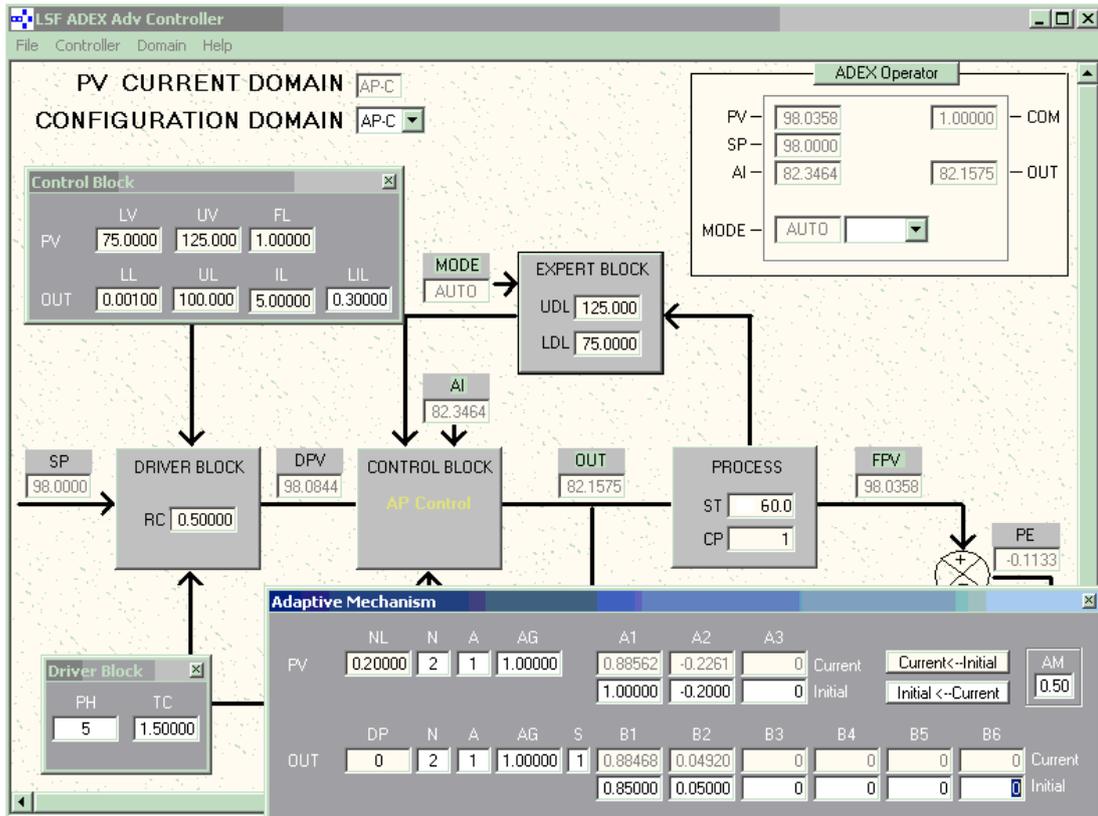


Figura 61. Controlador ADEX del LSF – Dominio AP-C

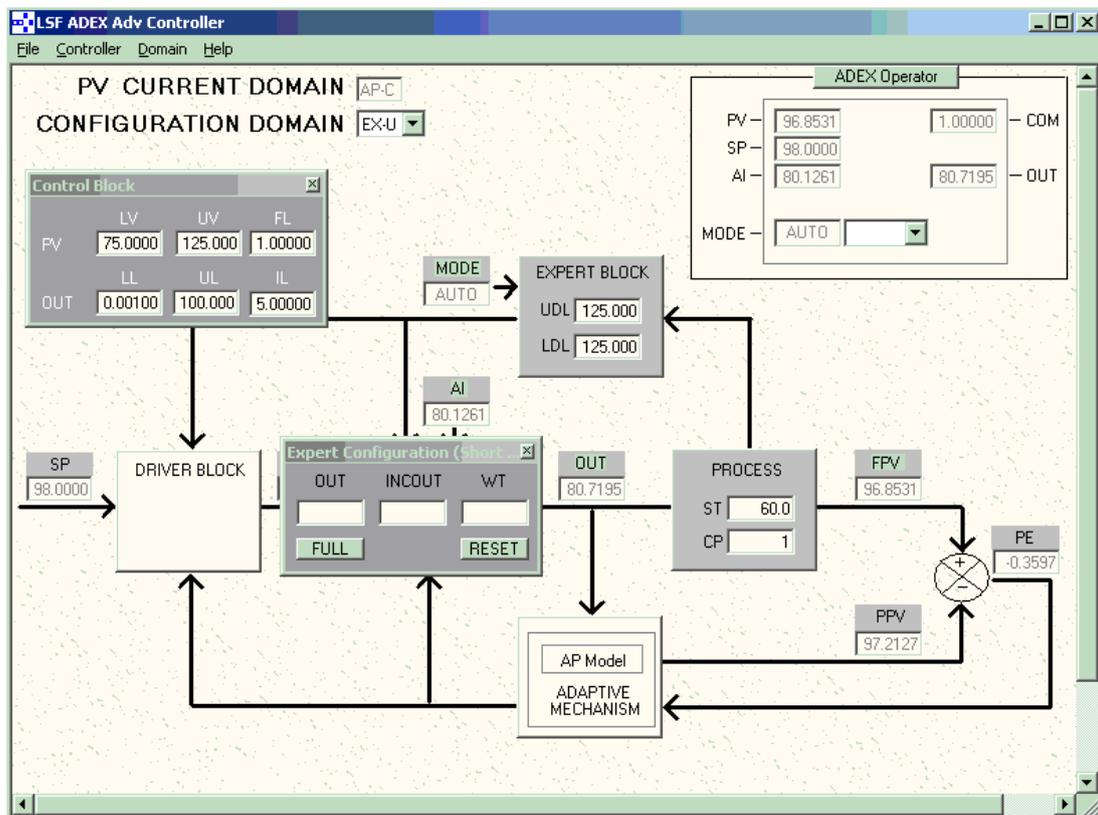


Figura 62. Controlador ADEX del LSF – Dominio EX - U

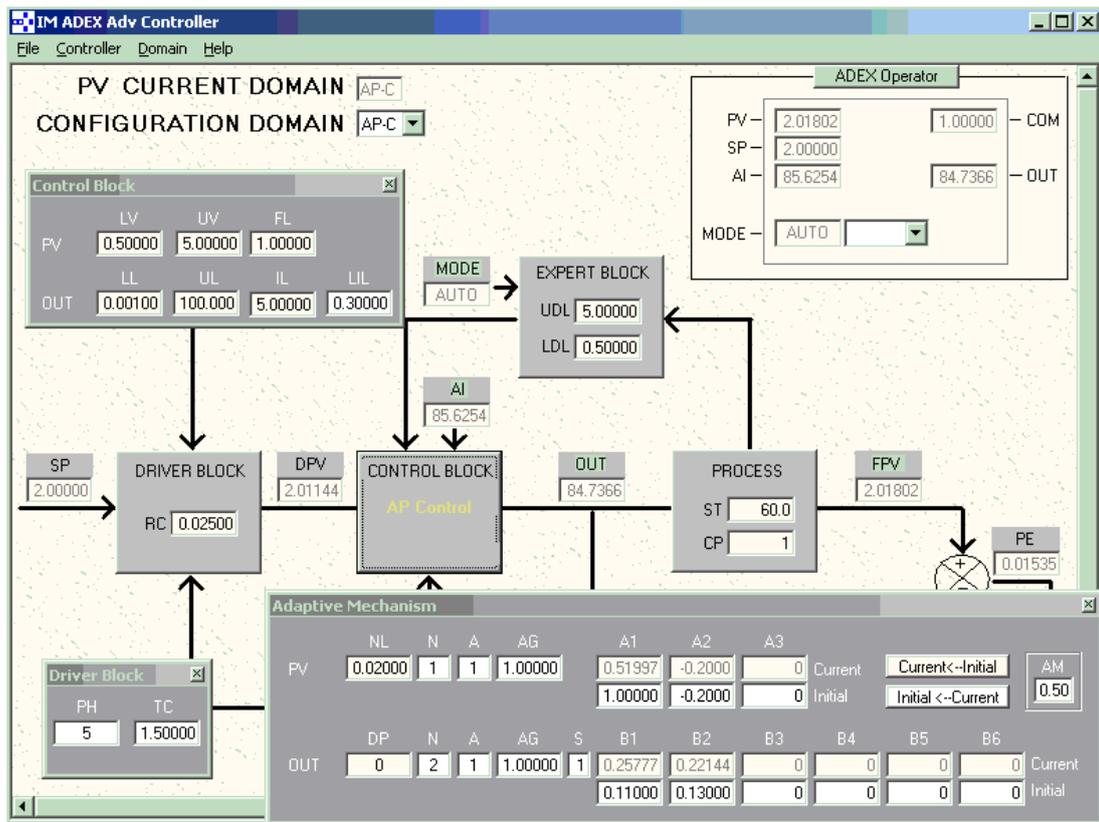


Figura 65. Controlador ADEX del IM - Dominio AP-C

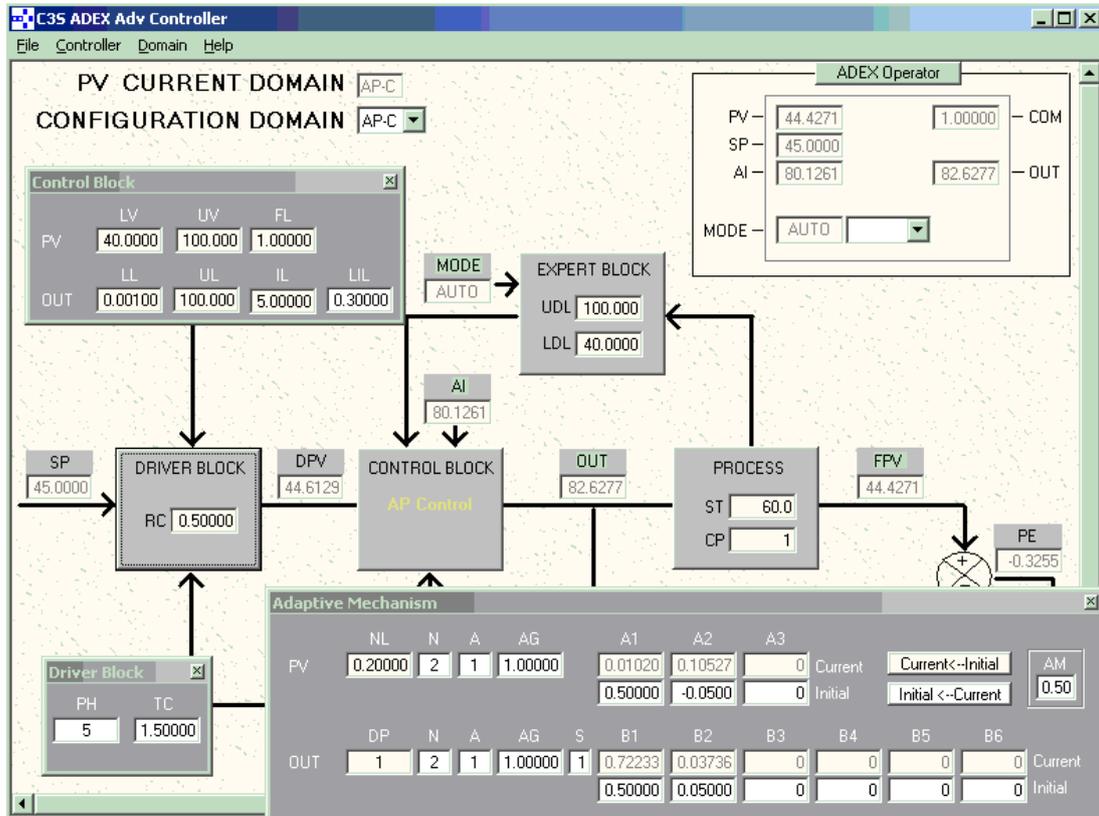


Figura 66. Controlador ADEX del C3S - Dominio AP-C

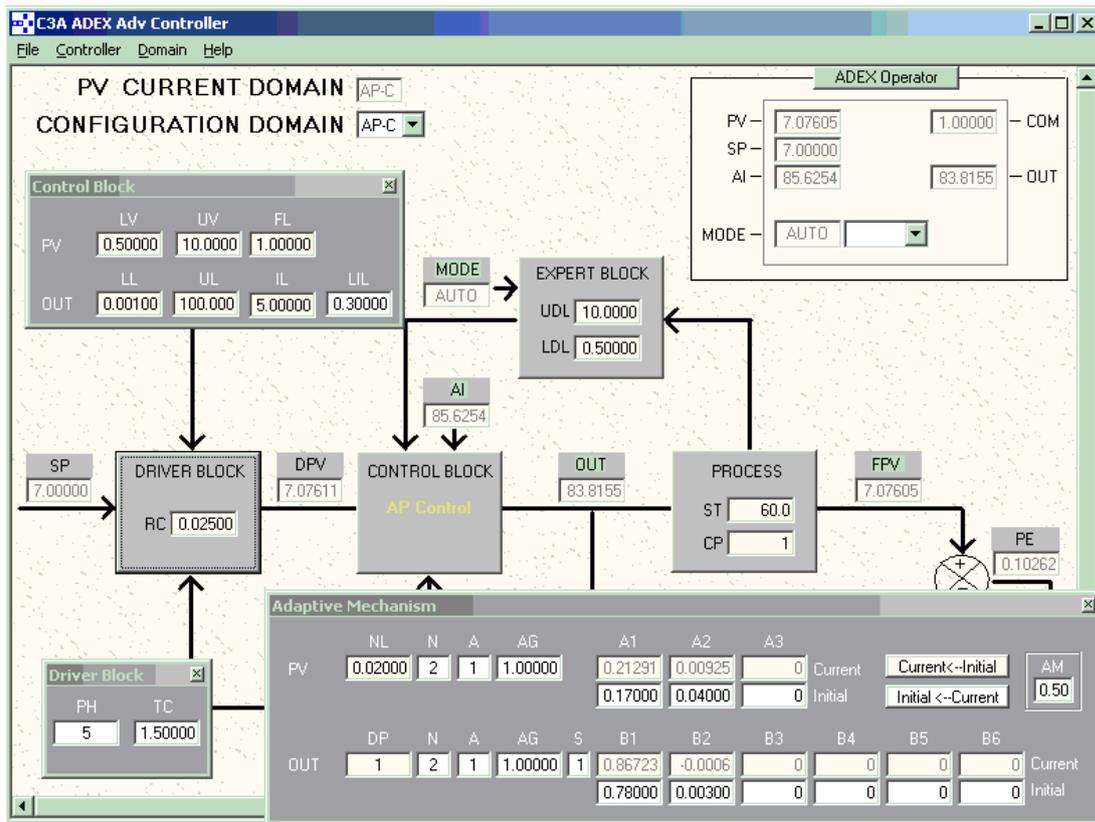


Figura 67. Controlador ADEX del C₃A - Dominio AP-C

Capítulo 5

DISEÑO DEL *MIX PROCESS SIMULATOR*

5.1 Diseño del MPS

Al objeto de comprobar en simulación las capacidades del MAC, se ha desarrollado un simulador del proceso de mezcla de materiales en la industria del cemento. Dicho simulador del proceso de mezcla, en adelante MPS (*Mix Process Simulator*), ha sido programado, al igual que el MAC, en C++ (Stroustrup, 2013), (Gottfried, 2010) empleando la herramienta de programación Microsoft Visual C++ 6.0 (Ceballos, 2007), (Ceballos, 2008), y simula el proceso tan fielmente como es posible, y comunica las variables del proceso al MAC utilizando ActiveX, por medio de la interfaz del mismo, desarrollada y especificada en el Capítulo 4. La Figura 68 ilustra esquemáticamente la comunicación entre el sistema de control de la mezcla, MAC, y el simulador del proceso de mezcla, MPS.

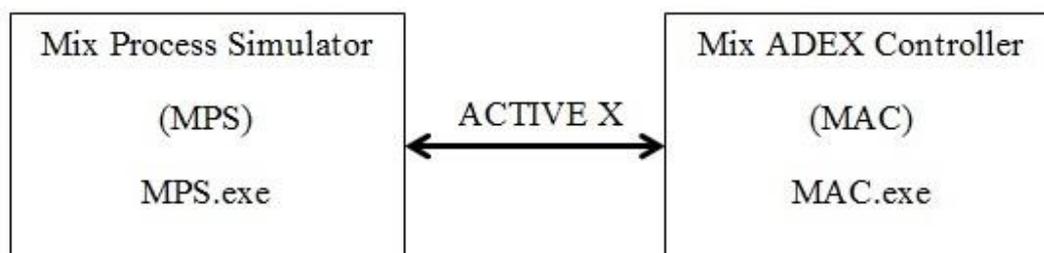


Figura 68. Comunicación MPS – MAC

El MPS permite al operador: a) configurar todas las variables de estructura necesarias para llevar a cabo la simulación, b) observar las variables de entrada/salida del proceso de mezcla, así como las variables enviadas y recibidas al MAC, c) configurar la frecuencia de ejecución del ciclo de simulación y la duración del experimento de simulación, d) detener la ejecución de la simulación para introducir cambios en la configuración de la misma, y e) desplegar curvas de tendencia de las variables del proceso más relevantes, así como índices estadísticos de rendimiento de las mismas (media, desviación estándar, etc.).

Por tanto, el operador tiene la posibilidad de i) definir las fuentes del elemento, dentro del proceso simulado, así como los alimentadores que pertenecen a cada fuente (hasta un máximo de tres alimentadores por fuente), ii) definir, para cada

alimentador, su caudal inicial, sus límites inferior y superior de caudal así como su retardo, iii) introducir las composiciones químicas iniciales de cada uno de los alimentadores, iv) variar en el tiempo estas composiciones iniciales, de una forma aleatoria o predefinida, v) simular la existencia de falta de precisión de los controladores de caudal y así como la falta de precisión en medida del analizador; son los llamados ruidos de proceso y ruidos de medida, respectivamente, vi) simular fallos o atascos en los alimentadores, y vii) definir una fuente como fuente incontrolable, situación en la que MAC aplicará la estrategia de fuente conductora.

Asimismo, el operador tiene la posibilidad de almacenar en disco diferentes escenarios de simulación y la de cargarlos en el MPS antes de iniciar la simulación.

Además, el MPS permite que el operador monitorice: 1) las composiciones químicas iniciales de los alimentadores y sus cambios, aleatorios o discontinuos, en el tiempo, 2) los valores reales de los caudales de los alimentadores y del caudal total de la mezcla, así como la evolución de las correspondientes consignas de caudal, enviadas desde el MAC, 3) los valores reales del porcentaje de los óxidos de la composición química de la mezcla total, así como los valores que mide el analizador de la mezcla, y 4) el valor de los módulos de calidad de la mezcla y su valor promediado móvil (rolling value), así como los setpoints fijados para los mismos en el MAC.

Finalmente, durante la ejecución de la simulación, el MPS despliega curvas de tendencia que muestran la evolución del proceso simulado y, al final de cada simulación, se despliega un conjunto de figuras con datos completos sobre todo el proceso simulado, para su análisis gráfico y estadístico.

5.1.1 Bloque de simulación del proceso

Al arrancar el MPS, se despliega la interfaz gráfica del mismo, que inicialmente tiene el aspecto que muestra la Figura 69. Esta interfaz inicial del MPS muestra:

- Un bloque principal de simulación del proceso de mezcla (*Mix Process Simulation*), que permite la configuración del proceso simulado y su operación.
- Un bloque en la parte izquierda inferior, relativo a los módulos de calidad (*Quality Modules block*), que hace posible la monitorización de los módulos de calidad, en sus valores medidos y promediados (*rolling value*), y la de los valores de consigna de los módulos de calidad que estén siendo controlados.
- Un bloque a la derecha relativo al analizador, (*Analyzer block*), que simula el funcionamiento del analizador de la composición de la mezcla.
- Y un bloque en la parte derecha inferior, que muestra el caudal total de mezcla medido y su consigna.

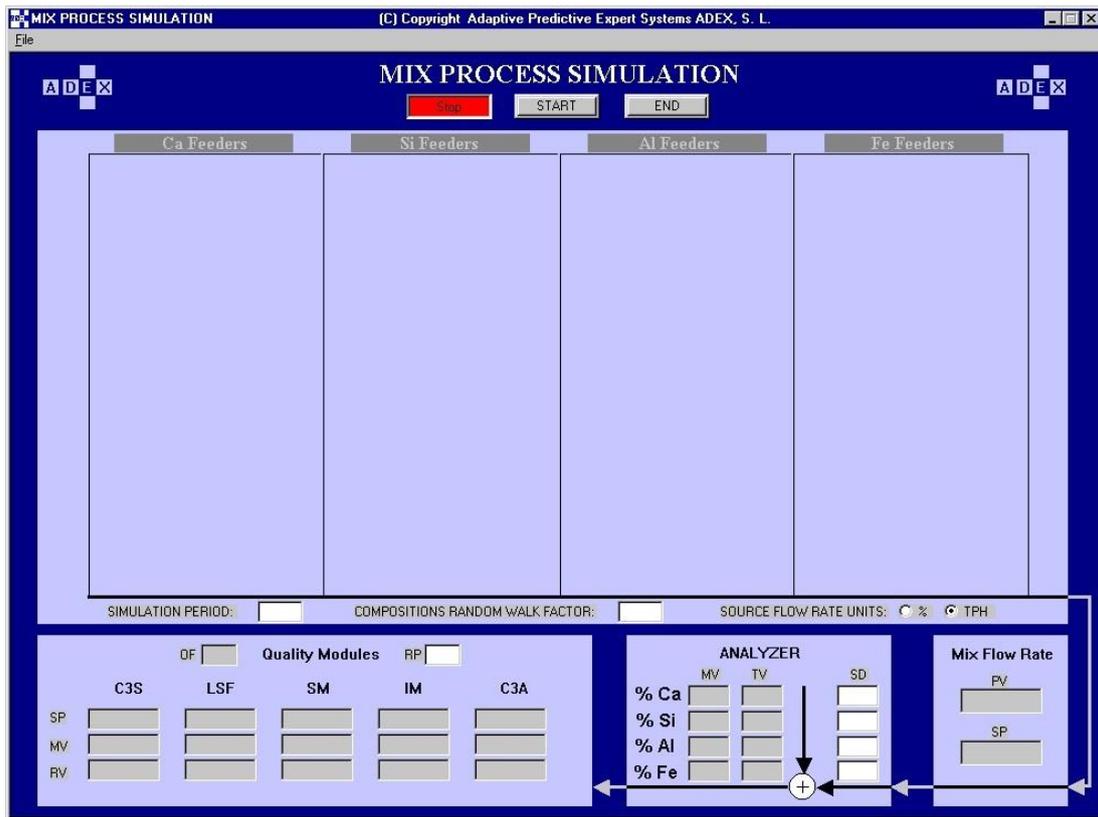


Figura 69. Interfaz inicial del MPS

En la parte superior del bloque principal, se despliega un campo que indica el estado de funcionamiento del simulador. Como muestra la Figura 69, inicialmente este

estado es “*Stop*”, caso en el que el botón adyacente a la derecha muestra la opción *START*, pudiendo así el operador arrancar el proceso de simulación una vez que haya configurado dicho proceso de mezcla simulado. Además, se puede observar que existe un botón adicional *END*, que hace posible que el operador dé por terminado un experimento de simulación, una vez que éste se haya arrancado.

5.1.1.1 Configuración de un alimentador

La interfaz inicial hace posible que el operador determine las fuentes de compuesto que se incluirán en la simulación del proceso de mezcla. Como ya se mencionó en el Capítulo 3, una fuente de compuesto es un conjunto de alimentadores que se pueden considerar como suministradores de uno de los elementos principales de la mezcla, es decir, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

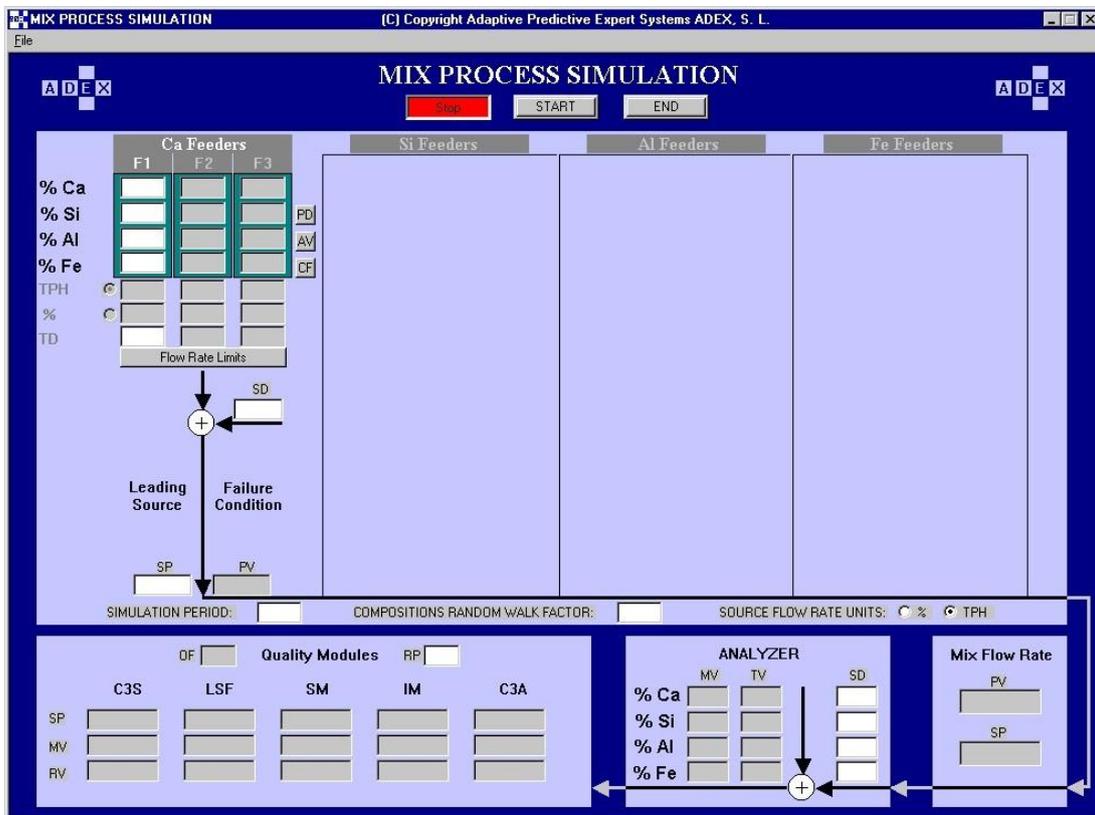


Figura 70. Selección y configuración de los alimentadores de CaO

Por ejemplo, para seleccionar la fuente de CaO en el proceso simulado, el operador simplemente ha de hacer clic en el título “*Ca Feeders*” situado en la parte superior del primer rectángulo del bloque de simulación del proceso, y el simulador desplegará dicho conjunto de “*Ca Feeders*”, tal y como muestra la Figura 70, permitiendo su configuración.

Cuando se elige la fuente de CaO, sólo se activa por defecto un alimentador para los propósitos de simulación. El operador puede declarar hasta tres alimentadores de CaO, como muestra la figura 70, haciendo clic en el título de la parte superior de cada uno de los alimentadores no declarados. Para fijar la composición inicial de la materia prima de un alimentador declarado, se han de rellenar los cuadros de edición de la columna del alimentador, correspondiendo cada cuadro al óxido indicado en la leyenda situada a la izquierda de la columna, es decir, %Ca, %Si %Al y %Fe.

En la misma columna del alimentador, el operador tiene la opción de dejar fijo, en TPH, el caudal de un número de alimentadores, siendo este número igual al número total de alimentadores de esa fuente de elementos menos uno. Alternativamente, haciendo clic en la leyenda %, el operador puede determinar el porcentaje de contribución de cada uno de los alimentadores al caudal total demandado para esa fuente de elemento. Además, el operador puede introducir el tiempo de retardo en segundos, a la altura de la leyenda TD (*Time Delay*). Este tiempo de retardo es el tiempo que tarda la materia prima del alimentador en ir desde el alimentador hasta el analizador de la composición de la mezcla.

Debajo de las columnas de los alimentadores, hay un botón “*Flow Rate Limits*” que permite al operador introducir los límites superior e inferior en TPH para el caudal de los alimentadores, tal y como muestra la Figura 71.

Debajo del botón “*Flow Rate Limits*”, una flecha vertical y otra horizontal confluyen, sumando su efecto. El operador puede introducir, en el campo SD (*Standard Deviation*) situado encima de la flecha horizontal, la desviación estándar del ruido de proceso que se sumará al caudal de la fuente, y que representará en la simulación el error de control del controlador local de caudal.

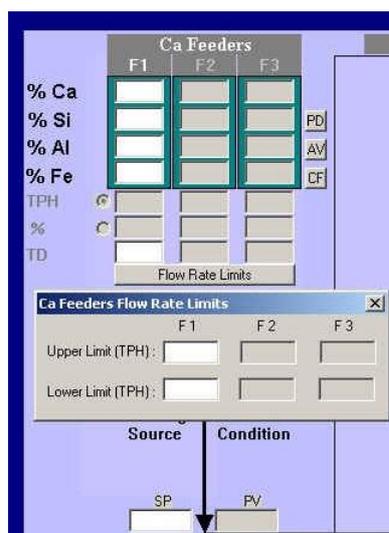


Figura 71. Límites de caudal de los alimentadores

En la parte inferior de la flecha que sale del símbolo de suma, hay un campo SP (*SetPoint*) que permite al operador introducir la consigna inicial para el caudal de la fuente. Posteriormente, tras arrancar la simulación, este campo no será editable y desplegará la consigna de caudal para esa fuente que fija el MAC. En la parte inferior derecha de la misma flecha, se despliega el caudal medido de la fuente en el campo PV (*Process Variable*).

Como se puede observar en la figura 70, encima de estos campos SP y PV están situadas, respectivamente, las leyendas “*Leading Source*” (Fuente Conductora) y “*Failure Condition*” (Condición de Fallo). Se utilizan para simular condiciones de operación que se explicarán más adelante en la sección 5.3.

5.1.1.2 Parámetros comunes de la simulación

En la parte inferior del bloque de simulación del proceso, el operador puede fijar tres parámetros comunes a toda la simulación:

- El período de simulación (*Simulation Period*), que es el tiempo en segundos entre dos ejecuciones del ciclo de operaciones de la simulación. Este ciclo de operaciones de la simulación incluye el cálculo de la composición química real

de la mezcla que pasa por el analizador en el último período de análisis, la medición del analizador de dicha composición y todas las operaciones necesarias para calcular y aplicar las nuevas señales de control al proceso, es decir, las consignas de caudal a cada uno de los alimentadores a partir de los setpoints de caudal fijados por MAC. Evidentemente, este período de análisis puede alargarse o acortarse el tiempo real de la simulación y representa el período de análisis simulado.

- El factor del paseo aleatorio de las composiciones (*Compositions Random Walk Factor*), que es un factor que, multiplicado por los porcentajes de óxido iniciales de las composiciones químicas de los alimentadores declarados, determina la desviación estándar del paseo aleatorio que realiza cada uno de dichos porcentajes de óxido, a partir de sus valores iniciales. Estos paseos aleatorios simulan la evolución natural de las composiciones de las materias primas de cada uno de los alimentadores. De todas formas, para evitar excursiones excesivas que fueran irreales, la desviación de los óxidos respecto de su valor inicial se restringe hasta un cierto valor. De esta forma si el valor del óxido alcanza un determinado umbral T1, tomado el 10 % del valor inicial en la simulación, éste se reduce progresivamente hasta un segundo umbral inferior T2, tomado como el 6 % del valor inicial.

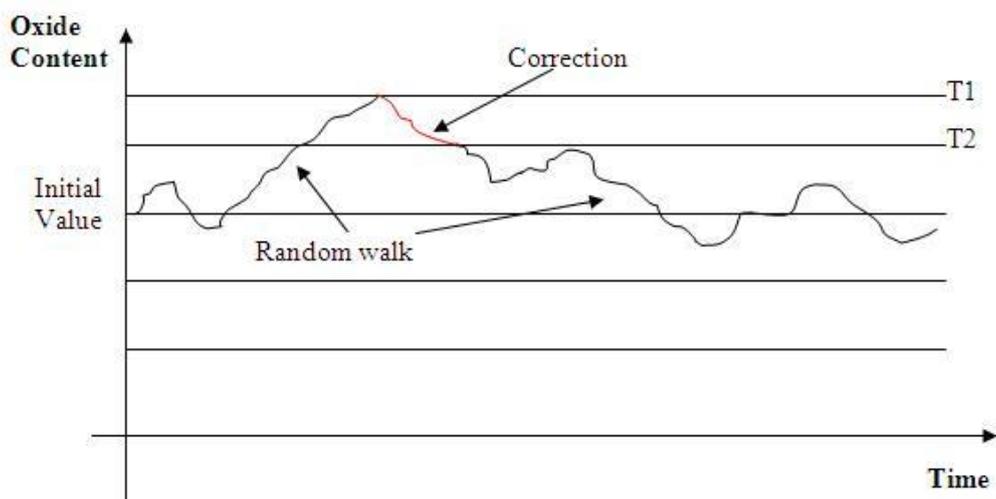


Figura 72. Evolución aleatoria de los óxidos en los alimentadores.

Así por ejemplo, si el contenido en CaO de un alimentador de caliza de la simulación tiene un valor inicial de 50,00 %, nunca se le permitirá que realice excursiones fuera de 50,00 % +/- 5,00 %; o sea, podrá evolucionar aleatoriamente hasta un límite superior de 55,00 % y hasta un límite inferior de 45,00 %. La Figura 72 ilustra la evolución aleatoria simulada para los contenidos de los óxidos de los alimentadores y la corrección restrictiva descrita. La línea roja indica aplicación de dicha corrección.

- Las unidades del caudal de las fuentes (*Source Flow Rate Units*), que se pueden establecer como un % de la mezcla total o en TPH (toneladas por hora).

5.1.1.3 Cambios predefinidos en las composiciones y valores actuales

Los dos botones superiores situados a la derecha de las columnas de los alimentadores (PD, AV), véanse, por ejemplo, las Figura 70, 71, permiten al operador especificar unos cambios predefinidos en la composición del alimentador 1 (F1) de la fuente correspondiente, así como monitorizar los valores de composición actuales del caudal de la fuente, como se explica a continuación.

- PD (Predefined). Cuando se pulsa este botón, se despliega una ventana que presenta 20 columnas de composición, tal y como muestra la Figura 73. Estas 20 columnas de composición se han de configurar de acuerdo a los cambios de composición deseados que hayan de ocurrir en el alimentador 1.

En la parte izquierda inferior de esta ventana de cambios predefinidos (PCC, *Predefined Composition Changes*), el operador puede marcar “*Running*” para hacer que se apliquen a la simulación estos cambios predefinidos así configurados. Además, se puede introducir el valor de los periodos de simulación entre columnas de composición (*Simulation Periods Between Column Compositions*). Este valor representa el número de períodos de simulación que tarda la composición del alimentador 1 en evolucionar desde los valores de una columna a los de la siguiente. En los instantes intermedios entre

estos valores de las dos columnas consecutivas, los valores de las composiciones correspondientes se obtienen por interpolación lineal entre los valores de dichas dos columnas. Además, el operador puede fijar en esta ventana PCC el orden en que se consideran estas columnas de composición para definir la evolución en el tiempo de los valores de la composición del alimentador 1. Si se elige “RANDOM”, el orden queda determinado por números aleatorios entre 1 y 20, generados de forma automática por una función aleatoria. Si se elige la opción “ORDERLY”, el orden considerado será el que ya se ha establecido al rellenar las columnas de composición en la propia ventana PPC.

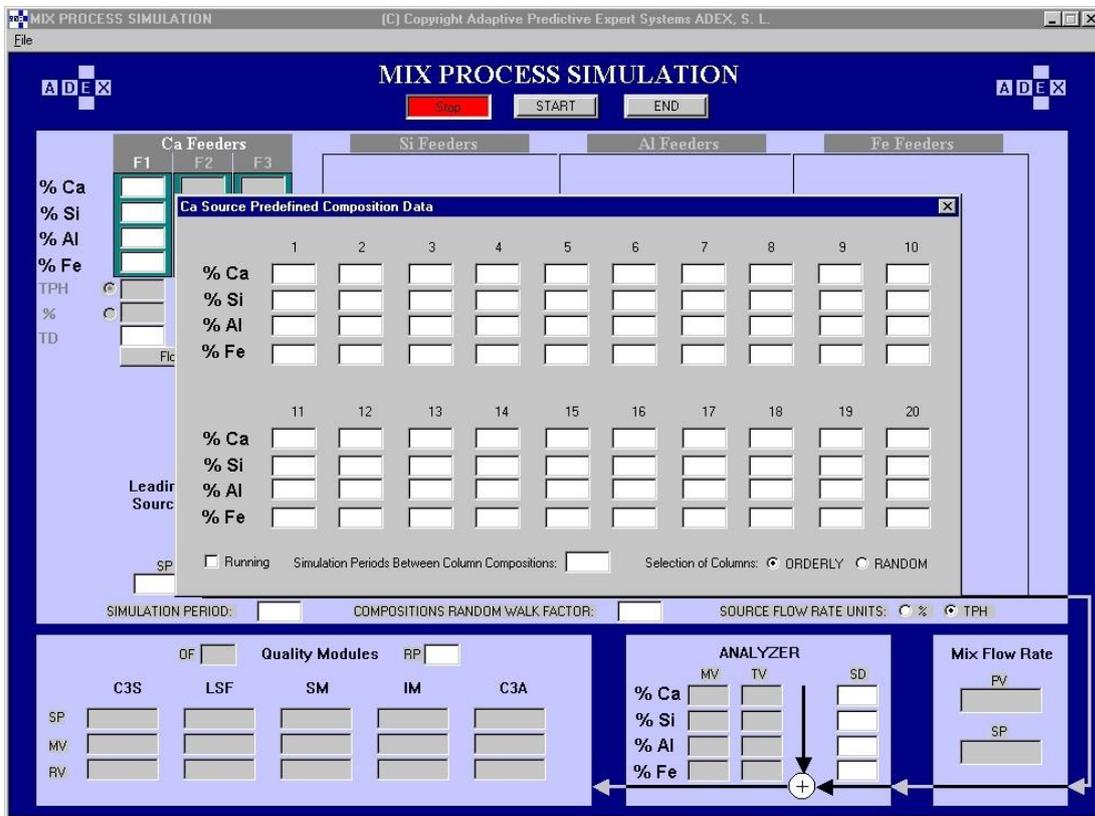


Figura 73. Configuración de cambios predefinidos en las composiciones

- AV (*Actual Values*). Una vez que se ha arrancado la simulación, al pulsar en este botón se despliega, en una ventana próxima a las columnas de los alimentadores, los valores actuales reales de la composición del caudal de la fuente, tal y como muestra la Figura 74.

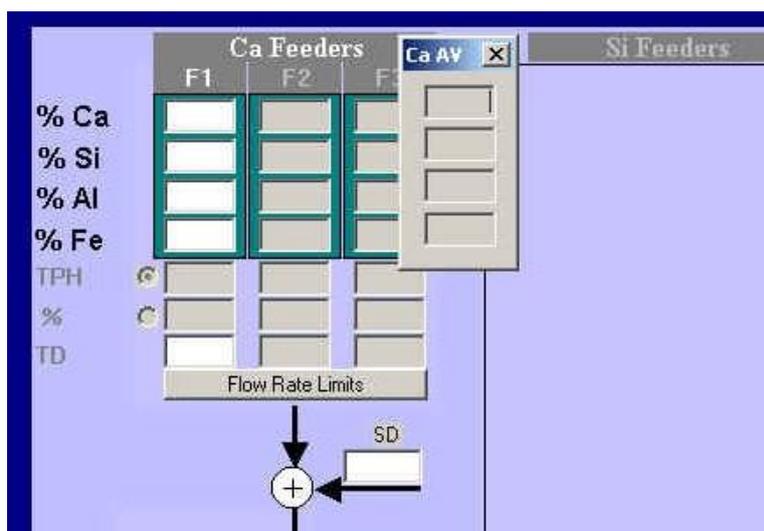


Figura 74. Valores actuales de la composición de la fuente

5.1.1.4 Alimentador correctivo

Se puede incluir un alimentador correctivo dentro de los alimentadores que pertenecen a una fuente, pulsando en el botón CF (*Corrective Feeder*) situado a la derecha de las columnas de los alimentadores. En el actual diseño del MPS, tres es el número máximo de alimentadores en una fuente, incluyendo el alimentador correctivo en caso de que se haya declarado. Cuando esto ocurre, el alimentador 3 (F3) es el que queda declarado como alimentador correctivo y el cuadro de su leyenda muestra un color rojo de fondo. Las Figuras 76 y 78 más adelante muestran alimentadores correctivos declarados. Una vez declarado, el alimentador correctivo se configura de la misma forma que un alimentador estándar no correctivo, pero el sistema MAC sólo lo utiliza para compensar las deficiencias de composición que se detecten en los alimentadores no correctivos de la Fuente, tal y como se indicó en el Capítulo 3.

5.1.1.5 Múltiples fuentes y múltiples alimentadores por fuente

Si el operador decide considerar todas las posibles fuentes de compuesto en el proceso simulado, se ha de pulsar en todos los títulos correspondientes, y se

desplegará una ventana como la que muestra la Figura 75. La descripción realizada anteriormente para las diferentes opciones de configuración relativas a la fuente de CaO es válida por completo para el resto de las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

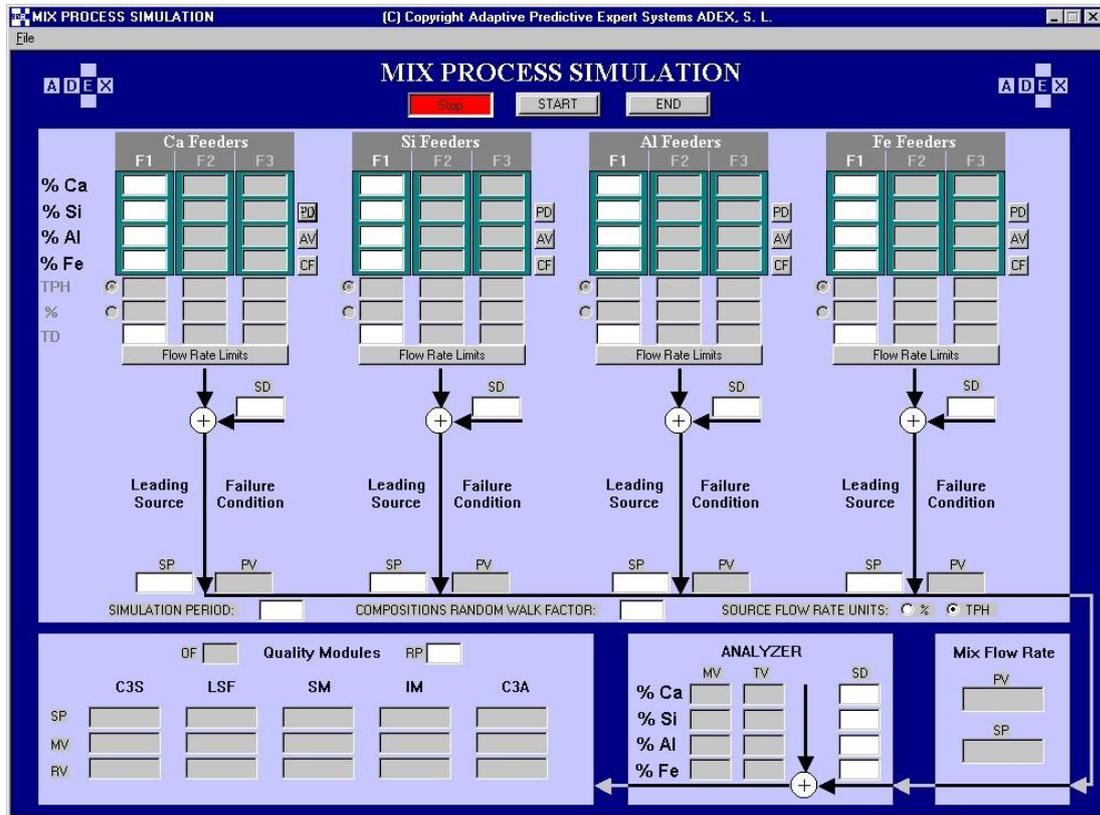


Figura 75. Selección de las fuentes de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃

Una vez que se han declarado las fuentes que se desean, se puede establecer el número de alimentadores dentro de cada fuente. Por ejemplo, tal y como se muestra en la Figura 76, se pueden declarar tres alimentadores de CaO, dos alimentadores de SiO₂, dos alimentadores de Al₂O₃ y un alimentador de Fe₂O₃. En la Figura 76 se puede observar que para los alimentadores de CaO, se ha elegido la opción de fijar un cierto caudal para los alimentadores 1 y 2, 10 TPH y 25 TPH, respectivamente; mientras que para los alimentadores de SiO₂ se ha optado por fijar el porcentaje de contribución de los dos alimentadores al caudal de la fuente de SiO₂, estableciendo que el alimentador 1 proporcione el 30% del caudal de la fuente, proporcionando el alimentador 2, por tanto, el 70% restante. Esta última opción se recomienda sólo cuando los retardos de los alimentadores involucrados sean similares o no difieran en

un más de un período de análisis. Además, se puede observar, por el color rojo de fondo en el título del alimentador 3 de Al_2O_3 , que se ha declarado la existencia de un alimentador correctivo dentro de la fuente de Al_2O_3 .

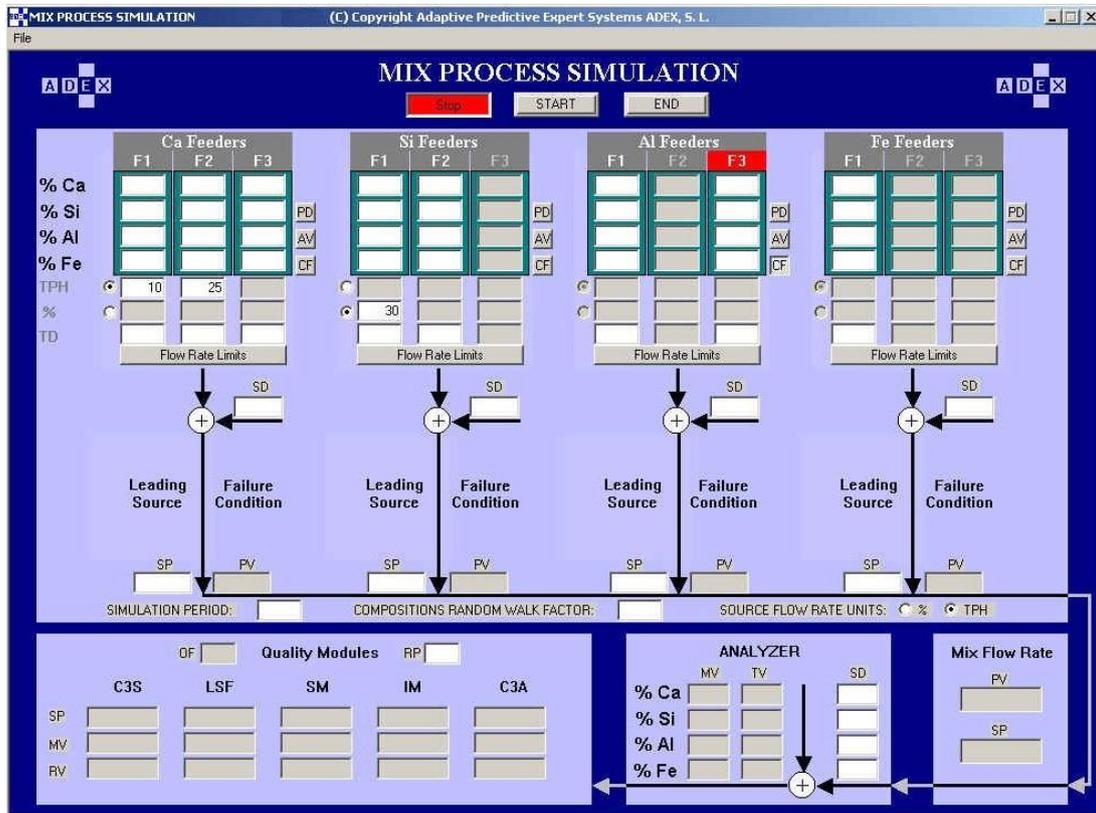


Figura 76. Múltiples alimentadores por fuente y alimentador correctivo

5.1.2 Bloques de caudal de mezcla, analizador y módulos de calidad

El bloque de caudal de la mezcla (*Mix Flow Rate*), situado en la parte inferior derecha de la interfaz del MPS, tiene únicamente una funcionalidad de monitorización, y muestra el valor real del caudal de la mezcla (PV) y su correspondiente consigna.

El bloque del analizador (*Analyzer*) muestra tres columnas de datos. Se utiliza la columna de título SD (*Standard Deviation*) para introducir la desviación estándar correspondiente al ruido de medida del analizador para cada porcentaje de óxido de la composición de la mezcla. Los valores medidos (MV) y los valores reales (TV) de

los porcentajes de los óxidos de la composición de la mezcla se despliegan en las otras dos columnas de este bloque. Los valores medidos se obtienen al sumar a los valores reales de los porcentajes de óxido los correspondientes ruidos de medida del analizador, que se simulan como ruidos gaussianos con una determinada desviación estándar asociada que depende del ancho de la cinta transportadora y que es distinta para cada óxido medido, tal y como se especificó en la sección 1.4.4.

El bloque de los módulos de calidad, situado en la parte inferior izquierda de la interfaz del MPS, muestra cinco columnas de datos, una por cada uno de los módulos de calidad, C₃S, LSF, SM, IM y C₃A. La primera fila de estas columnas despliega el setpoint (SP) de cada uno de los módulos de calidad bajo control, los cuales se han seleccionado en el sistema MAC. La segunda fila muestra el valor medido de los correspondientes módulos (MV), el cual se calcula a partir de las medidas filtradas de los porcentajes de óxido de la composición de la mezcla. Estos valores filtrados de los porcentajes de los óxidos se obtienen por medio de un filtro exponencial de primer orden, cuyo valor ha sido fijado en el sistema MAC mediante el parámetro OF (Oxide Filter), mostrándose en el MPS con propósitos de monitorización únicamente. Finalmente, la tercera fila de cada columna despliega el valor promedio de los módulos (RV), el cual se calcula como una media móvil a lo largo de un período de los valores de los módulos de calidad calculados a partir de los valores medidos de los porcentajes de los óxidos en la composición de la mezcla. A la derecha del bloque de módulos de calidad hay un campo RP (*Rolling Period*), en el que se introduce el período para el cálculo de esta media móvil. La media móvil calculada es una media móvil aritmética, de forma que el *rolling value* del módulo de calidad MC en el instante k, MC_{RV}(k), se calcula de la siguiente forma:

$$MC_{RV}(k) = \frac{\sum_{i=0}^{RP-1} MC(k-i)}{RP}$$

5.2 Escenarios de Procesos de Mezcla

Con objeto de facilitar la operación deseada de simulación, el MPS tiene la capacidad de almacenar en disco diferentes escenarios de proceso de mezcla simulados, incluyendo dentro de cada escenario almacenado las fuentes de compuesto declaradas y los alimentadores declarados en cada fuente de compuesto, las composiciones iniciales de los alimentadores correctivos y no correctivos, su evolución a partir de los valores iniciales en forma de paseos aleatorios y/o con cambios predefinidos de composición, así como los correspondientes ruidos de proceso y de medida. Para ello, basta pulsar en la pestaña “File” de la barra de Menú, en la parte superior izquierda de la interfaz del MPS, y se desplegará un menú con las opciones “Save” y “Load”, tal y como se muestra en la Figura 77.

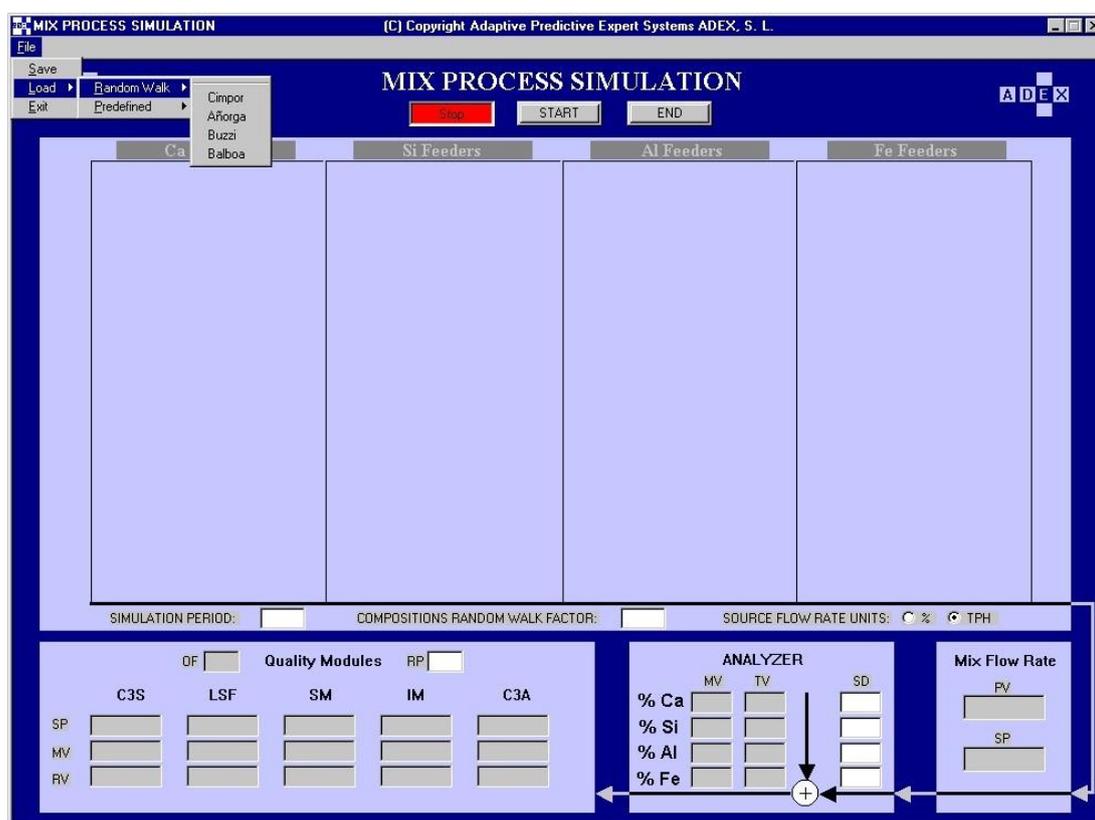


Figura 77. Almacenamiento-Recuperación de escenarios de procesos de mezcla

5.3 Descripción de la operación

5.3.1 Arranque, parada y finalización

Una vez que se ha configurado el MPS, al pulsar en el botón START comienzan a ejecutarse los ciclos de simulación del proceso. Cuando esto ocurre, el software del MPS comprueba que la configuración introducida por el operador es correcta, y en caso negativo, despliega el correspondiente mensaje indicativo del error de configuración encontrado. Cuando la configuración es correcta:

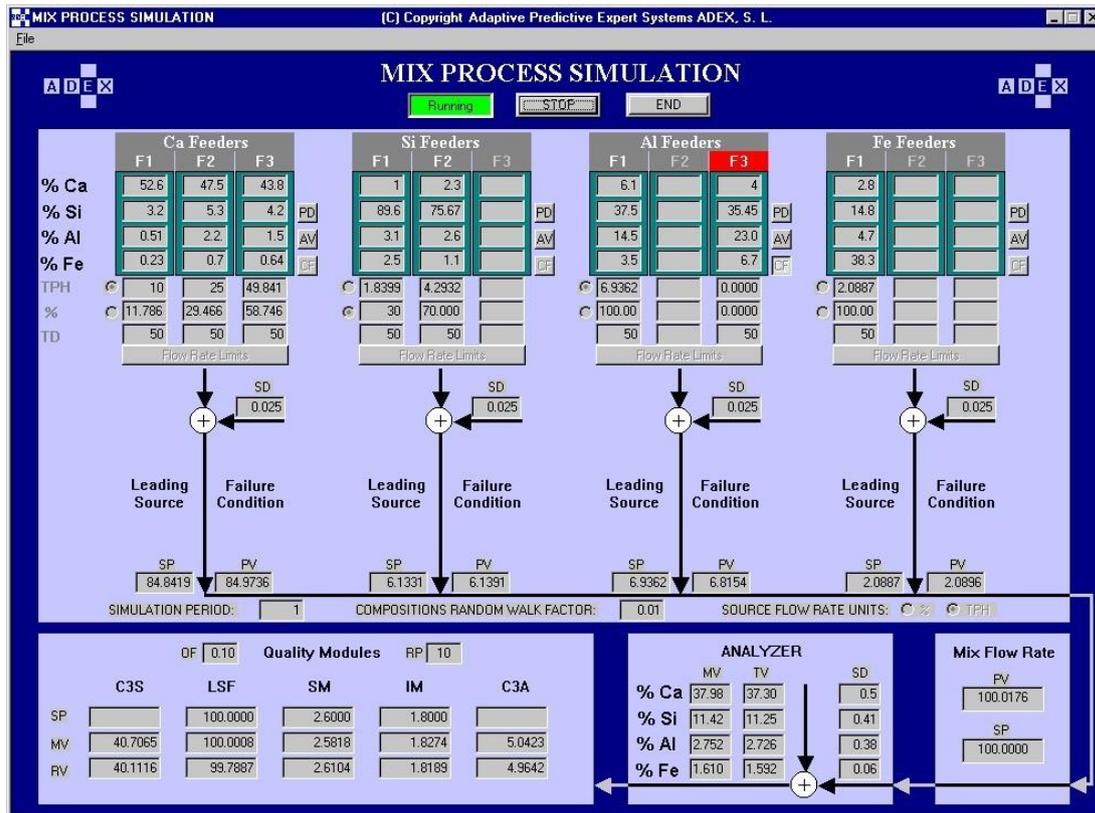


Figura 78. Simulación de un proceso de mezcla en ejecución

- El estado del MPS cambia de “Stop” a “Running” y el botón adyacente al indicador de estado pasa de proporcionar la opción de START a proporcionar la opción de STOP. Estos cambios, junto con otros aspectos del MPS, se muestran en la Figura 78.
- Por otro lado, el estado del sistema MAC pasará de OFF a ON, y su primer modo de operación será MANUAL, tal y como se explicó en el Capítulo 4, recibiendo las consignas de los caudales de las fuentes del proceso simulado, los cuales han sido introducidos inicialmente por el operador en el MPS.

- Los ciclos de simulación se ejecutarán de acuerdo al periodo de simulación fijado por el operador.

Bajo control automático, el sistema MAC generará las consignas de caudal para cada una de las fuentes, los cuales han de ser aplicados en el MPS con objeto de conducir los módulos de calidad bajo control hacia sus setpoints.

El operador tiene la posibilidad de detener los ciclos de simulación que ejecuta el MPS en cualquier instante pulsando en el botón con la opción STOP. Cuando el MPS entra así en estado “*Stop*”, el operador puede cambiar los valores de configuración del MPS como desee. A continuación, se puede retomar de nuevo la simulación, que continuará con la ejecución de los ciclos de simulación por parte del MPS bajo las nuevas condiciones.

Finalmente, se puede finalizar un experimento de simulación haciendo clic en el botón END.

5.3.2 Condición de fallo

Cuando se desee simular un atasco u obstrucción en una fuente de compuesto durante la ejecución de un experimento, se puede detener la simulación del proceso y pulsar en el título “*Failure Condition*” de la correspondiente fuente. Por ejemplo, si el operador pulsa en el título “*Failure Condition*” de la fuente de CaO de la Figura 78, este título queda sustituido por dos campos, DF y F, tal y como muestra la Figura 79. El atasco se simula multiplicando el caudal de la fuente, o el caudal de uno de los alimentadores de la fuente, por un “factor de decrecimiento” (“*Decreasing Factor*”, DF). Estas condiciones de atasco se introducen de la siguiente manera:

- En el campo DF de la izquierda, se fija el valor del factor de decrecimiento, cuyo rango varía entre 0 y 1.

- En el campo F de la derecha, se fija el número del alimentador al cual se le aplica el factor de decrecimiento. Si se introduce 0, el factor de decrecimiento se aplicará a todos los alimentadores, es decir, al caudal de la fuente del compuesto.

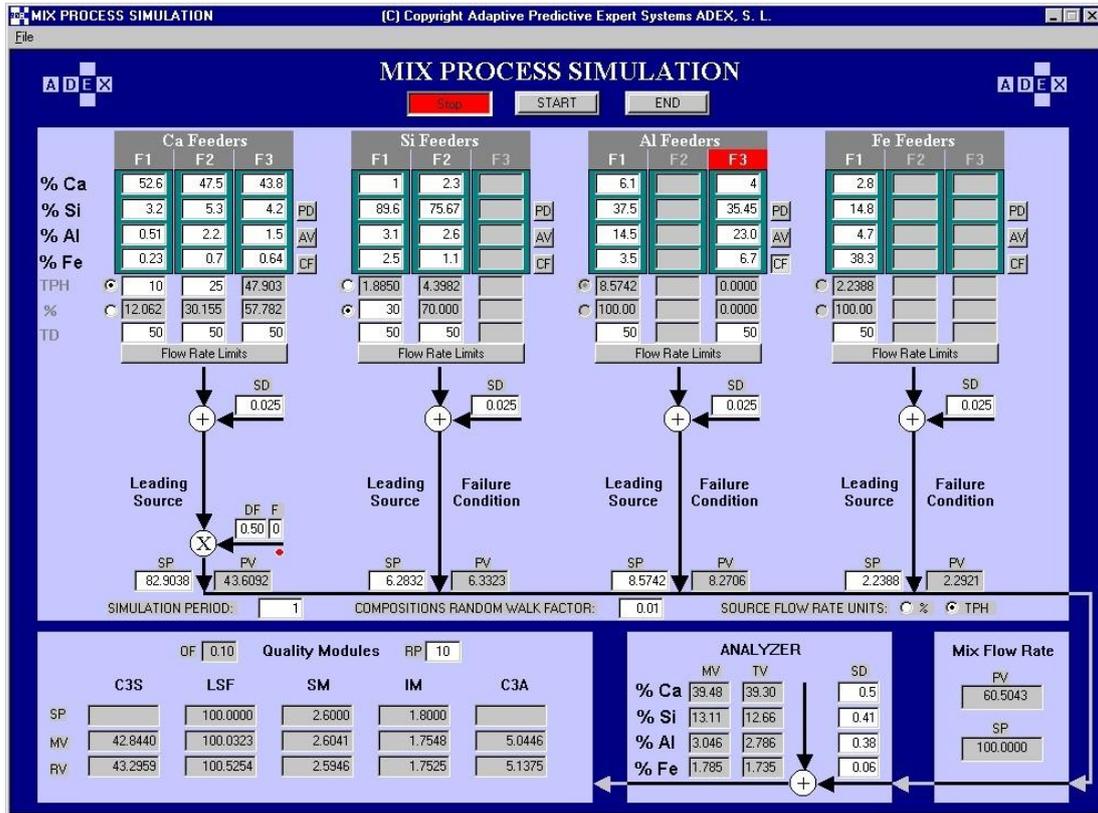


Figura 79. Configuración de la simulación de un atasco en la fuente de CaO

Una vez que se han fijado las condiciones de fallo, se puede reanudar de nuevo la simulación del proceso para observar el rendimiento del sistema bajo dichas condiciones. Si se quiere dar por terminada la condición de fallo, se ha de detener la simulación del proceso de nuevo y pulsar en el círculo rojo que aparece bajo los dos campos DF y F mencionados anteriormente. Y nuevamente se puede reanudar la simulación del proceso.

5.3.3 Fuente Incontrolable – Fuente Conductora

Cuando se quiere simular en el MPS el funcionamiento incontrolable de una fuente, que hace que se pueda definir en el MAC como fuente conductora, durante la ejecución de un experimento, se puede detener la simulación del proceso y pulsar en el título “Leading Source” de la fuente correspondiente. El caudal de la fuente incontrolable o fuente conductora se simula añadiendo a la consigna de la fuente correspondiente un paseo aleatorio que se genera integrando un ruido blanco. En los dos campos que aparecen bajo el título “Leading Source”, mostrados en la Figura 80 para la fuente de CaO, se pueden fijar las condiciones de la fuente incontrolable de la siguiente manera:

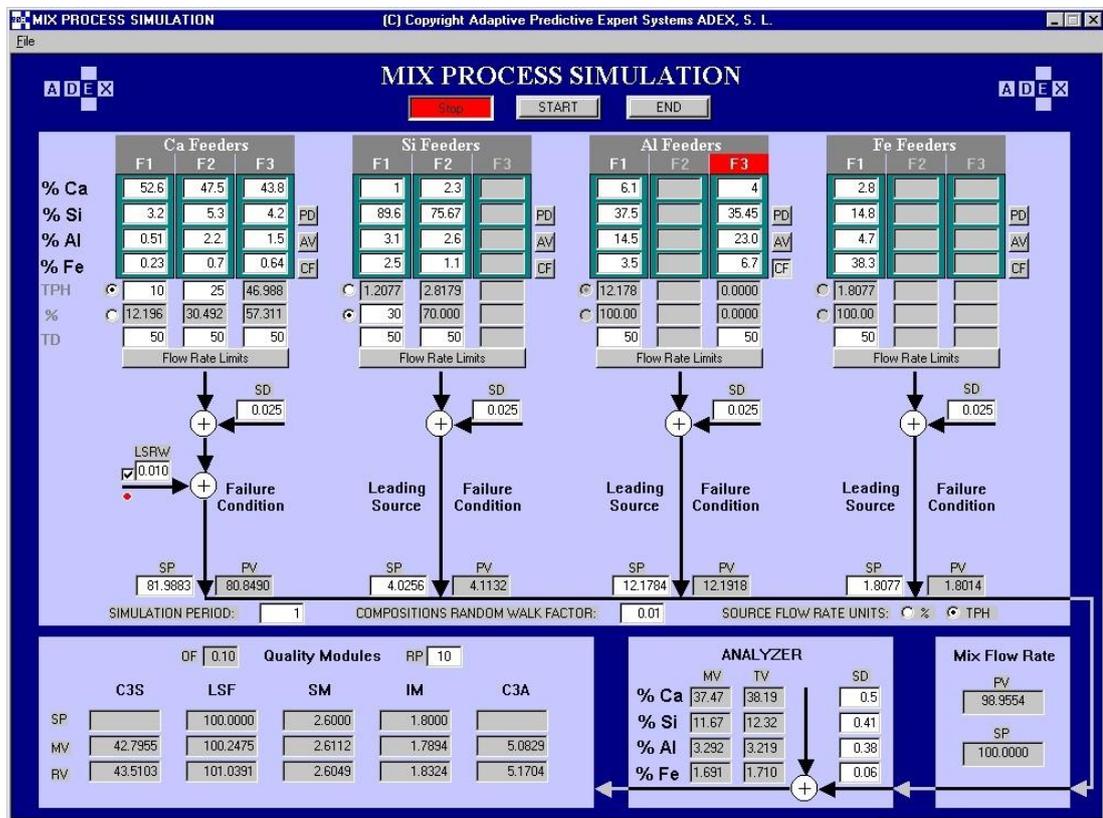


Figura 80. Simulación del funcionamiento de la fuente de CaO como fuente conductora

- En el campo de la derecha, bajo el título LSRW (Leading Source Random Walk), se fija el valor de la desviación estándar del ruido blanco que se integra para generar el correspondiente paseo aleatorio.

- El check box de la izquierda se utiliza para confirmar que se desea simular el funcionamiento bajo condiciones de fuente incontrolable.

Una vez que se han fijado las condiciones de fuente conductora, se puede reanudar la simulación y observar el rendimiento del sistema bajo dichas condiciones. Si se desea dar por terminada la condición de fuente conductora, se ha de detener la simulación del proceso y pulsar en el círculo rojo que aparece bajo el campo LSRW mencionado anteriormente. Y nuevamente se puede reanudar la simulación del proceso de mezcla.

5.4 Monitorización y resultados del proceso de mezcla

El MPS utiliza la capacidad gráfica de Matlab (The Mathworks, Inc, 2015) para llevar a cabo la monitorización del proceso, desplegando un conjunto de curvas de tendencia que describen la evolución del proceso de mezcla a medida que avanza la simulación.

Asimismo, una vez que se da por finalizado el experimento en simulación, el MPS proporciona la opción de visualizar otro conjunto de figuras que contienen la evolución de todas las variables fundamentales que se han de considerar para evaluar el rendimiento del sistema MAC a lo largo del experimento. Además, algunas de estas figuras proporcionan índices estadísticos sobre el rendimiento de MAC a lo largo del todo el experimento.

Para hacer uso de las capacidades gráficas y de cálculo de Matlab, el MPS se aprovecha de que Matlab está definido como un servidor DCOM y utiliza la interfaz que éste expone. En la Figura 81 se muestra a título ilustrativo, parte del código fuente en C++ de comunicación con Matlab y de utilización de sus comandos gráficos y estadísticos

```

#include "mlapp.h"
extern DIMLApp m_matlab;
//Linking to MATLAB
if(! m_matlab.CreateDispatch("Matlab.Application.5"))
{
    if(! m_matlab.CreateDispatch("Matlab.Application.6"))
    {
        if(! m_matlab.CreateDispatch("Matlab.Application.7"))
        {
            if(! m_matlab.CreateDispatch("Matlab.Application.8"))
            {
                AfxMessageBox("No se pudo realizar la conexion con el objeto servidor");
                return -1;
            }
        }
    }
}
//Create the variables we need in the matlab workspace
m_matlab.Execute((LPCTSTR) "LSFvar");
//display Matlab commands for drawing
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"set(figure(1), 'Position',[10,40,780,490])");
//Subgraph 2,2,1
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"subplot(2,2,1)");
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"plot(setpoint1/10,'k')");
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"hold on");
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"plot(LSFvar/10)");
m_matlab.Execute((LPCTSTR)"hold on");
//Mean and Standard Deviation
LSFString="text("+Indice+"/2,102, strcat('LSF Average: ', num2str(mean(LSFvar))))";
m_matlab.Execute((LPCTSTR)LSFString);
LSFString="text("+Indice+"/2,101, strcat('LSF Standard Deviation: ', num2str(std(LSFvar))))";
m_matlab.Execute((LPCTSTR)LSFString);

```

Figura 81. Utilización de las capacidades gráficas y estadísticas de Matlab

5.4.1 Monitorización gráfica y curvas de evolución

La Figura 82 muestra las cuatro gráficas que se despliegan en tiempo real, a la vez que se está ejecutando la simulación, las cuales contienen la evolución de las siguientes variables:

- La gráfica 1, situada en la parte superior izquierda, muestra la evolución de los módulos de calidad y de sus setpoints ("*QC Modules & SetPoints*"). El LSF (o el C₃S) se representa estando dividido por 10 en esta gráfica al objeto de que los módulos estén en la misma escala. Al SM se le suman 3 unidades para separarlo del IM.
- La gráfica 2, situada en la parte inferior izquierda de la figura, representa la evolución de las consignas de caudal para las fuentes ("*Sources Flow Rates SetPoints*"), es decir, las señales de control generadas por el MAC y que se aplican al proceso de mezcla simulado.

- La gráfica 3, situada en la parte superior derecha de la figura, muestra, para cada fuente de compuesto, la evolución del porcentaje del óxido del compuesto correspondiente dentro de esa fuente de compuesto.
- La gráfica 4, situada en la parte inferior derecha de la figura, representes la evolución de los caudales reales de las fuentes aplicados al proceso de mezcla simulado. Estos caudales reales de las fuentes incluyen los ruidos de proceso que simulan los errores de control que introducen los controladores locales de caudal. Estos ruidos de proceso se generan teniendo en cuenta las correspondientes desviaciones estándar establecidas para cada controlador de caudal al configurar la simulación.

La figura con estas cuatro gráficas se actualiza cada 20 ciclos de simulación. Por tanto, se despliega por primera vez, para cada experimento, una vez que se han ejecutado 20 ciclos de simulación.

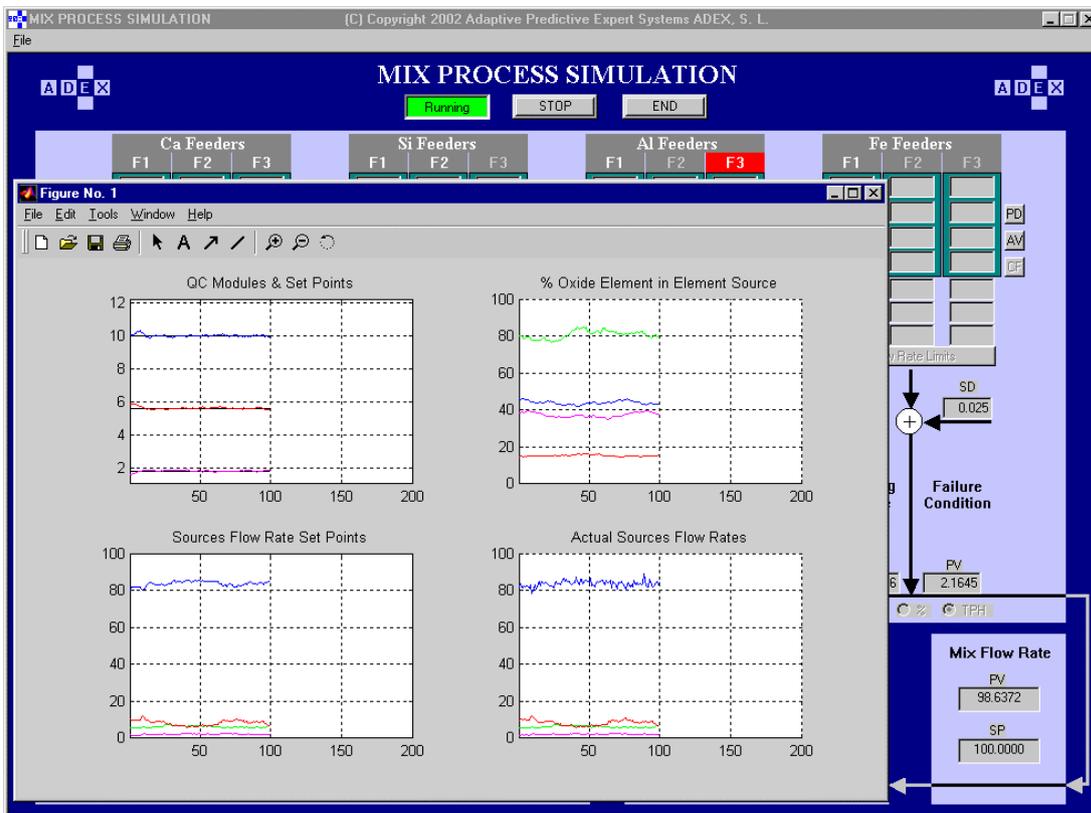


Figura 82. Curvas de evolución del experimento en simulación

5.4.2 Análisis gráfico

Al final de cada experimento, el MPS despliega un conjunto de figuras que permiten llevar a cabo un análisis gráfico de los resultados del mismo. Estas figuras resumen son las siguientes (Figuras 83 a 94).

- Figura 83, muestra completas las curvas de evolución de la Figura 82 al final de cada experimento de simulación.
- La Figura 84 muestra en una única gráfica la evolución detallada de los módulos de calidad y sus setpoints.
- La Figura 85 ilustra los porcentajes medidos por el analizador para los cuatro óxidos principales de la composición química de la mezcla.
- La Figura 86 muestra las consignas de caudal de las fuentes, es decir, las señales de control enviadas por el MAC.
- La Figura 87 representa, para cada módulo de calidad, el porcentaje de la fuente del compuesto en la fuente del módulo, es decir, la señal de control generada por el controlador ADEX de cada módulo de calidad, tal y como se ha definido en los Capítulos 3 y 4.
- La Figura 88 muestra los cambios en la composición frente a las consignas de caudal generadas, por medio de una gráfica superior y una inferior. La gráfica superior representa, para cada fuente de compuesto, la evolución del porcentaje del óxido del compuesto correspondiente dentro de esa fuente de compuesto, es decir, la gráfica 3 de la Figura 82 completa al final del experimento. La gráfica inferior representa la evolución de las consignas de caudal de las fuentes, es decir, la gráfica 2 de la Figura 82 completa al final del experimento.
- Las Figuras 89 a 92 ilustran la evolución del porcentaje de los cuatro óxidos principales en cada una de las fuentes de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, respectivamente.

- La Figura 93 representa el porcentaje medido por el analizador para los cuatro óxidos principales en la mezcla y los valores reales correspondientes. Esta figura tiene como finalidad ilustrar el nivel de ruido de medida que simula el rendimiento del analizador.
- La Figura 94 muestra los caudales de las fuentes con y sin ruido de proceso. Tiene como objetivo mostrar el nivel de ruido de proceso considerado en la simulación.

5.4.3 Índices de rendimiento

Las Figuras 95, 96 y 97 muestran, respectivamente, los valores medidos de LSF (o C_3S), SM e IM (o C_3A) y sus respectivos índices estadísticos, los cuales son de gran utilidad para evaluar el rendimiento del MAC. Los módulos de calidad considerados en estas figuras se calculan a partir de la media ponderada exponencial de los porcentajes de óxido medidos por el analizador en la mezcla, es decir, aplicando un filtro de primer orden a las medidas de los óxidos del analizador, de constante de filtrado OF (*Oxide Filter*), tal y como se mencionó en los Capítulos 3 y 4. Éste valor de los módulos de calidad, obtenido a partir del filtrado de los óxidos, es la variable que controlan los controladores ADEX de los módulos de calidad.

Las Figuras 98, 99 y 100 representan, respectivamente, el *rolling value* o media móvil de LSF (o C_3S), SM e IM (o C_3A) y sus respectivos índices estadísticos. Estos valores medios móviles de los módulos de calidad se calculan como se ha especificado en la sección 5.1.2, teniendo en cuenta el valor introducido en la configuración del MPS en el campo RP (*Rolling Period*) para el período de cálculo de la media móvil.

Los índices de rendimiento que se despliegan son

- El número de cortes del módulo de calidad a su consigna, “*N of cuts of the LSF target*”.

- El número de minutos por corte “*N. of minutes per LSF cut*”.
- La media del módulo de calidad “*LSF Average*”.
- La desviación estándar del módulo de calidad “*LSF Standard Deviation*”.

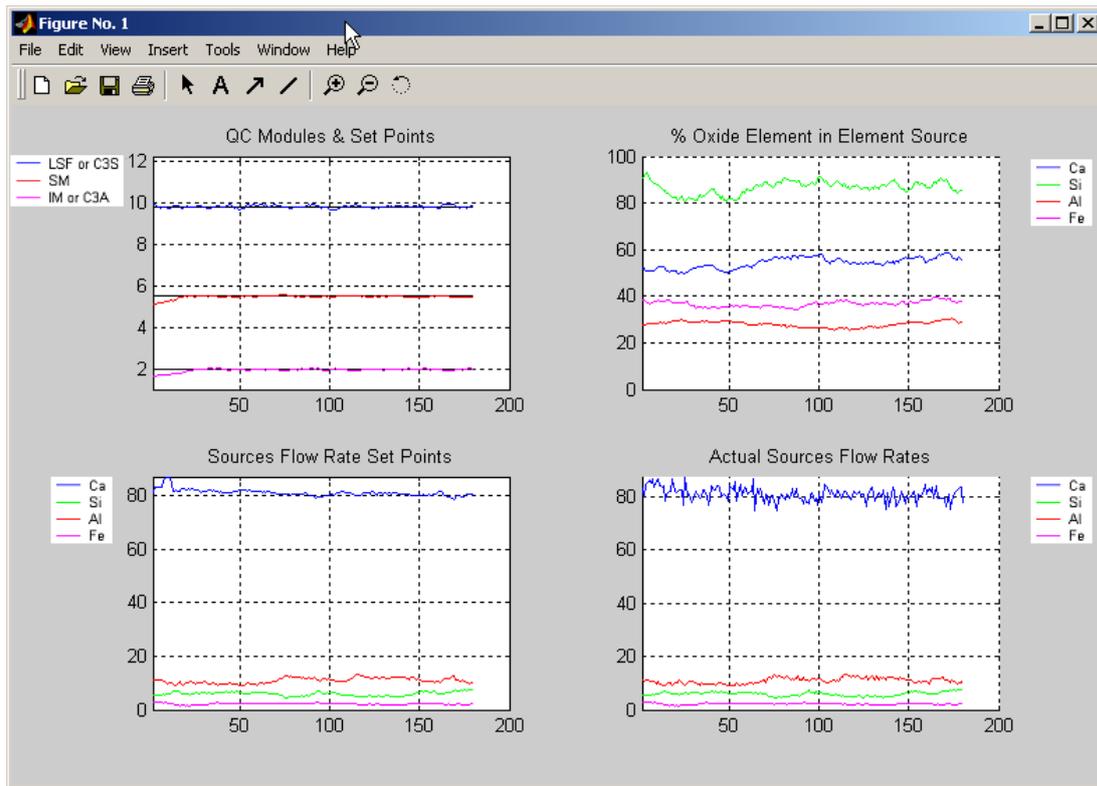


Figura 83. Curvas de evolución completas al final de la simulación

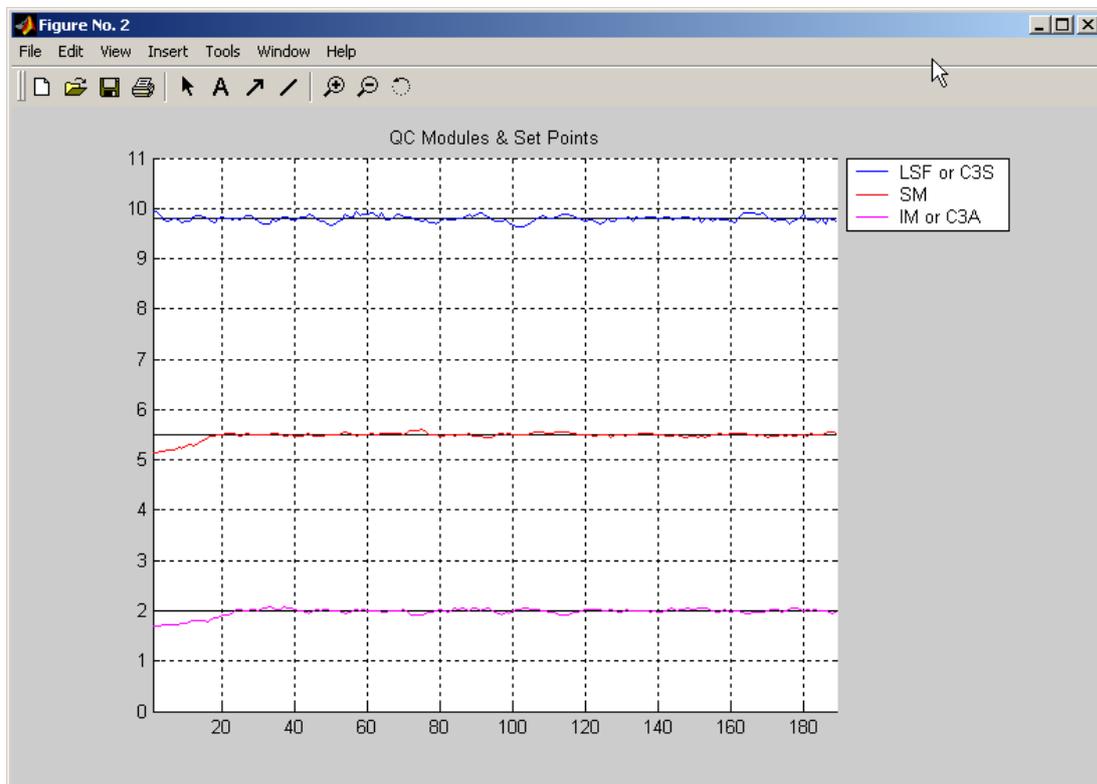


Figura 84. Módulos de calidad y setpoints

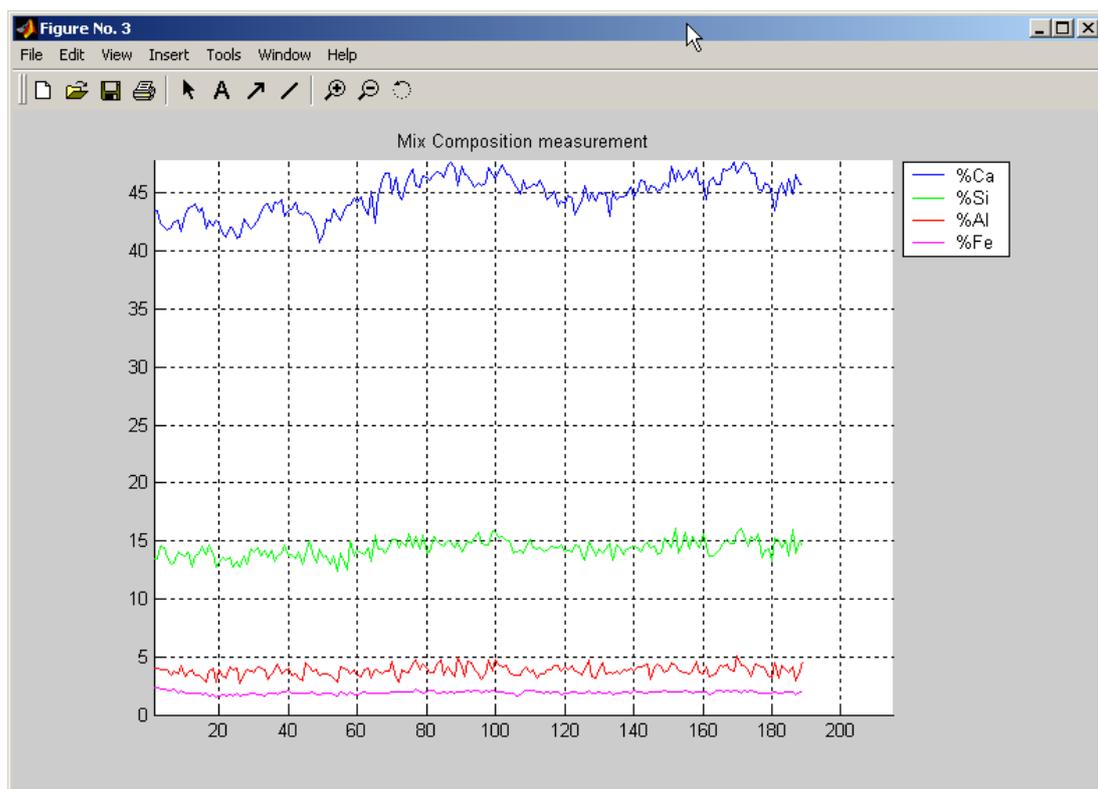


Figura 85. Evolución de la composición química de la mezcla

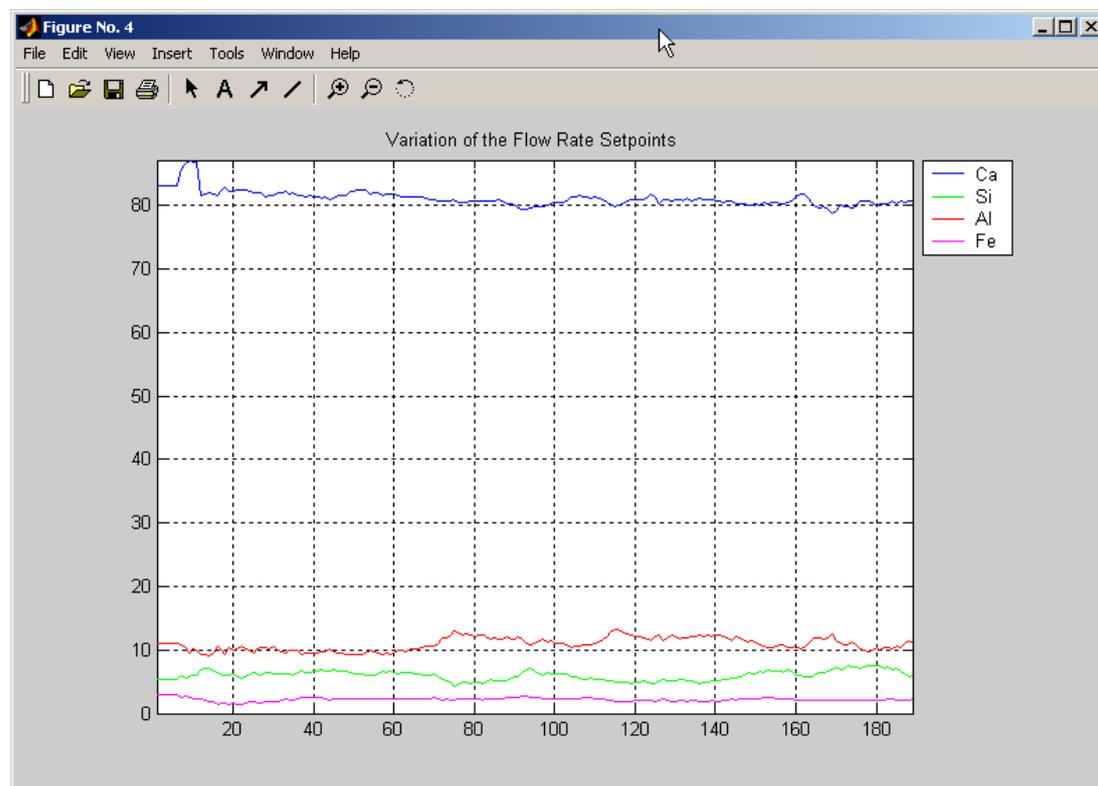


Figura 86. Consignas de caudal generadas por el MAC

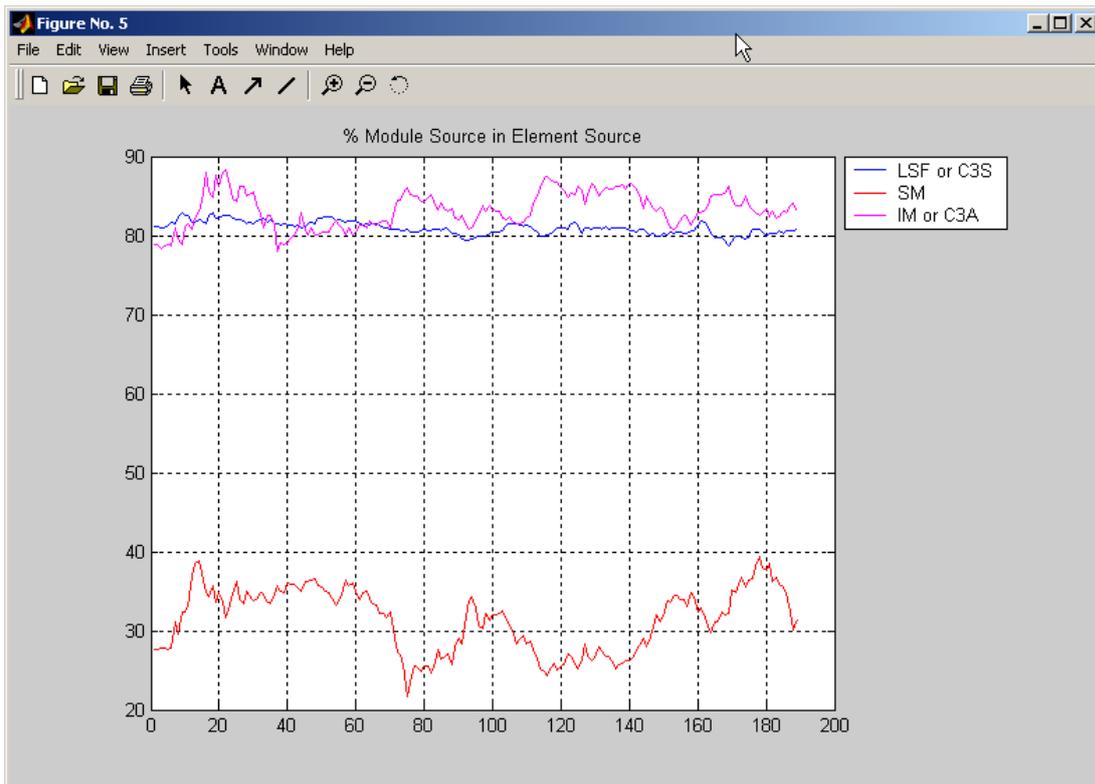


Figura 87. Señales de control: porcentaje de la fuente de compuesto en la fuente del módulo

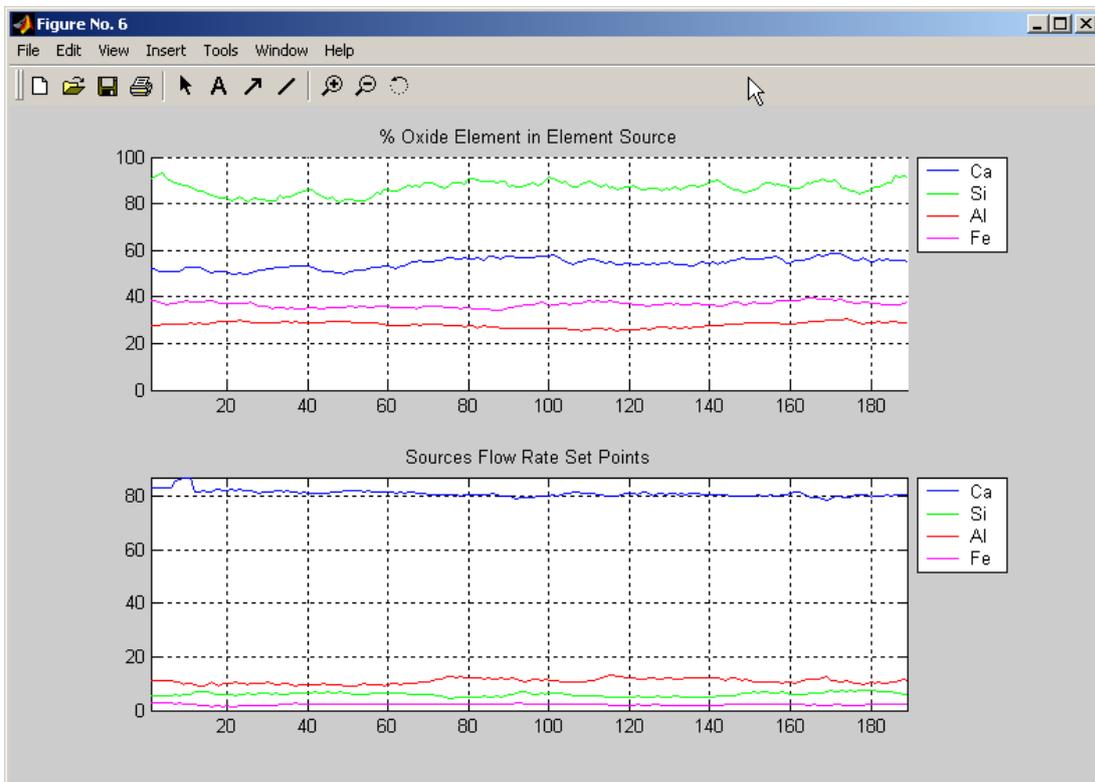


Figura 88. Cambios de composición frente a consignas de caudal

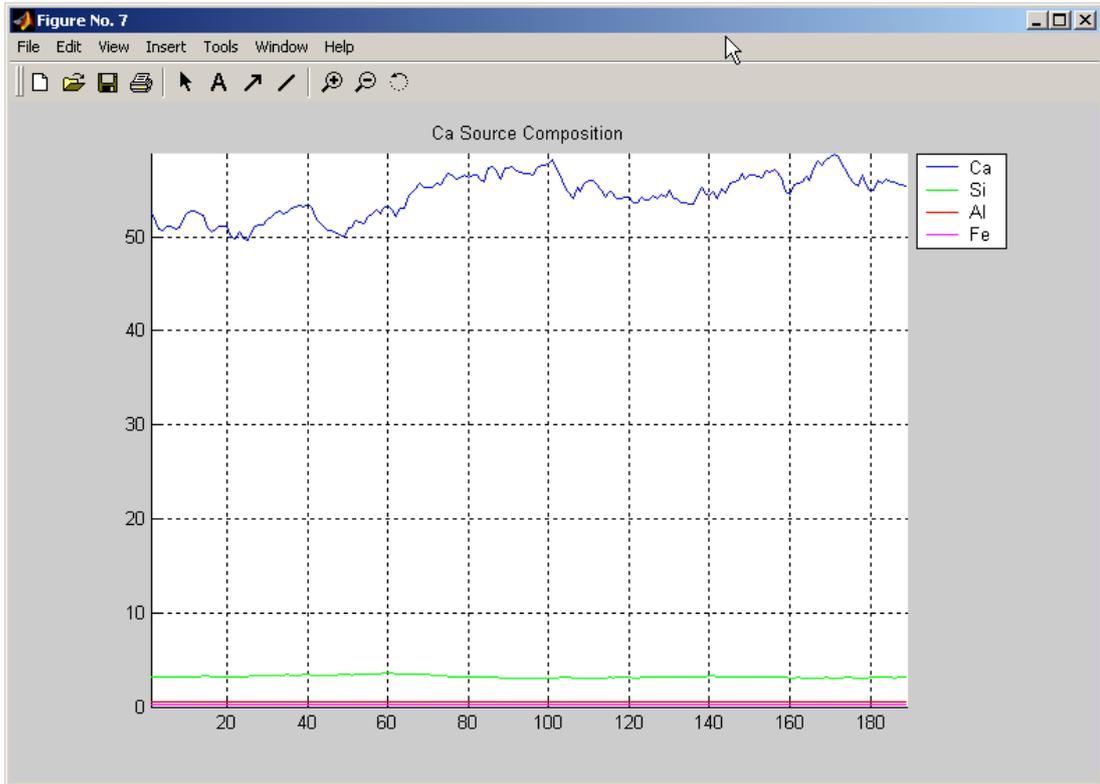


Figura 89. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de CaO

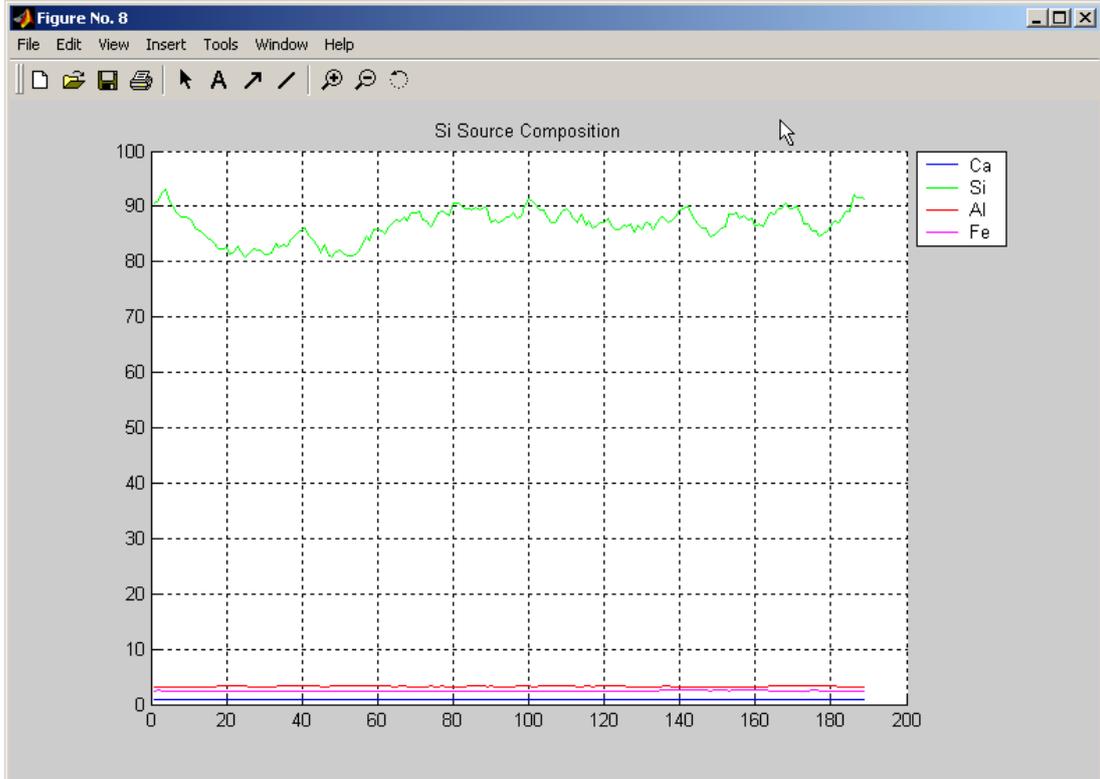


Figura 90. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de SiO₂

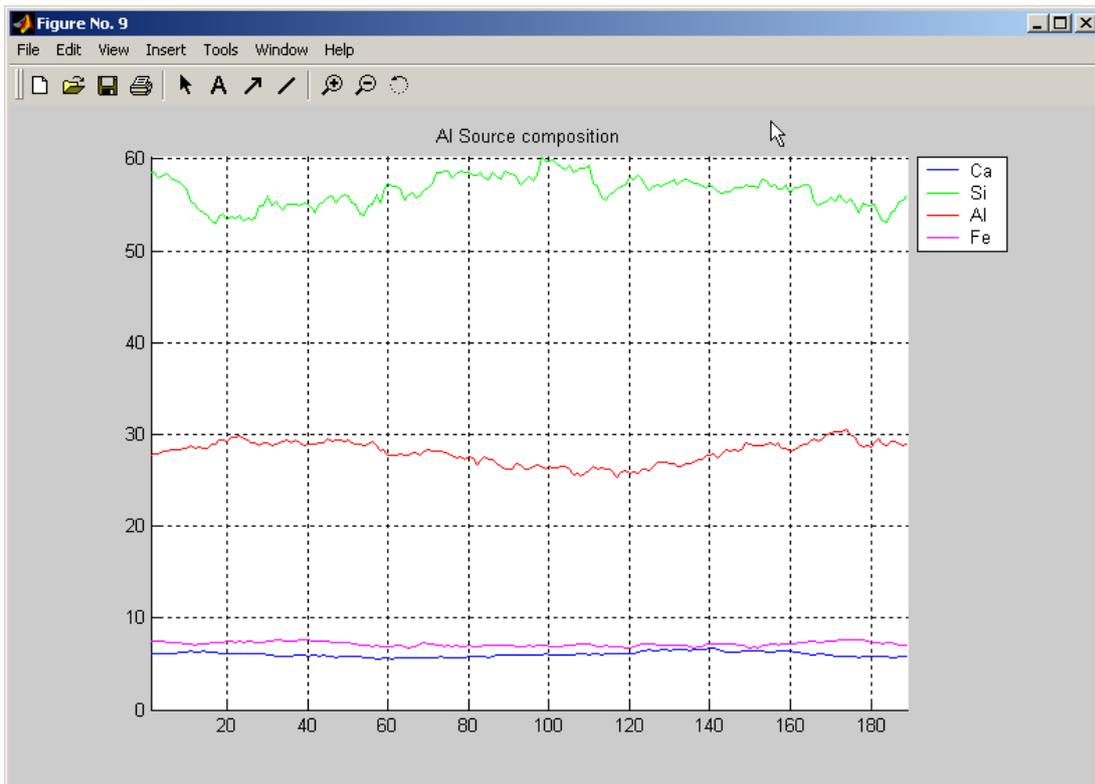


Figura 91. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de Al_2O_3

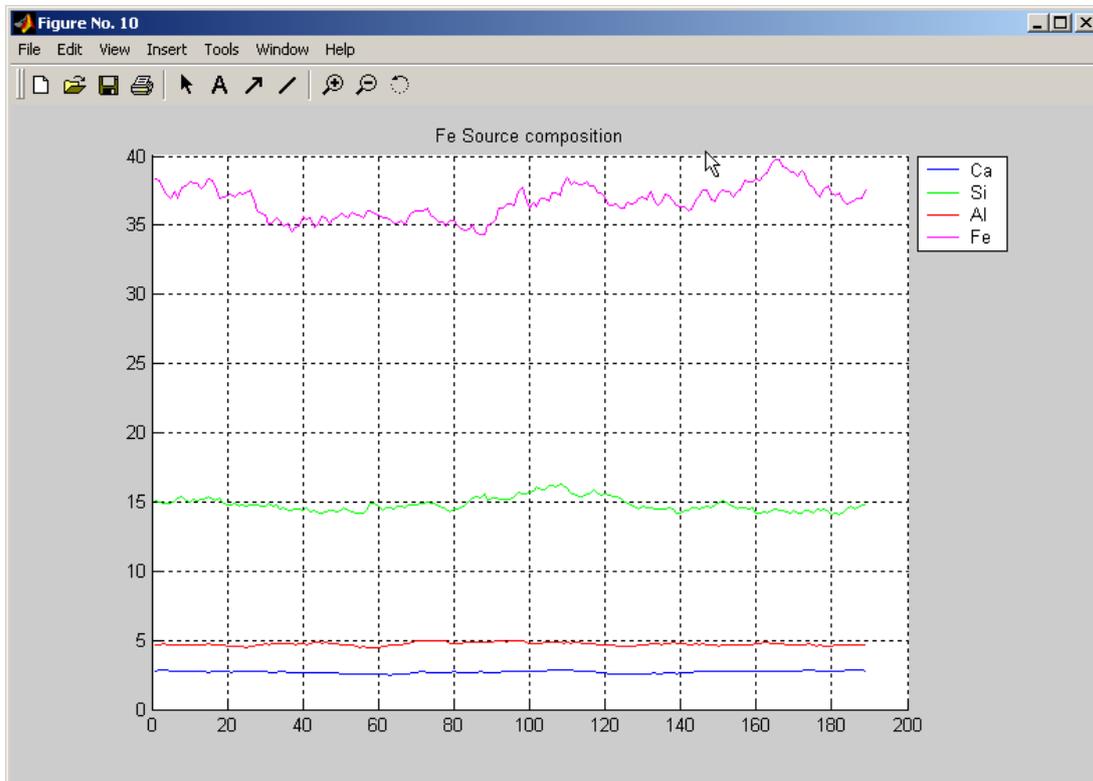


Figura 92. Evolución del porcentaje de los óxidos en la fuente de Fe_2O_3

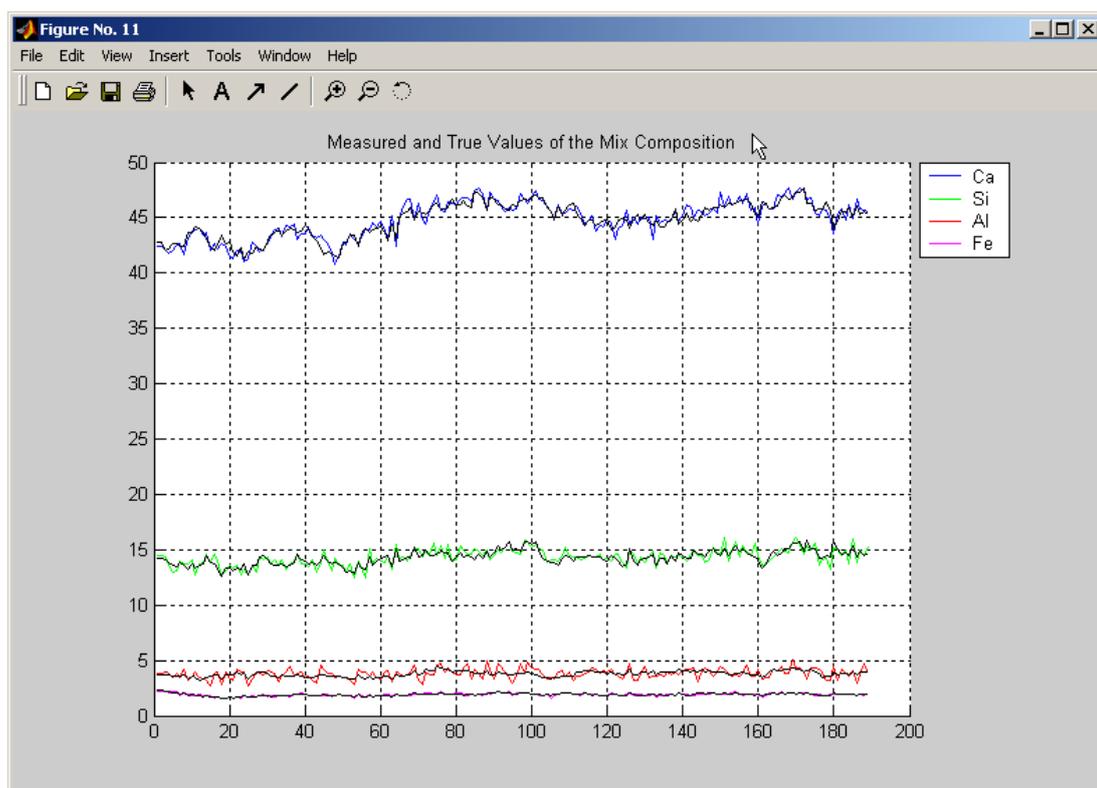


Figura 93. Valores reales y medidos de la composición de la mezcla

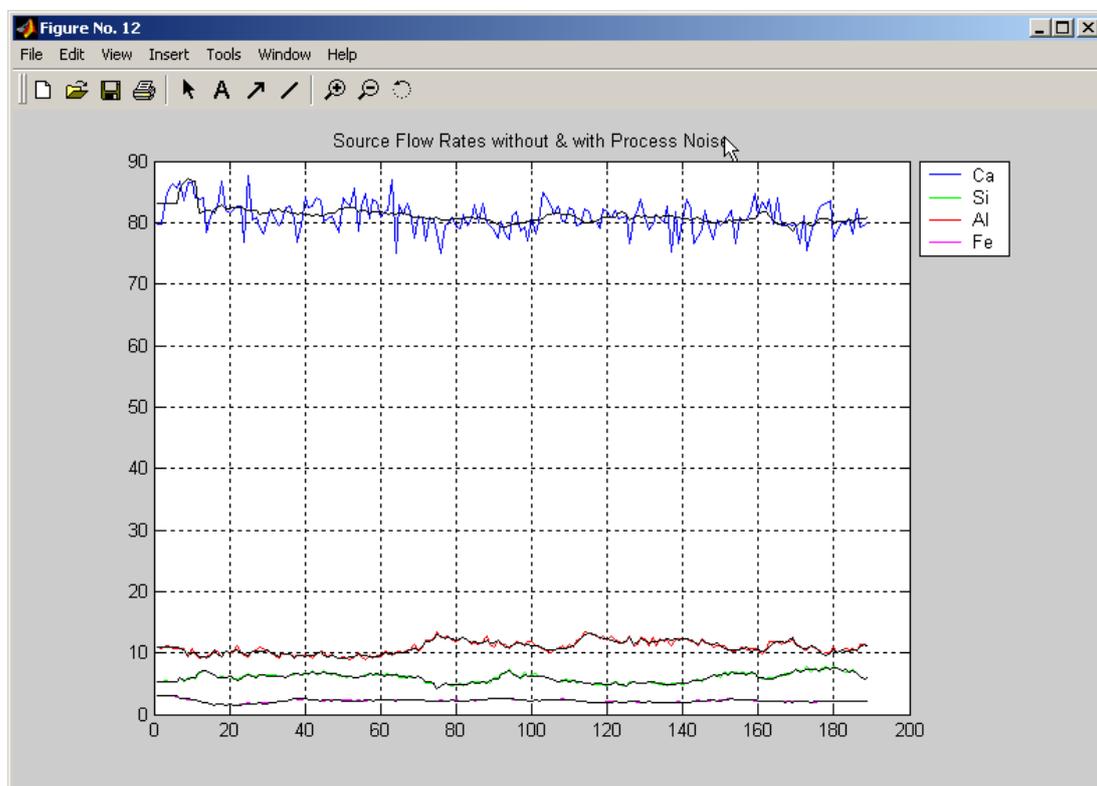


Figura 94. Consignas de caudal de las fuentes y caudales reales aplicados

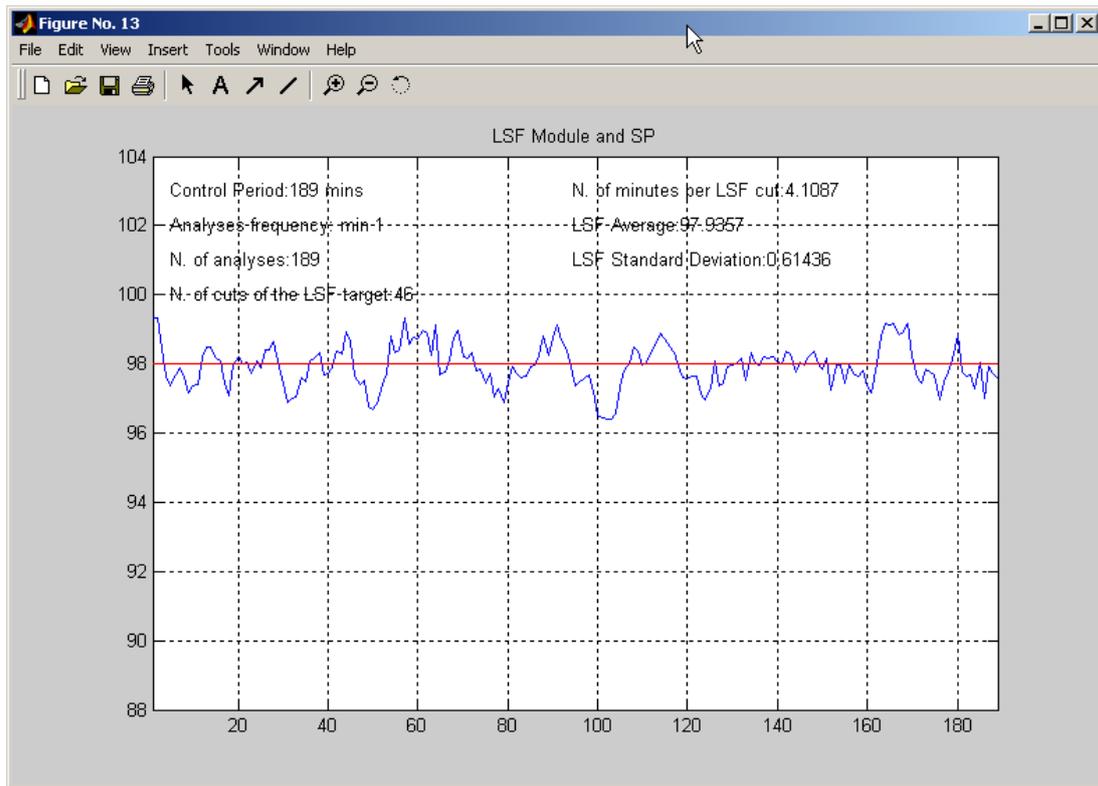


Figura 95. Índices de rendimiento del LSF

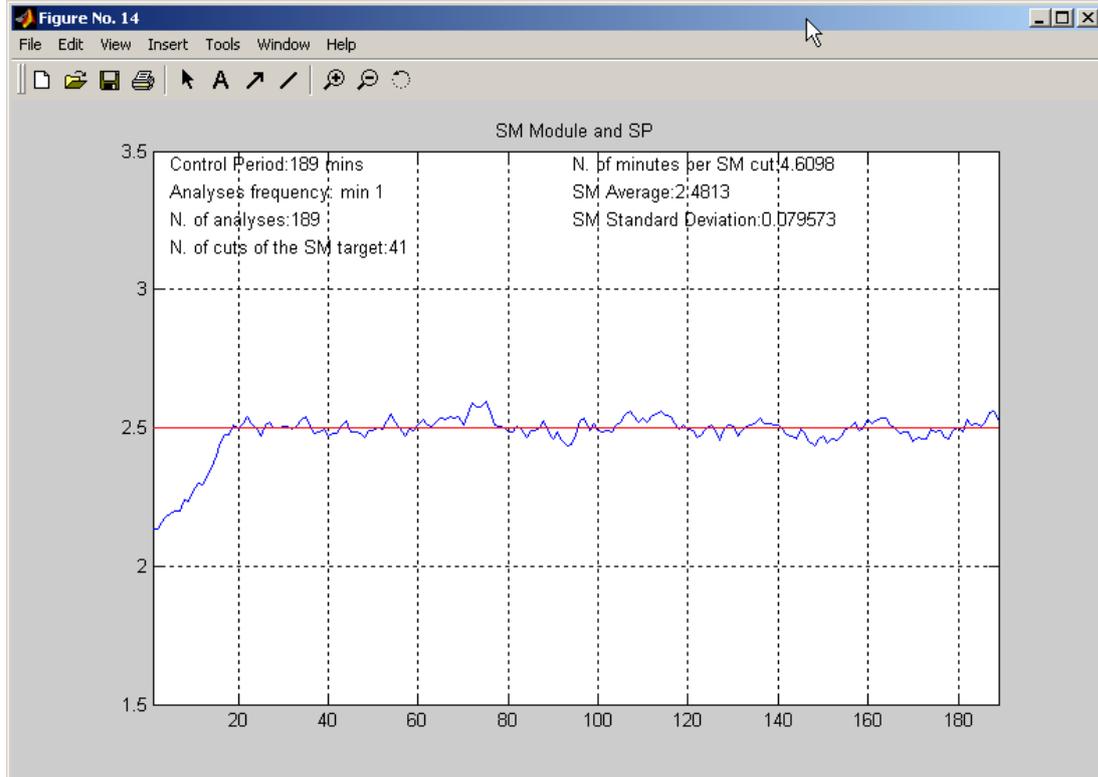


Figura 96. Índices de rendimiento del SM

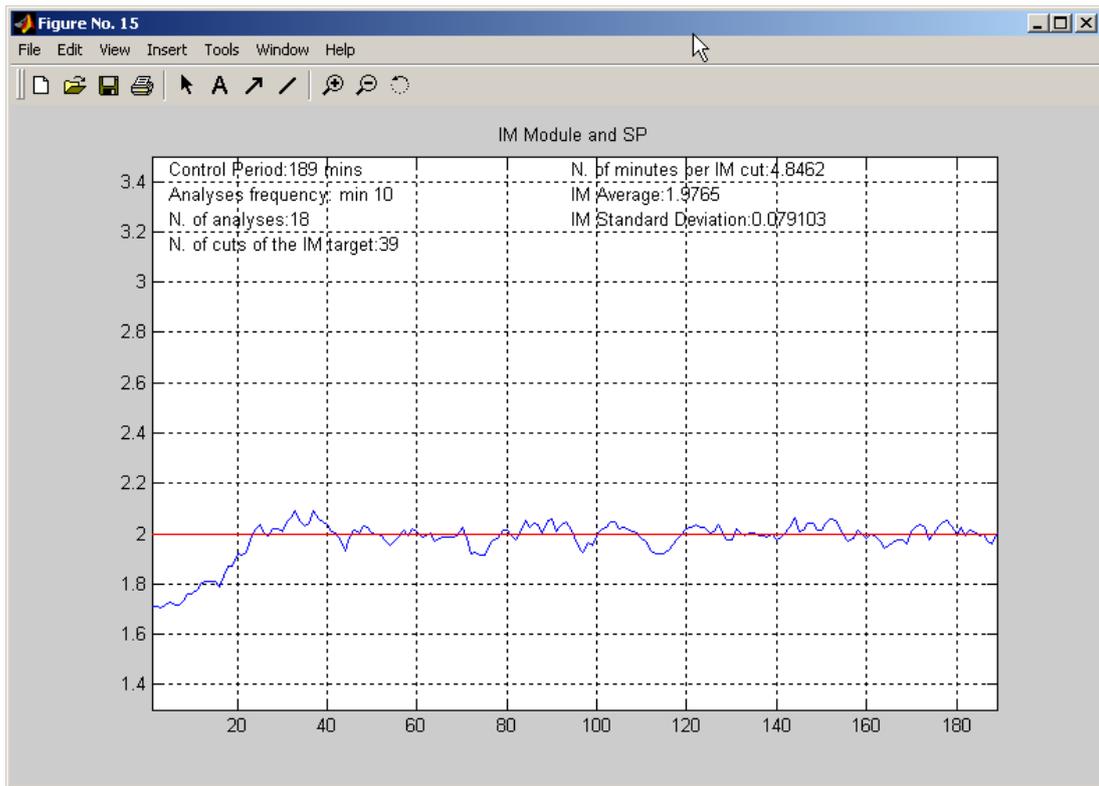


Figura 97. Índices de rendimiento del IM

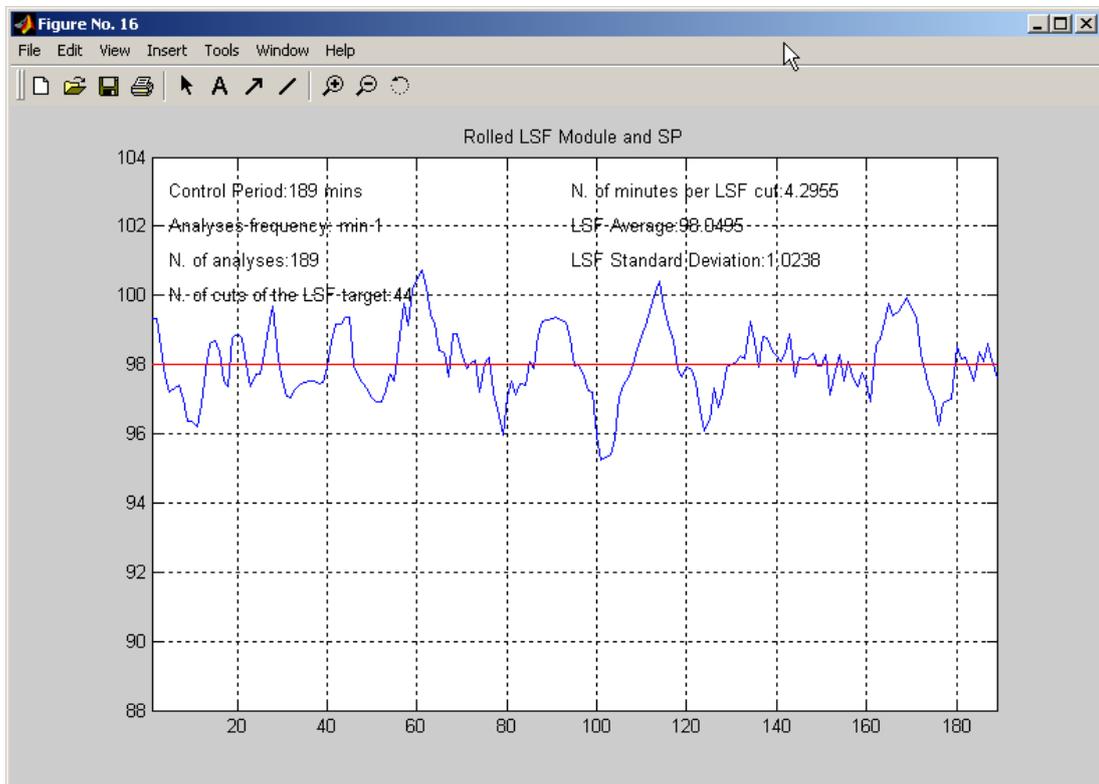


Figura 98. Índices de rendimiento del "rolling value" del LSF

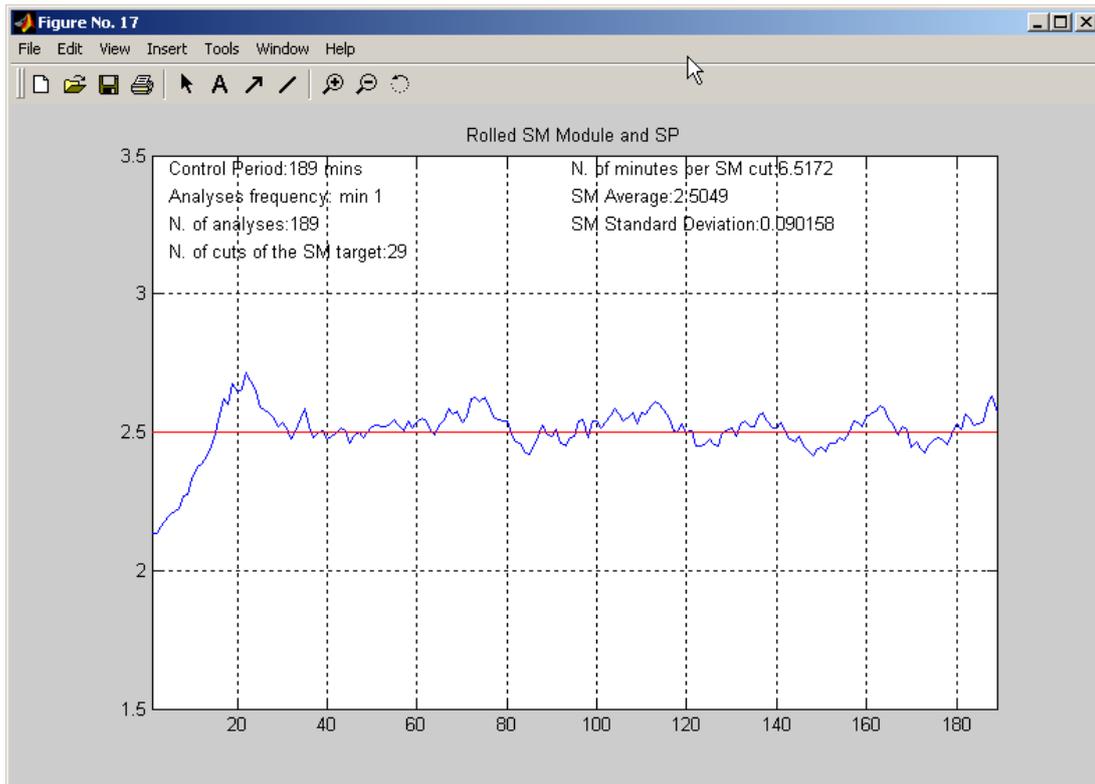


Figura 99. Índices de rendimiento del “rolling value” del SM

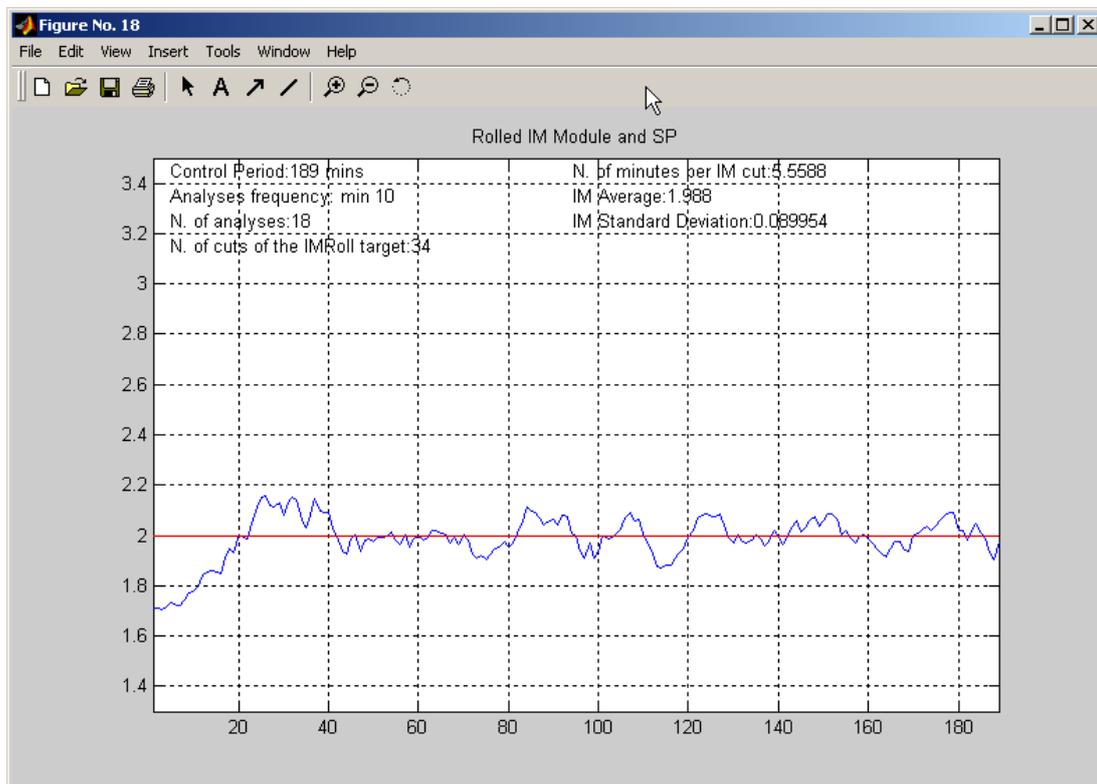


Figura 100. Índices de rendimiento del “rolling value” del IM

Capítulo 6

RESULTADOS EN SIMULACIÓN

6.1 Introducción

Al objeto de comprobar la validez del MAC para llevar a cabo el control del proceso de mezcla de materias primas de una planta de cemento, en este Capítulo 6 se han simulado dichas condiciones típicas del proceso de mezcla de materias primas, haciendo uso del simulador MPS referido en el Capítulo 5.

El análisis básico hace referencia al comportamiento del sistema frente a cambios aleatorios y discontinuos de composición, así como frente a cambios de setpoints en los módulos de calidad, comprobando en estas situaciones la precisión del control alcanzado. En un segundo ejemplo se ha podido verificar la capacidad del sistema para la detección de deficiencias de composición en los alimentadores y el uso de alimentadores correctivos, analizando la influencia de los ruidos de proceso y de medida en el control, así como el rendimiento del sistema frente a un proceso de mezcla con importantes tiempos de retardo.

Asimismo, se ha comprobado el comportamiento del sistema ante condiciones de funcionamiento anormal a que debe dar respuesta, especialmente ante la existencia de una fuente incontrolable (fuente conductora) y frente a la situación de atascos en los alimentadores.

En un cuarto ejemplo se ha utilizado el MAC para controlar los módulos de calidad en una simulación de planta real especialmente difícil, en la cual las composiciones varían ampliamente de forma lineal cada 10 minutos. Esta simulación se ha llevado a cabo a partir de los datos industriales obtenidos en planta de las composiciones de los alimentadores.

6.2 Ejemplo 1: Cambios de consigna y variación de la composición

6.2.1 Definición del proceso simulado

Se ha utilizado MAC para controlar una simulación de un proceso de mezcla típico representada en la Figura 57, que muestra la actuación de ruidos de proceso y de medida sobre el proceso de mezcla simulado, así como también indica la ocurrencia de cambios en la composición de los alimentadores.

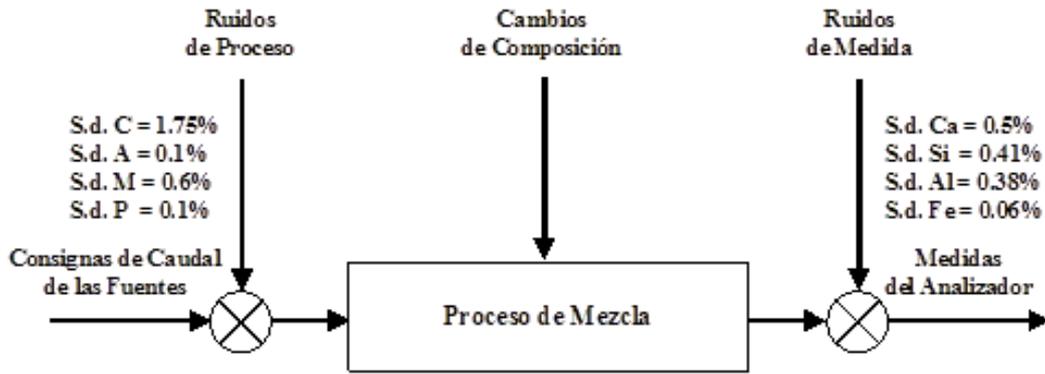


Figura 101. Condiciones generales de la comprobación

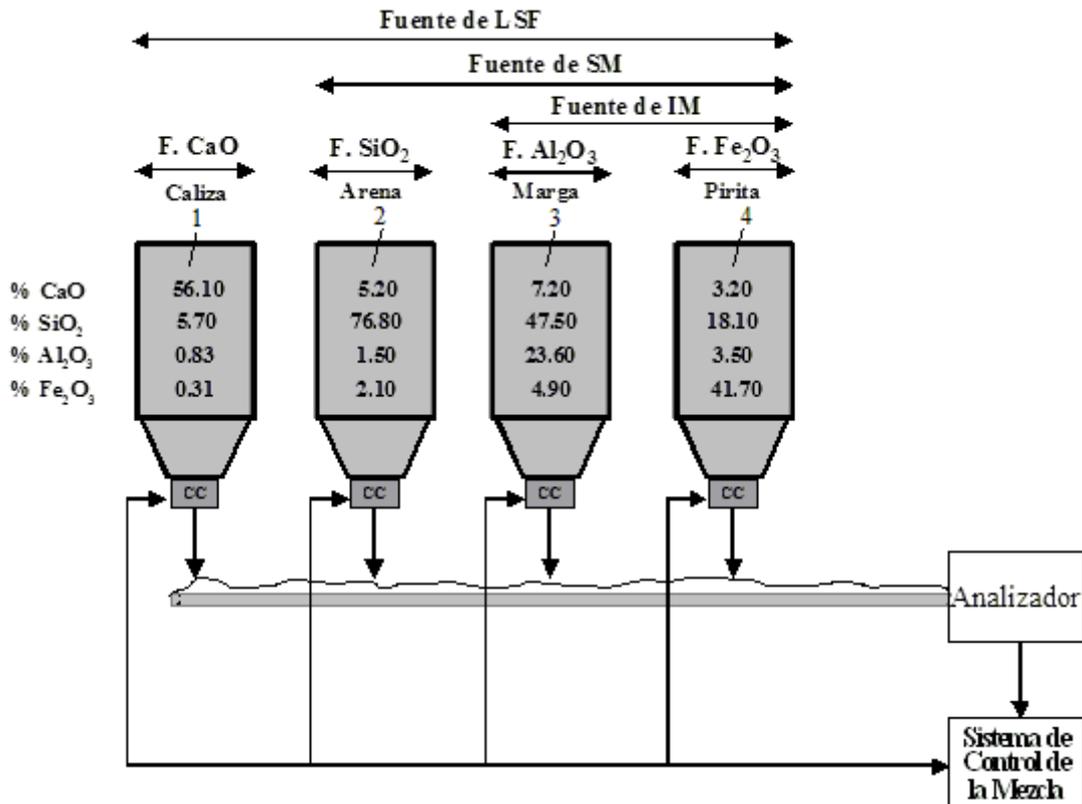


Figura 102. Composiciones iniciales del proceso de mezcla simulado, fuentes de módulos de calidad y fuentes de compuestos

La Figura 102 representa el proceso de mezcla considerado y muestra, dentro de cada uno de los alimentadores, sus composiciones iniciales, indicando en columna los respectivos porcentajes de los óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, cuya posición en cada columna se indica en la columna a la izquierda de los alimentadores. Como puede observarse en la Figura 102, el material del alimentador 1 es una caliza, y como tal, suministrador de CaO. En este proceso de mezcla el alimentador 1 es la fuente de CaO. El material del alimentador 2 es una arena, y como tal, suministrador de SiO₂. En este proceso de mezcla el alimentador 2 es la fuente de SiO₂. El material del alimentador 3 es una marga y es suministrador de Al₂O₃. Por último, el material del alimentador 4 es una pirita, como tal suministrador de Fe₂O₃, y constituye la fuente de Fe₂O₃. Como asimismo se indica en la Figura 102, la fuente de LSF está constituida por todos los alimentadores, la fuente de SM está constituida por los alimentadores 2 a 4 y la fuente de IM por los alimentadores 3 a 4.

Los detalles concretos de la simulación del proceso y de la aplicación del método de esta invención se describen a continuación.

1. – Alimentadores, materias primas y funcionamiento de MAC: Los alimentadores y sus composiciones iniciales son los ilustrados en la Figura 102, y la operación de MAC es la descrita en los Capítulos 3 y 4, habiéndose definido las fuentes de módulos de calidad y las fuentes de compuestos que se marcan en la Figura 102.
2. – Caudal total de la mezcla: Se ha supuesto igual a 100 toneladas/hora.
- 3 – Período de control y período de análisis: Se ha supuesto el período de control igual al período de análisis. Por tanto, a partir de los caudales aplicados a las fuentes, que son entradas en el proceso simulado, se ha calculado un nuevo análisis de la composición de la mezcla al final de cada período de análisis. El MAC ha utilizado este nuevo análisis de la composición de la mezcla para calcular, e inmediatamente aplicar al proceso simulado, las nuevas consignas de caudal para las diferentes fuentes. Se ha supuesto que el período de análisis es de 1 minuto, que es un valor típico para un analizador en línea.

4 – Límites absolutos e incrementales: Los valores de los límites absolutos inferior y superior aplicados a las señales de control avanzado de los lazos de control avanzados han sido de 0 y 100, respectivamente, ya que estas señales son porcentuales. Los límites incrementales se han fijado igual a 5.

5 – Ruidos de proceso: Se han añadido ruidos gaussianos a las consignas de caudal generadas por el MAC, antes de ser aplicadas al proceso de mezcla simulado. Las desviaciones estándar de estos ruidos para las fuentes de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ han sido, en porcentaje del caudal, de 1.75, 0.1, 0.6 y 0.1, respectivamente. Este elevado valor del nivel de ruido de proceso representa en la simulación del proceso los errores de control de los controladores de caudal locales de las diferentes fuentes.

5 – Ruidos de medida: Se han añadido ruidos gaussianos a la composición real de la mezcla calculada en el proceso de simulación. Las desviaciones estándar de estos ruidos que se añaden al porcentaje real en la mezcla de los óxidos de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ han sido 0.5, 0.41, 0.37 y 0.09, respectivamente. Este valor del nivel de ruido de medida corresponde a una cinta transportadora de anchura 600 mm y representa en la simulación del proceso los elevados errores de medida del analizador en línea, tal y como se mencionó en la sección 1.4.4.

La figura 103 muestra el aspecto del MPS una vez configurada la experiencia, que denominaremos 6.1, con los datos que acabamos de mencionar. Asimismo muestra los cambios discontinuos de composición y de setpoint que llevan a cabo.

6.2.2 Cambios de consigna y variación de las composiciones

Variación aleatoria de las composiciones de los alimentadores: a partir de las composiciones iniciales de los alimentadores, mostradas en la Figura 102, los contenidos de cada uno de los óxidos se han hecho evolucionar según un “paseo aleatorio” generado mediante la integración de ruidos gaussianos, tal y como se ha explicado con respecto al simulador del Capítulo 5. Las desviaciones estándar de estos ruidos son iguales al uno por ciento de los correspondientes valores iniciales.

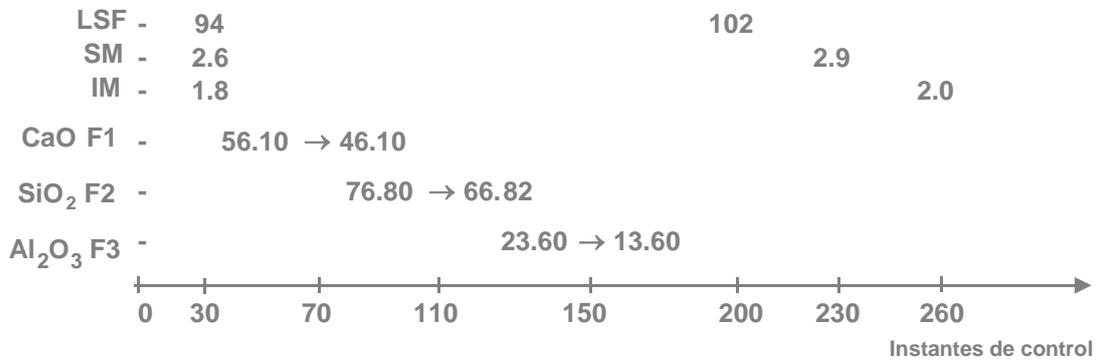
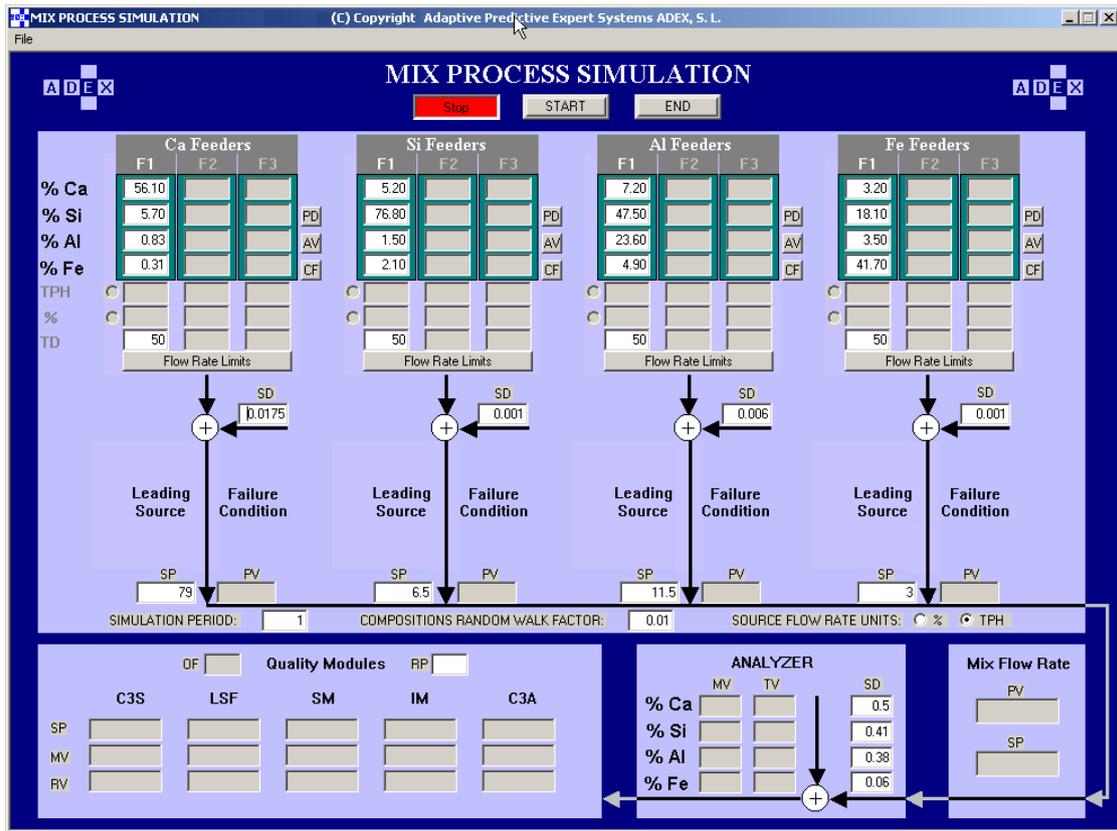


Figura 103. Datos del Ejemplo 1: cambios discontinuos de composición y de setpoint

Cambios discontinuos de composición: además de la variación aleatoria de las composiciones ya citada en el punto previo, se han simulado significativos cambios discontinuos de composición en los alimentadores. Así, el contenido en CaO del alimentador de caliza, (fuente de CaO), alimentador 1, se ha cambiado discontinuamente de 58.97 a 46.10 en el instante 70, el contenido de SiO₂ en el

alimentador 2, (fuente de SiO_2), se ha variado de 76.71 a 66.82 en el instante 110 y el contenido de Al_2O_3 en el alimentador 3, (fuente de Al_2O_3), se ha cambiado de 24.83 a 13.61 en el instante 150.

Cambios de setpoints en los módulos de calidad: Se han aplicado cambios de consigna para los diferentes módulos de calidad. Así, la consigna del módulo de calidad de LSF es inicialmente 94 y se cambia a 102 en el instante 200. De la misma forma, la consigna de SM se ha cambiado de 2.6 a 2.9 en el instante 230, y la consigna de IM pasa de 1.8 a 2.0 en el instante 260.

6.2.3 Descripción y análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en el experimento de control simulado que se acaba de describir se muestran en la Figura 104, en donde se puede observar la evolución de los módulos de calidad de LSF, SM e IM, en sus valores *rolling value* con un rollíng period de 10, es decir, la media móvil aritmética de los últimos 10 valores, así como la evolución de sus consignas. Se elige desplegar los *rolling value* con propósitos de comparación en el apartado 6.2.4. Los valores del módulo de LSF han sido divididos por 10 con el objeto de que los tres módulos puedan ser representados en la misma figura y con la misma escala. La Figura 105 muestra la evolución de las consignas de caudal generadas por el MAC para cada una de las fuentes. Por último, la Figura 106 muestra las variaciones aleatorias y discontinuas de los porcentajes de los compuestos en sus respectivas fuentes durante el ejemplo experimental. Es en esta Figura 106 donde se pueden observar claramente los cambios discontinuos de composición descritos anteriormente.

A pesar de los valores elevados de ruidos de proceso y de medida mostrados en la Figura 101, de los cambios aleatorios y discontinuos en las composiciones de las fuentes, mostrados en la Figura 106, y de la naturaleza fuertemente interactiva del proceso de mezcla, se ha alcanzado un control preciso y robusto de los módulos de calidad de LSF, SM e IM en la mezcla, como se puede observar en la Figura 104.

Un análisis más detallado de las Figuras 104 a 106 muestra que:

1 – En el instante 70, el descenso discontinuo en el porcentaje de CaO en la fuente de CaO (de 56.10 a 46.10), mostrado en la Figura 106, es compensado mediante un incremento del caudal de la fuente de CaO y una bajada simultánea en los caudales de las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, como se observa en la Figura 105. De esta forma, un cambio de composición discontinuo tan significativo como el considerado únicamente causa una desviación mínima en la evolución del módulo de LSF respecto a su consigna. Se puede observar en la Figura 104 que el módulo de LSF retorna a su valor estable de consigna en menos de 10 períodos de control, siendo su desviación máxima menor que 4 unidades.

2 – En el instante 150, la bajada discontinua en el porcentaje de Al₂O₃ en la fuente de Al₂O₃ (de 23.60 a 13.60), mostrado en la Figura 106, provoca un aumento instantáneo en el módulo de SM y una bajada instantánea en el módulo de IM. Como se ve en la Figura 104, ambos vuelven a sus valores estables de consigna en menos de 25 períodos de control para el SM, y 15 para el IM. La mayor desviación en el valor de SM está por debajo de 0.4 y para el valor de IM es menor que 0.2. Esta compensación eficaz frente a un cambio de composición tan significativo se ha conseguido aumentando el caudal de la fuente de Al₂O₃ y disminuyendo a la vez los caudales de las fuentes de SiO₂, y Fe₂O₃, como muestra la Figura 105.

3 – El cambio discontinuo en el porcentaje de SiO₂ en la fuente de SiO₂ (de 76.71 a 66.82), mostrado en la Figura 106 en el instante de control 110, es compensado con facilidad por el MAC, de forma que su efecto apenas se nota en la evolución de los módulos de LSF, SM e IM.

Además, y como se muestra en la Figura 104, cuando ocurre un cambio de consigna en uno de los módulos de calidad, los otros dos no muestran desviaciones significativas respecto a sus consignas, a pesar de la naturaleza fuertemente interactiva del proceso. Las consignas de caudal de las fuentes se modifican apropiadamente por MAC para compensar esta interacción, a la vez que se conduce al módulo de calidad correspondiente hacia su consigna.

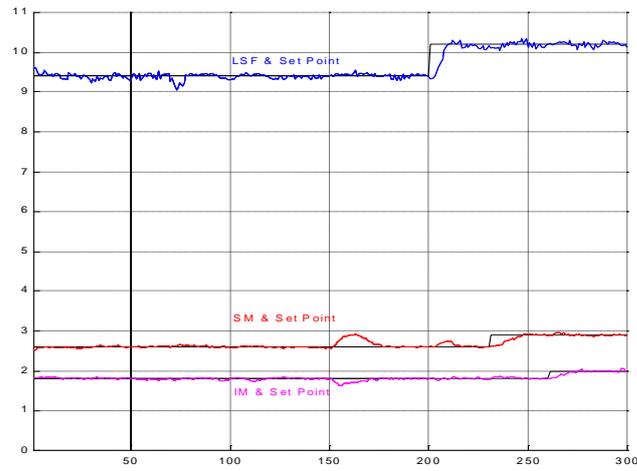


Figura 104. Evolución de los módulos de calidad

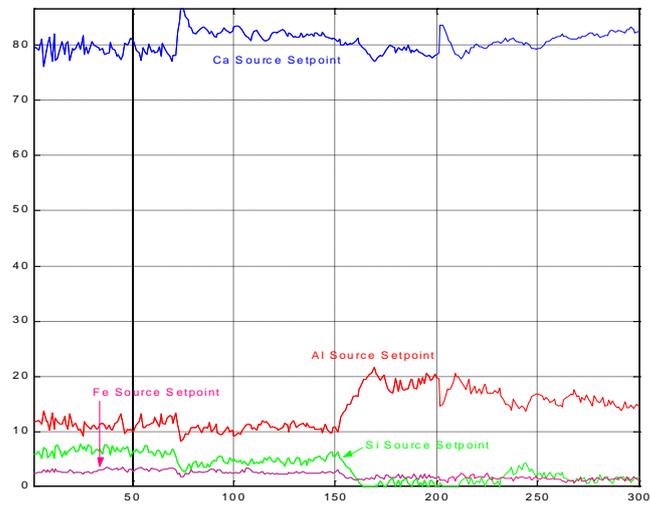


Figura 105. Consignas de caudal calculadas por MAC

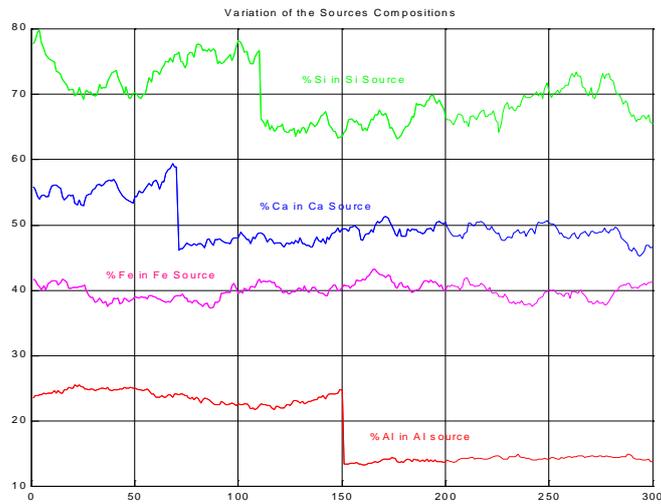


Figura 106. Evolución de las composiciones de las fuentes

6.2.4 Descripción y análisis de los resultados

Cuantitativamente, las desviaciones estándar del LSF, SM e IM, calculadas en el intervalo de los 200 primeros instantes de control en los cuales las consignas permanecen constantes, resultan ser 0.69, 0.074 y 0.035, respectivamente. Por otro lado, las medias para el LSF, SM e IM en el mismo intervalo son de 94.09, 2.62 y 1.79, valores que difieren de las correspondientes consignas en menos de 0.01, 0.03 y 0.01, respectivamente. Asimismo se calcula el número de cortes a la consigna, produciéndose un corte cuando la línea que une dos análisis consecutivos corta el setpoint fijado para el módulo de calidad. La Tabla 8 recoge estos índices estadísticos de rendimiento.

Índice	LSF	SM	IM
Período de evaluación	200 min	200 min	200 min
Período de Análisis	1 min	1 min	1 min
Nº de Cortes a la Consigna	72	55	54
Nº de Cortes/ Hora	21.6	16.5	16.2
Media	94.09	2.61	1.79
Desviación Media-Consigna	0.09	0.01	0.01
Desviación Estándar	0.69	0.074	0.035

Tabla 8. Análisis estadístico de la precisión

Estos resultados se pueden considerar especialmente buenos, pues, en condiciones razonables de ruido de medida y de proceso y sin retardos, toda desviación estándar en el *rolling value* del LSF por debajo de 1 ya se puede considerar todo un éxito (Tokkesdal & Kemmerer, 2001), (QCX/BlendExpert, 2015).

6.3 Ejemplo 2: Deficiencias de composición y uso de alimentadores correctivos

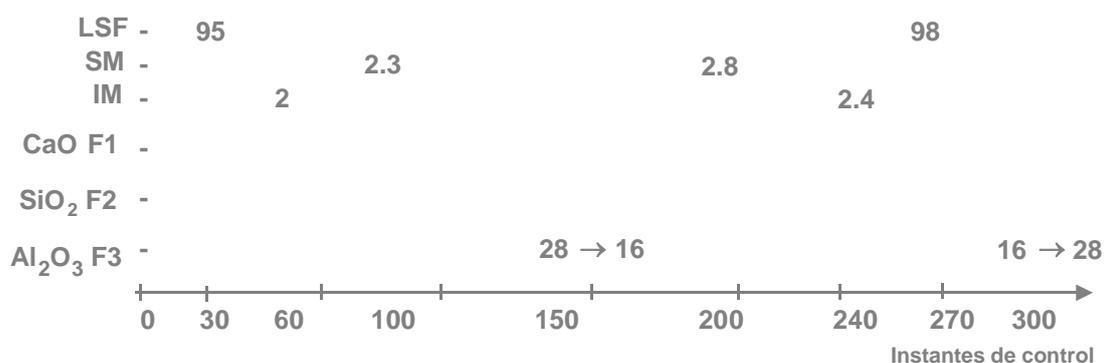
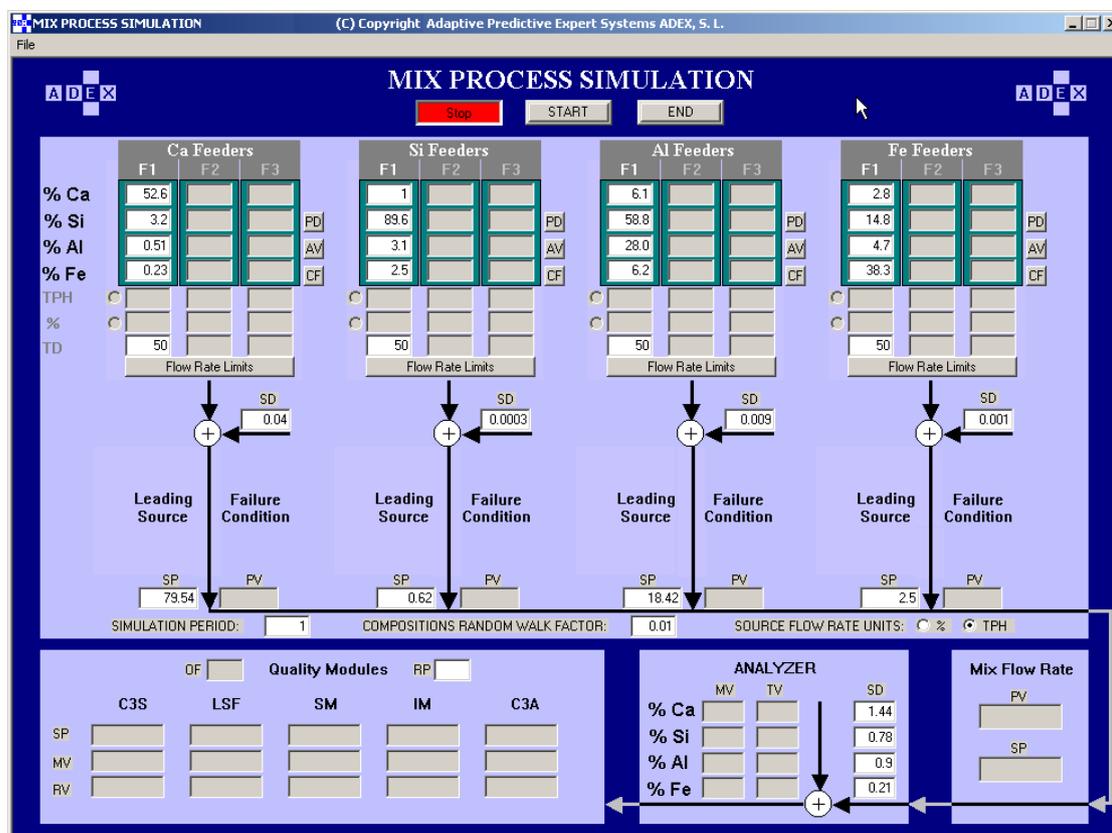


Figura 107. Datos del Ejemplo 2: deficiencias de composición

6.3.1 Definición del proceso simulado

Este experimento queda definido por las composiciones iniciales, caudales iniciales, retardos y ruidos de proceso y de medida que se especifican en la figura 107, la cual

muestra el aspecto del MPS, antes de la ejecución de la experiencia, así como los cambios de setpoint que se aplican a los módulos de calidad.

Esta experiencia el rendimiento de MAC cuando está sometido a una deficiencia de Al_2O_3 en la composición de la fuente de Al_2O_3 , lo que hace que no puedan alcanzar algunos setpoints que se fijan para los módulos de calidad.

6.3.2 Deficiencias de composición

La gráfica superior de la figura 108 muestra la evolución de los módulos de calidad sus setpoints, y la gráfica de la parte inferior muestra la evolución de los caudales calculados por MAC. La gráfica superior de la figura 109 muestra la evolución de la composición química de los compuestos más significativos de cada una de las fuentes, y la gráfica inferior ilustra la evolución de las medidas de la composición de la mezcla. Los siguientes comentarios están basados en el análisis de las figuras 108 y 109 en los instantes de control en los que cambias las condiciones en el experimento.

- En los instantes 30, 70 y 110, MAC muestra un rendimiento similar al ya observado en el ejemplo 1 en cuanto a la obtención de los setpoints de los módulos de calidad.
- En el instante 150, el contenido de Al_2O_3 en la fuente 3 desciende de 28 a 16. Se puede observar que, para intentar mantener los módulos de calidad en consigna y compensar este descenso de aluminio, MAC incrementa la fuente 3 de Al_2O_3 y baja la fuente 2 de SiO_2 , hasta el punto que se ve que la fuente de SiO_2 , línea verde, se hace 0 en ese período, es decir MAC está haciendo la señal de control para el SM, que es porcentaje de fuente de SiO_2 / fuente de SM = 0%. Y a pesar de ello, el SM no desciende hacia su consigna de 2.3. Como la fuente de SM = fuente SiO_2 + fuente Al_2O_3 + fuente Fe_2O_3 , esto significa que el contenido de Al_2O_3 en la fuente 3 no es lo suficientemente elevado como para alcanzar el

objetivo de control del SM. Por tanto, MAC despliega el diagnóstico DALSM ("*Al₂O₃ Lack in Al₂O₃ Source for SM*"), es decir, "Falta de Al₂O₃ en la fuente de Al₂O₃ para el SM", como se indicaba en la Tabla 6 de la sección 3.6.6, avisando de que el setpoint de SM no se puede alcanzar en estas circunstancias. El SM comienza a separarse de su setpoint, mientras que los otros dos módulos, LSF e IM, permanecen bajo control de forma satisfactoria.

- En el instante 200, un aumento del setpoint de SM desde 2.3 a 2.8 hace que el objetivo de control para el SM vuelva a ser alcanzable; en consecuencia, MAC deja de desplegar el diagnóstico DALSM, y aumenta la fuente 2 de SiO₂ y baja la fuente 3 de Al₂O₃.
- En el instante 240, un incremento en el setpoint de IM desde 2 a 2.4 da lugar a la activación del diagnóstico DALIM, es decir, ("*Al₂O₃ Lack in Al₂O₃ Source for IM*"), es decir, "Falta de Al₂O₃ en la fuente de Al₂O₃ para el IM". En efecto, de 270 a 310, la fuente 4 de Fe₂O₃ se hace cero. Como la fuente de IM = fuente Al₂O₃ + fuente Fe₂O₃, MAC está haciendo la señal de control para el IM, que es porcentaje de fuente de Al / fuente de IM = 1 (ó 100%). Y a pesar de ello, el IM no asciende hacia su consigna de 2.4. Esto quiere decir que el contenido de Al₂O₃ en la fuente 3 no es lo suficientemente elevado como para alcanzar el objetivo de control del IM en estas circunstancias. El IM permanece bajo su setpoint, a pesar de que el caudal de la fuente de Fe₂O₃ se hace cero.
- En el instante 300, el contenido de aluminio en la fuente 3 se recupera, (cambia de 16 a 28). Se puede observar cómo desciende la fuente 3 de Al₂O₃, aumentan la fuente 2 y 4, y el módulo IM alcanza su consigna, dejando MAC de desplegar la diagnosis DALIM.

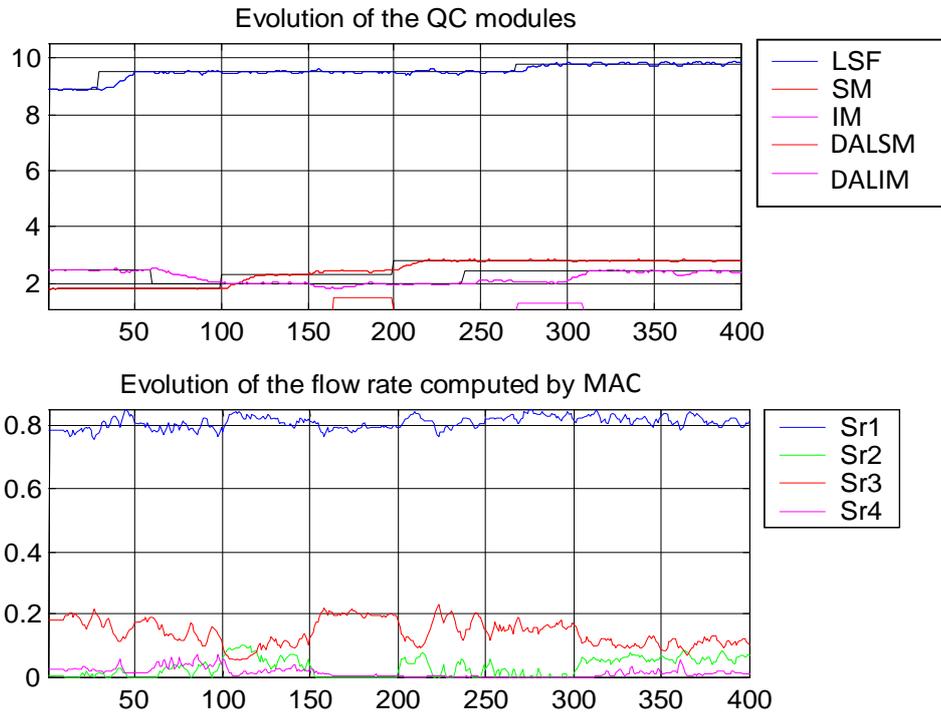


Figura 108. Módulos de calidad y consignas de caudal

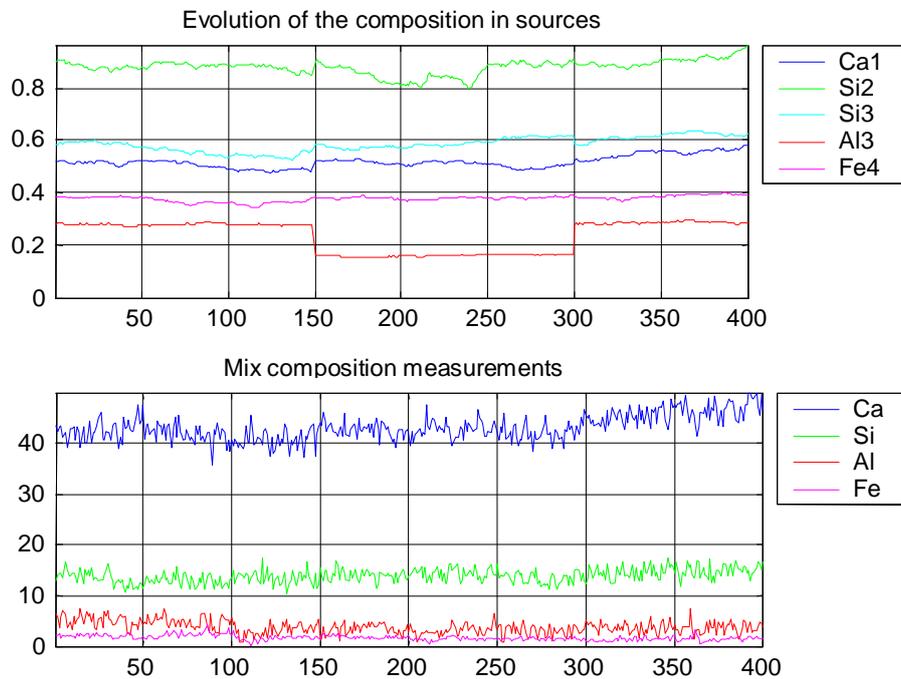


Figura 109. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla

6.3.3 Uso de alimentadores correctivos

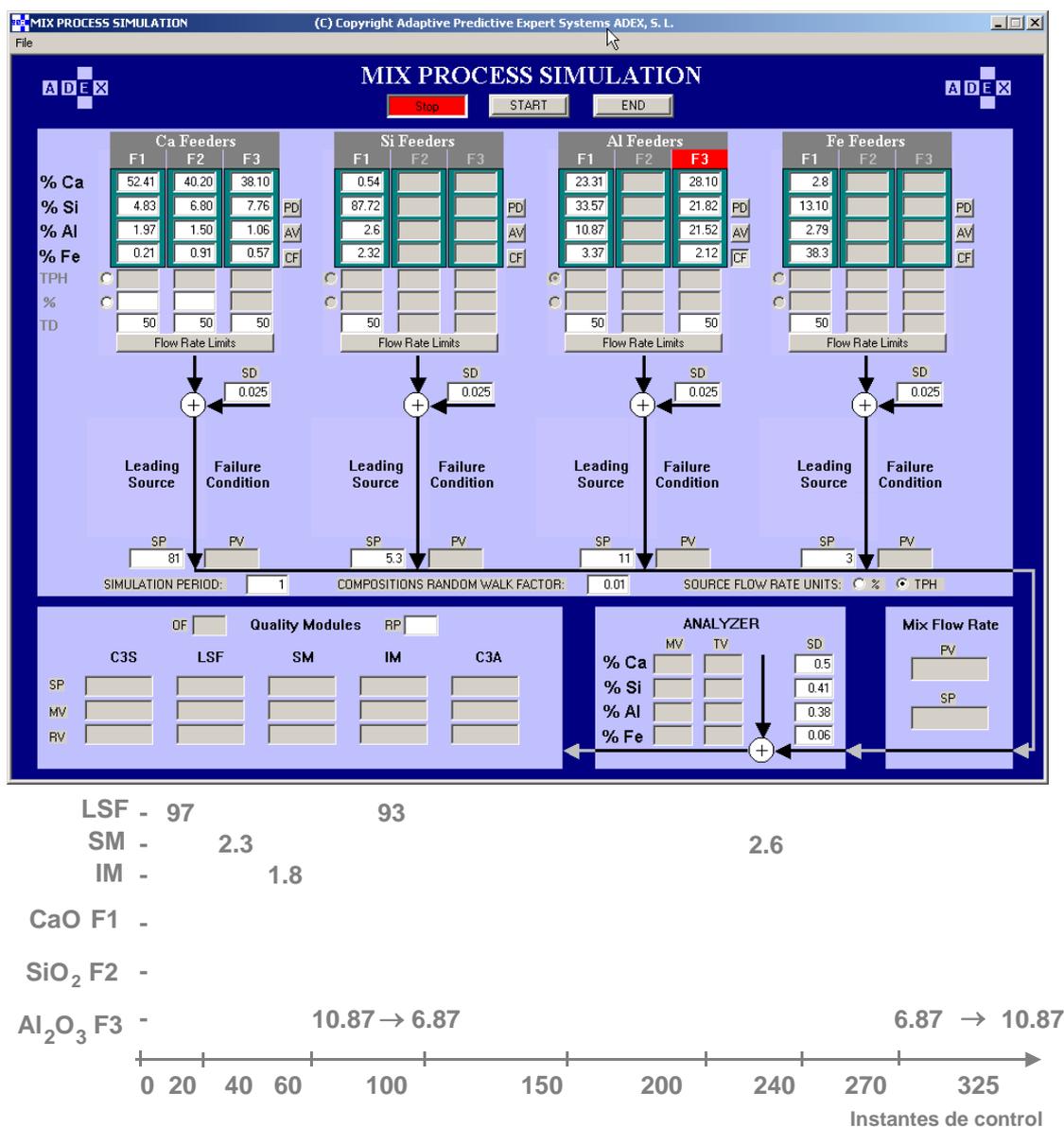


Figura 110. Datos del Ejemplo 2: uso de alimentadores correctivos

En esta sección, se llevarán a cabo dos experimentos, siendo la única diferencia entre ellos, el nivel de ruido de medida y el ruido de proceso considerados, al objeto de ilustrar su efecto. Este experimento queda definido por las composiciones iniciales, caudales iniciales, retardos y ruidos de proceso y de medida que se especifican en la figura 110, la cual muestra el aspecto del MPS, antes de la ejecución de la

experiencia, así como los cambios de setpoint que se aplican a los módulos de calidad y un cambio discontinuo de composición.

Esta experiencia ilustra el rendimiento de MAC cuando se produce una deficiencia de composición en uno de los alimentadores de uso preferente y, existiendo un alimentador correctivo en dicha fuente, éste se utiliza por MAC para llevar los módulos de calidad a sus setpoints. Los siguientes comentarios están basados en el análisis de las figuras 111 y 112 en los instantes de control en los que cambias las condiciones en la experiencia.

- En los instantes 20, 40 y 60, MAC muestra un rendimiento satisfactorio similar para seguir los cambios de setpoint, como ya se ha observado en los experimentos previos.
- En el instante 100, el contenido de Al_2O_3 en la fuente 3 cae de 10.87 a 6.87. Se puede observar que, para intentar mantener los objetivos de control de los módulos de calidad, MAC actúa sobre el caudal de las fuentes, aumentando la fuente 3 de Al_2O_3 y bajando la fuente 1 de CaO y la 2 de SiO_2 . Sin embargo, como ocurría en el experimento de la sección 6.3.2, el SM permanece separado de su setpoint, quedando por encima, de manera que, habiendo bajado MAC la fuente de silicio a cero, nuevamente MAC está haciendo la señal de control para el SM, que es el porcentaje de la fuente de Si / fuente de SM = 0%. Y a pesar de ello, el SM no desciende hacia su consigna de 2.3. Por tanto, MAC despliega la diagnosis DALSM ("*Al₂O₃ Lack in Al₂O₃ Source for SM*"), avisando de que el setpoint de SM no se puede alcanzar en estas circunstancias. Sin embargo, debido a la existencia de un alimentador correctivo de aluminio, según se despliega la deficiencia DALSM, MAC empieza a utilizar este alimentador correctivo 5. La utilización de este alimentador correctivo de elevado contenido en Al_2O_3 hace posible que el módulo de SM vuelva a su setpoint antes del instante 200, de manera que MAC deja de desplegar la diagnosis. Una vez que los objetivos de control se han alcanzado de nuevo, MAC hace descender de forma progresiva el uso del alimentador correctivo, manteniéndose en control los módulos de calidad.

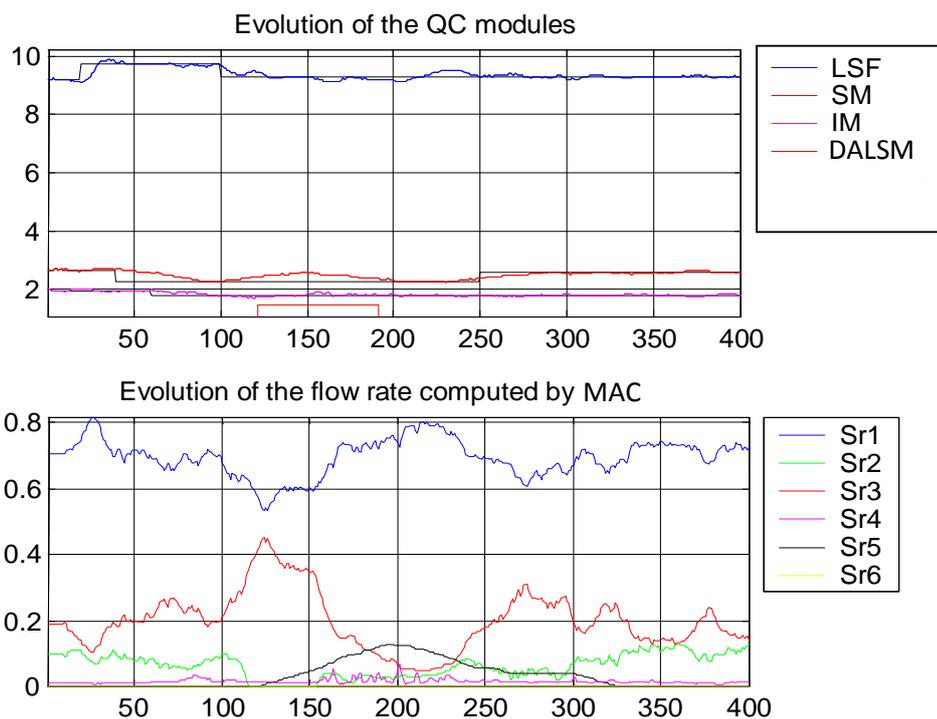


Figura 111. Módulos de calidad y consignas de caudal

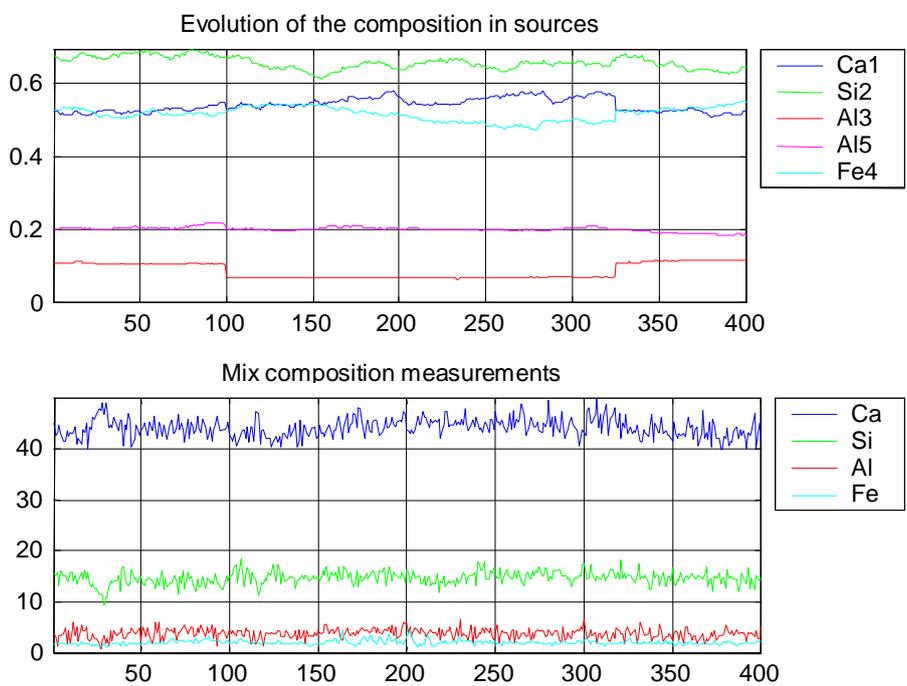


Figura 112. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla

- En el instante 250, el setpoint de SM aumenta desde 2.3 a 2.6. Por tanto, hace falta menos Al_2O_3 para mantener los objetivos de control. Bajo estas circunstancias, el alimentador correctivo continúa siendo sustituido por el alimentador de uso preferente 3 y, a la vez que el caudal de este último sube, el caudal del correctivo decrece hasta cero.
- En el instante 325, se recupera el contenido en Al_2O_3 del alimentador 3 (vuelve de 6.87 a 10.87). Se puede observar que MAC hace bajar el alimentador 3 e incrementa el 1 y el 2, pasando desapercibido este cambio para la evolución de los módulos de calidad.

Óxido	Experimento 6.3 Desviación Estándar (Cinta de 600 mm de ancho)	Experimento 6.4 Desviación Estándar (Cinta de 1200 mm de ancho)
CaO	0,50 %	0,39 %
SiO ₂	0,41 %	0,22 %
Al ₂ O ₃	0,37 %	0,21 %
Fe ₂ O ₃	0,09 %	0,06 %

Tabla 9. Ruidos de medida en los experimentos de las secciones 6.3.3 y 6.3.4

Óxido	Experimento 6.3 Desviación Estándar (Ruido de Proceso)	Experimento 6.4 Desviación Estándar (Ruido de Proceso)
F. de Ca	1,75 %	1,25 %
F. de Si	0,1 %	0,05 %
F. de Al	0,6 %	0,3 %
F. de Fe	0,01 %	0,05 %

Tabla 10. Ruidos de proceso en los experimentos de las secciones 6.3.3 y 6.3.4

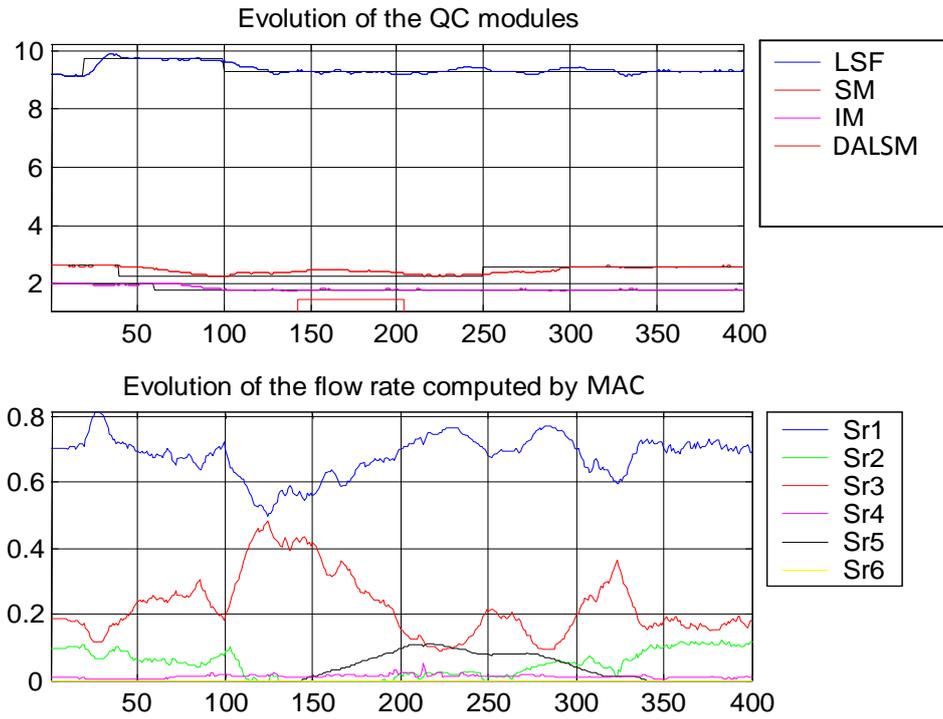


Figura 113. Módulos de calidad y consignas de caudal

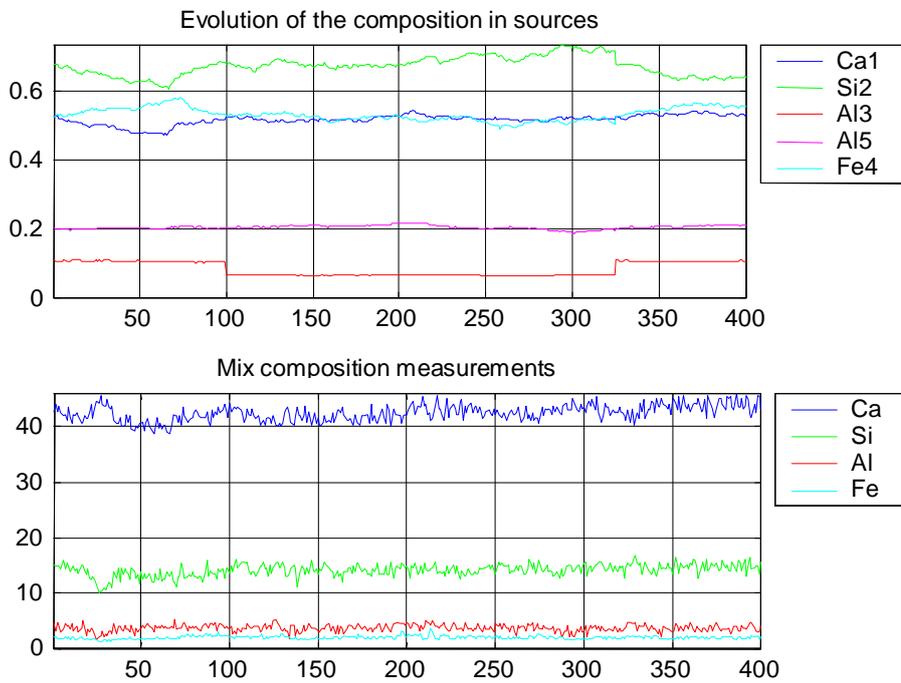


Figura 114. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla

6.3.4 Influencia de los ruidos de medida y de proceso

La principal diferencia que se puede observar entre los resultados obtenidos en el experimento de la sección anterior 6.3.3 (Figuras 111 y 112) y en el experimento de la presente sección 6.3.4 (Figuras 113 y 114) tiene que ver con la precisión del control, la cual se ve afectada directamente, cómo es lógico, por el nivel del ruido de medida de la composición de la mezcla. También tiene que ver con los diferentes niveles de ruido de proceso considerado, que simulan la falta de precisión en los controladores de caudal. Las Tablas 9 y 10 muestran ambos niveles. Como es evidente de la comparativa de ambas figuras, la precisión de control obtenida en el experimento de la sección 6.3.4 actual es mejor que la obtenida en el de la 6.3.3, debido al menor ruido de medida y de proceso. Por tanto, el principal efecto del ruido de medida de la composición es la precisión de control obtenida. Sin embargo, el máximo nivel de ruido de medida y de proceso aquí considerado no es capaz de deteriorar significativamente el rendimiento satisfactorio de MAC.

6.3.5 Influencia de los retardos

Es evidente que la corrección de los efectos originados por las perturbaciones no medibles, tales como las variaciones aleatorias y discontinuas de la composición de los alimentadores y los ruidos de proceso que se añaden a las señales de control de los caudales, se va a retardar progresivamente a medida que aumentan los tiempos de retardo entre las acciones de control sobre los caudales de las fuentes y la medición de los módulos de calidad.

En particular, teniendo en cuenta el tratamiento de los retardos explicado en el Capítulo 3, y que aplica MAC, se puede esperar que a medida que aumenta el máximo tiempo de retardo MR de las fuentes, el rendimiento de control se deteriore inevitablemente de forma progresiva, por la razón antes comentada.

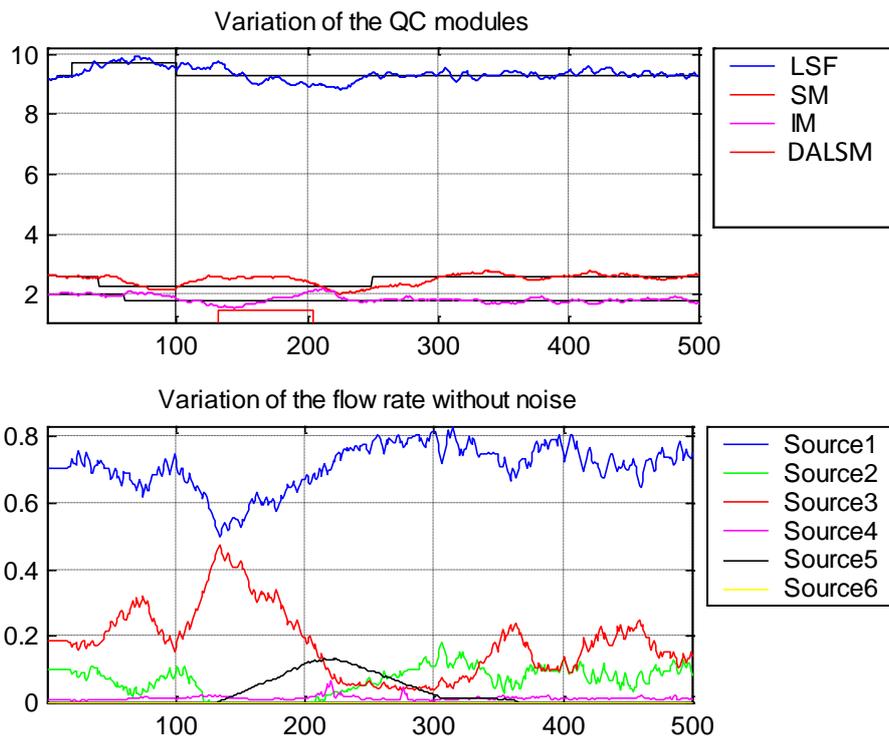


Figura 115. Módulos de calidad y consignas de caudal

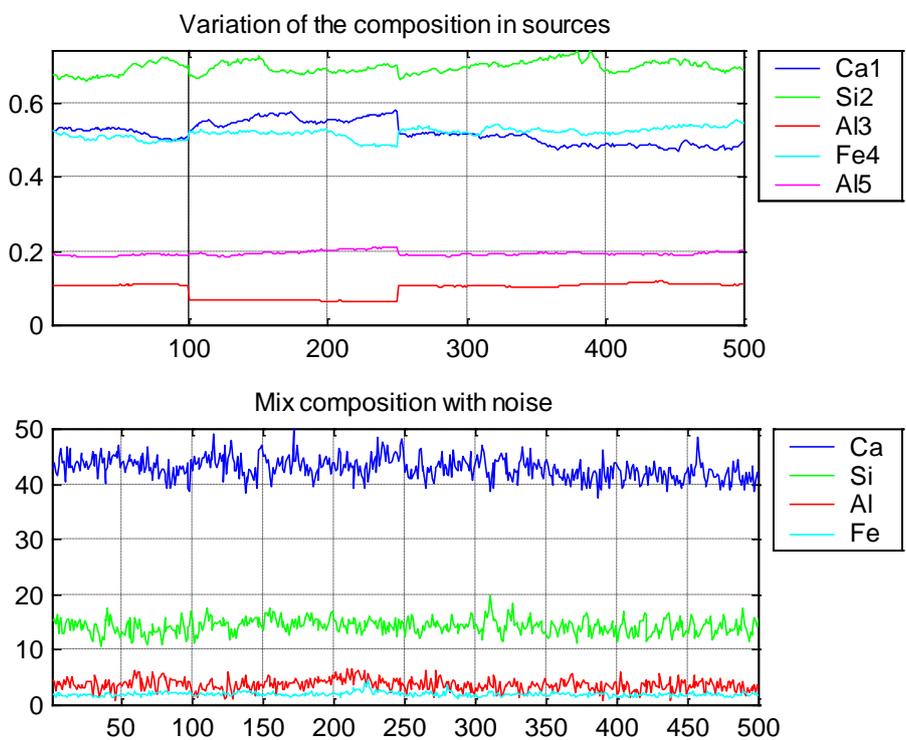


Figura 116. Evolución de la composición de las fuentes y de la mezcla

Por tanto, los resultados del experimento de la sección 6.3.5 muestran como MAC es capaz de conseguir un rendimiento satisfactorio en presencia de retardos significativos, ya que en dicho experimento 6.3.5, el máximo tiempo de retardo es igual a 4. Los comentarios aplicables a este experimento, Figuras 115, 116, son básicamente los mismos que los realizados para los experimentos de las secciones 6.3.3 y 6.3.4. Sin embargo, se puede observar que la precisión en el control en el experimento 6.3.5, aunque satisfactoria, es lógicamente menor que la de los experimentos 6.3.3 y 6.3.4, en los que la acción de control no tenía ningún retardo. Además, se en el experimento de la sección 6.3.5 los ruidos de medida y de proceso considerados son los de mayor valor, por lo que los resultados obtenidos bajo estas condiciones se deben considerar como muy satisfactorios.

6.4 Ejemplo 3: Fuente conductora y atascos

6.4.1 Fuente conductora

En la figura 119 se muestra el resultado del control de la mezcla de la presente sección, el cual corresponde a los primeros 200 instantes de control del experimento del Ejemplo 1, sección 6.3.2, sólo que simulando que la fuente de CaO es incontrolable, es decir, o se encuentra muy alejada, y por tanto sus retardos hacen tarea imposible su control (por ejemplo, retardos de 15 períodos de control o más), o bien hay un fallo en el equipo y su caudal oscila libremente, de forma aleatoria, en paseos aleatorios similares a los ya comentados. O bien, por necesidades de planta, el caudal que viene de esa fuente se desea no controlar, teniéndose que ajustar el caudal total de la mezcla al caudal que en cada instante proporcione esta fuente.

En estas circunstancias, lo más apropiado es definir en MAC esta fuente como Leading Source, de manera que el caudal total de la mezcla no se fija ni es constante, sino que el resto de fuentes ajustan su caudal al de esta fuente conductora para que el total en cada instante tenga sus objetivos de control en consigna.

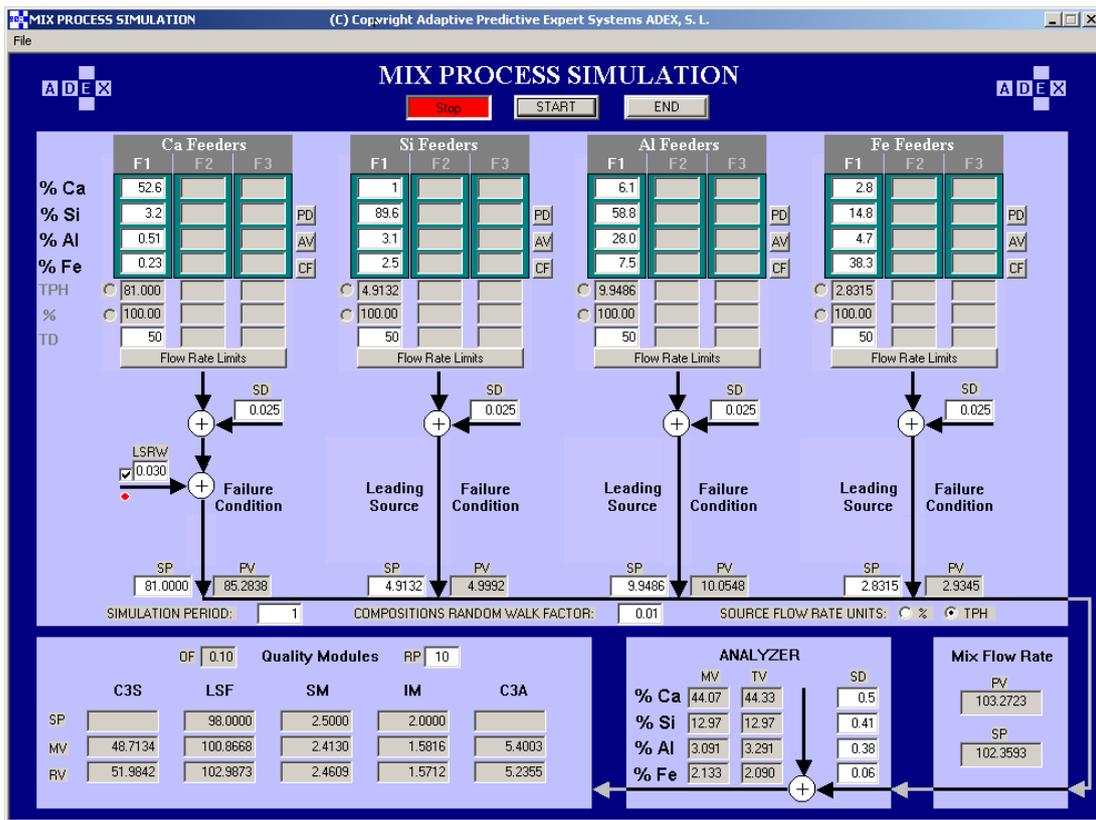


Figura 117. Simulación de fuente de CaO incontrolable

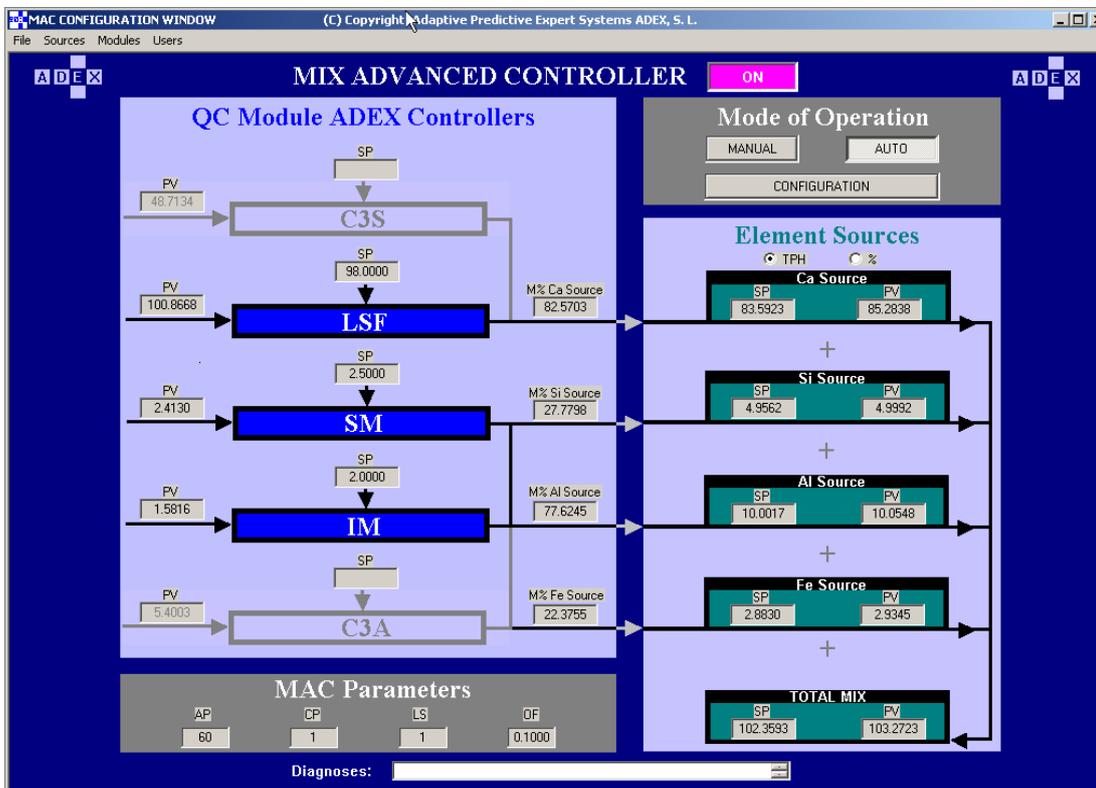


Figura 118. Declaración de la fuente de CaO como fuente conductora

Esta situación suele ocurrir con la fuente mayoritaria, la de CaO, y por ello, se ha simulado esa situación. El aspecto que tiene el MPS en esta situación es el de la Figura 117, en donde se ve que la fuente de CaO está marcado la opción “*Leading Source*”, con un LSRW de 0,03. La Figura 118 muestra la declaración en MAC de la fuente de CaO como fuente conductora (campo LS igual a 1).

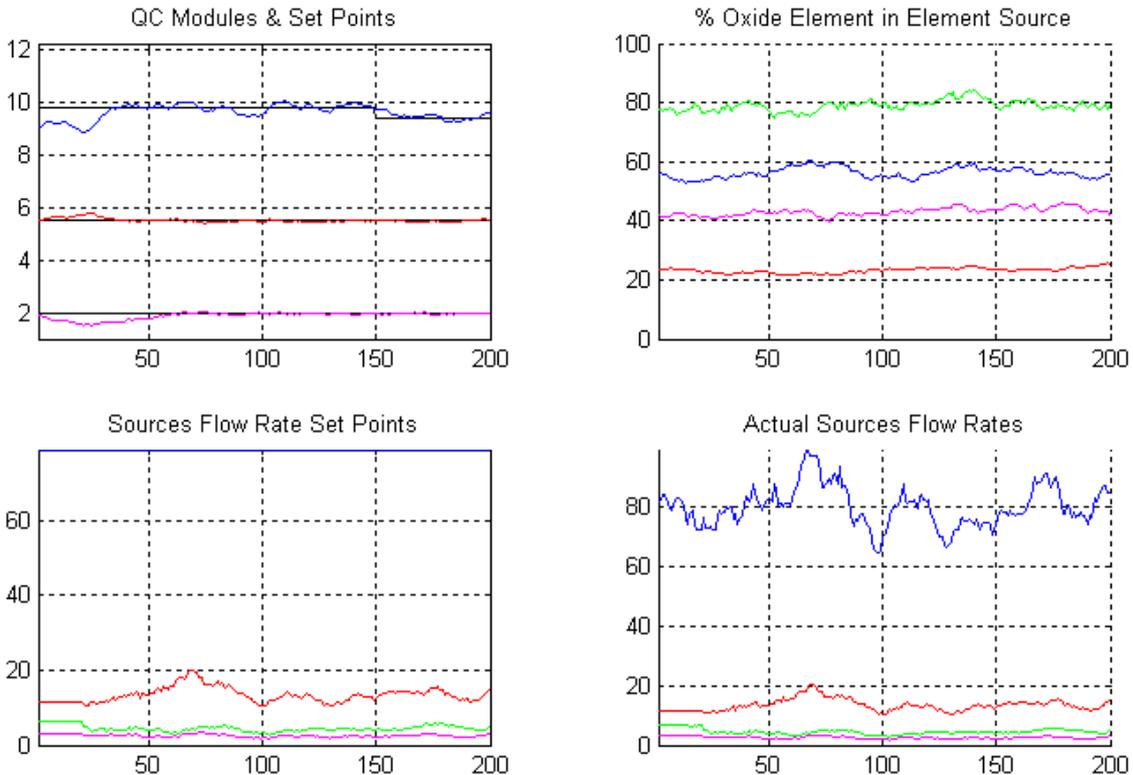


Figura 119. Control de LSF, SM e IM con modo *Leading Source* en la fuente de CaO

En la gráfica inferior derecha de la Figura 119 se puede observar como el caudal de la fuente de CaO, azul, oscila libremente, entre un valor mínimo de unas 63 TPH y un valor máximo de unas 90 TPH. En cada instante de control, MAC adapta los caudales de las otras tres fuentes, SiO₂, en verde, Al₂O₃, en rojo, y Fe₂O₃, en rosa, para que LSF, SM e IM se mantengan en consigna. Los detalles exactos de la obtención de las consignas de caudal a partir de las señales de control son los descritos en la sección 3.6.5.1 sobre “Fuente Conductora de CaO”. Como es evidente, el hecho de que el caudal de la *leading source* cambie de forma continua

equivale a sufrir una perturbación constante, que hace que el control no pueda ser tan preciso como el que se obtiene en la experiencia del Ejemplo 1. Digamos, que equivaldría también a controlar sin modo *leading source* pero con cambios constantes en el caudal total demandado de la mezcla. Sin embargo, se puede considerar completamente satisfactorio, teniendo en cuenta la gran variación del caudal de la fuente incontrolable declarada como *leading source* en MAC y los altos ruidos de medida y de proceso presentes.

6.4.2 Atascos en las fuentes

Las Figuras 120, 121, 122 y 123 ilustran el comportamiento de MAC ante situación de atasco a 0 TPH en las fuente de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, respectivamente.

6.4.2.1 Atasco en la fuente de CaO

En la Figura 120, se puede observar como en el instante 30, se produce un atasco en la fuente de CaO, de manera que su caudal se hace instantáneamente cero (véase la gráfica inferior derecha, línea azul), descendiendo rápidamente el LSF, gráfica superior izquierda, debido a que el proceso se queda sin fuente de CaO, suministrador del LSF elevado de acuerdo al método de la presente Tesis.

La robustez y flexibilidad requerida en el sistema de control de la mezcla en una planta de cemento implica que en estas condiciones, se dé la mejor solución al cliente, que en este caso, claramente es la de controlar SM e IM. Es por ello que, como ya se indicó en el Capítulo 3 en la sección 3.6.4, en esta situación MAC pasa automáticamente del esquema de control de los tres módulos al esquema de control de los dos módulos que se siguen pudiendo controlar, es decir, SM e IM, siendo el caudal total de la mezcla desde que se produce el atasco igual a la suma de los caudales que se aplicaban a las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en el instante anterior al atasco, obteniendo un control completamente satisfactorio y preciso de SM e IM

en el período en el que dura el atasco, con un caudal total de la mezcla en ese instante de unas 25 TPH (instantes 30 a 130). Una vez que se recupera el atasco en la fuente de CaO, MAC vuelve a funcionar en el esquema de control de los tres módulos normal, ajustándose a la demanda de caudal total de 100 TPH, recuperando el LSF desde un valor inferior a 10 hasta el valor de consigna de 94 en un período de 100 instantes de control. Hay que destacar que, mientras que el LSF estuvo por debajo de 75, de acuerdo a la configuración del controlador ADEX de LSF, éste funcionó en el dominio experto inferior, y por tanto, por debajo de 75 no se ha utilizado modelo AP para generar la señal de control del lazo de LSF, % de la fuente de CaO en la fuente de LSF, sino control experto, siendo la única regla la aplicación del límite incremental del 5% a esta señal de control, hasta que el LSF vuelve a sobrepasar 75. En ese instante se vuelve a aplicar control adaptativo predictivo al entrar en el dominio adaptativo predictivo central.

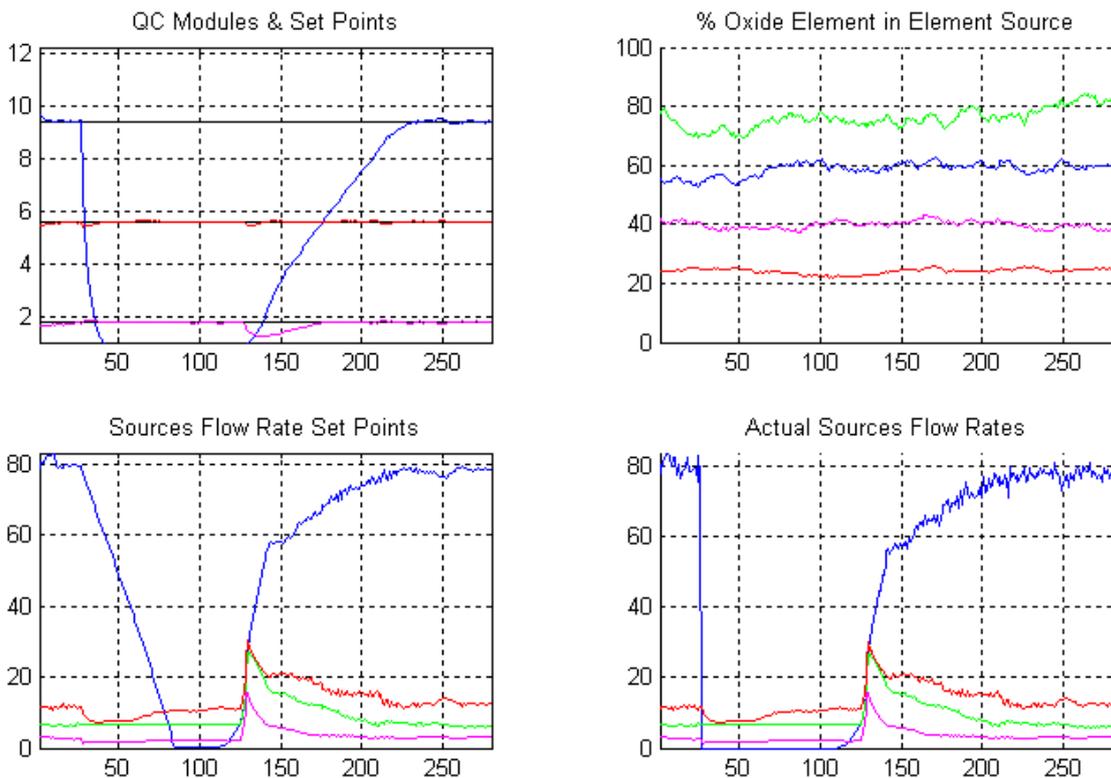


Figura 120. Control en presencia de atasco en la fuente de CaO

También es de destacar, que dada la flexibilidad que aporta la solución proporcionada por MAC, también se obtendría un control satisfactorio si, en esta situación de atasco de la fuente de CaO se hubiera optado por entrar en modo *leading source* con la fuente de SiO₂, en vez de pasar al esquema de control de dos módulos puro, ajustando el caudal total entonces al caudal de la fuente de SiO₂ en el instante anterior al atasco.

6.4.2.2 Atasco en la fuente de SiO₂

En el caso del atasco en la fuente de SiO₂, instantes 30 a 160 de la Figura 121, véase gráfica inferior izquierda con línea verde a cero, el SM desciende súbitamente y es incapaz de alcanzar su consigna de 2.6 (la gráfica superior izquierda suma 3 unidades al SM), todo ello, como es lógico, debido a que la fuente de SiO₂ es de por sí el suministrador del SM elevado. Asimismo, vemos como el LSF, como es lógico también, instantáneamente se eleva ante esta fuerte perturbación. Aun así, vemos como MAC es capaz de controlar LSF e IM en esta situación de forma satisfactoria, respetando el caudal total de 100 TPH.

Es decir, en esta situación MAC pasa a funcionar en esquema de control de dos módulos, controlando LSF e IM, debido a que el suministrador de alto LSF (fuente de CaO) y el suministrador de bajo LSF, el resto de fuentes, siguen estando disponibles. Lo único que hará el sistema es pedir más caudal de la fuente de Al₂O₃ y Fe₂O₃ para seguir manteniendo la consigna de LSF, compensando la no existencia de la fuente de SiO₂ como aportador a la fuente de bajo LSF, lo cual se ve claramente que ocurre a partir del instante 30 en la gráfica inferior izquierda, al ver que sube la demanda de caudal de la fuente de Al₂O₃ (línea roja) y de la fuente de Fe₂O₃ (línea rosa). El IM también sigue pudiéndose controlar en modo normal, ya que siguen estando operativas las fuentes de Al₂O₃ y de Fe₂O₃. Una vez recuperado el atasco en la fuente de SiO₂, instante 160, el SM vuelve rápidamente a su consigna de 2.6, como se aprecia claramente en la Figura 121.

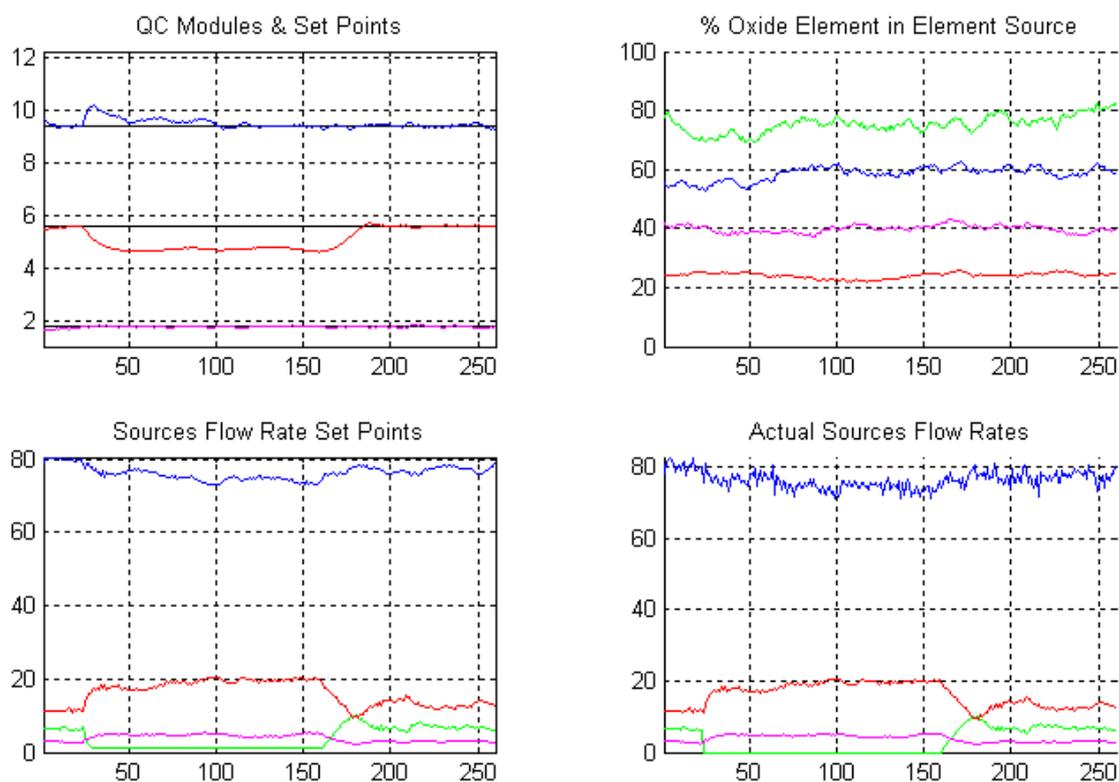


Figura 121. Control en presencia de atasco en la fuente de SiO_2

6.4.2.3 Atasco en la fuente de Al_2O_3

Para el caso de atasco en la fuente de Al_2O_3 y de Fe_2O_3 , el funcionamiento es pasando a control en esquema de dos módulos, regulando LSF y SM, siendo en estos dos casos el IM el módulo que quedará fuera de control. Es decir, en el atasco en la fuente de Al_2O_3 , instantes 30 a 90 de la gráfica inferior derecha de la Figura 122, se pierde el suministrador de elevado IM, luego el IM baja fuertemente, controlando MAC de forma satisfactoria el LSF y el SM en esta situación. Para el control satisfactorio de LSF respetando el caudal total de mezcla de 100 TPH, MAC sube en consecuencia las fuentes de SiO_2 y de Fe_2O_3 , que constituyen en esta situación el único suministro de bajo LSF, y para el control del SM se requiere que suba aún más la de Fe_2O_3 , suministrador único de bajo SM en estas circunstancias. Este comportamiento de MAC se ve claramente en las nuevas demandas de caudal para las fuentes de SiO_2 y de Fe_2O_3 , desde el instante 30 al 90 (gráfica inferior izquierda). Al recuperar la fuente de Al_2O_3 , instante 90, el IM se vuelve a regular en consigna,

aumentando MAC progresivamente la consigna de caudal para la fuente de Al_2O_3 , como se ve en la gráfica superior derecha.

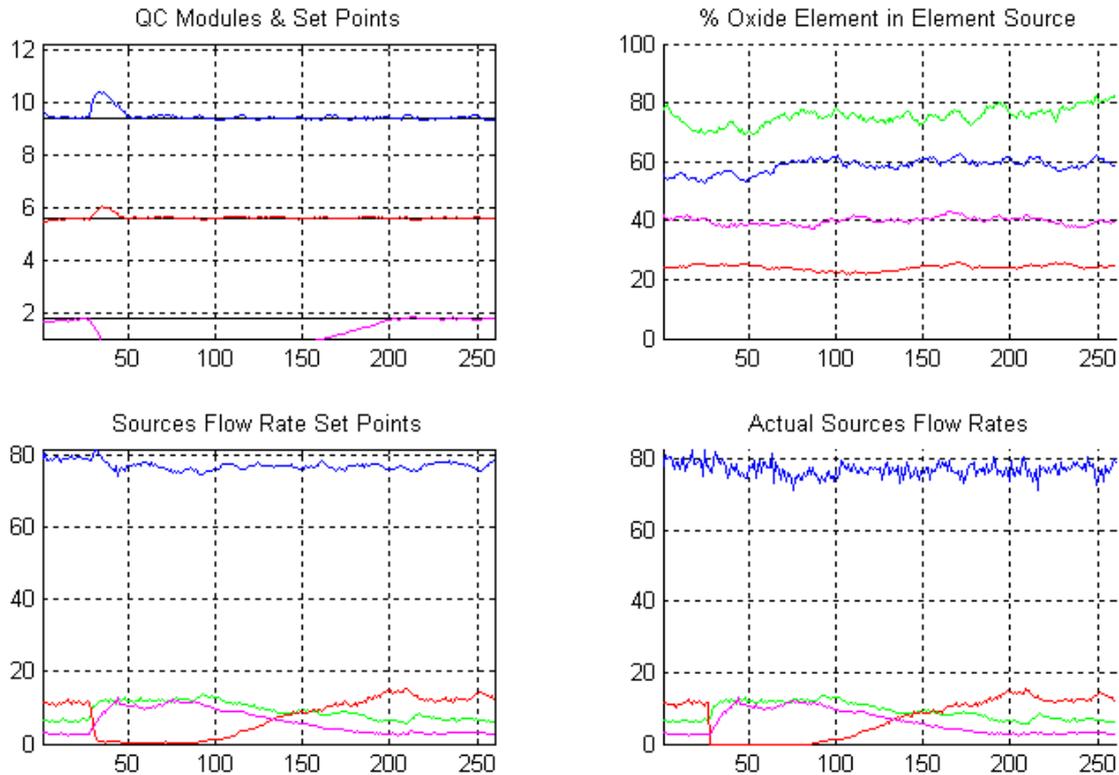


Figura 122. Control en presencia de atasco en la fuente de Al_2O_3

6.4.2.3 Atasco en la fuente de Fe_2O_3

En el caso de atasco en la fuente de Fe_2O_3 , instantes 30 a 100 de la gráfica inferior derecha de la figura 123, con la fuente de Fe_2O_3 , línea rosa, a 0 TPH, el IM queda por encima de consigna, al perder el suministrador de bajo IM. MAC responde de forma adecuada a esta perturbación, controlando en este periodo LSF y SM, respetando el caudal total de 100 TPH, y recuperando el control satisfactorio del IM a 1.8 una vez que se recupera el atasco en la fuente de Fe_2O_3 .

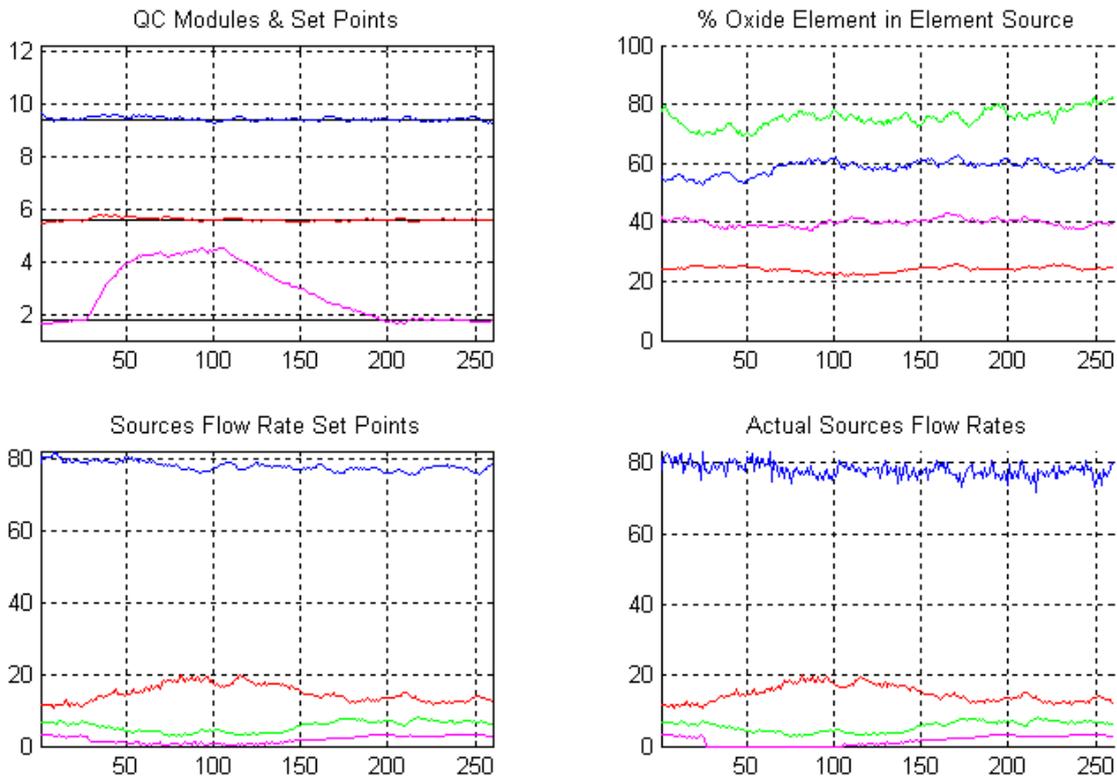


Figura 123. Control en presencia de atasco en la fuente de Al_2O_3

6.5 Ejemplo 4: un desafío industrial

Esta sección del capítulo presenta los principales resultados obtenidos en la aplicación de MAC a la simulación de un proceso de mezcla construido a partir de los datos de planta industrial proporcionados por una empresa cementera, y de acuerdo a los requisitos de este cliente. Según estos requisitos, los objetivos de control son mantener en consigna el LSF y SM, por medio de la utilización de tres fuentes: caliza, marga y arena. Este objetivo se alcanza bajo dos escenarios diferentes, que contemplan variaciones continuas de la composición química de las fuentes.

6.5.1 Descripción de la simulación

La simulación considerada se basa en los siguientes puntos:

1. Se consideran tres fuentes diferentes, cada una con un alimentador, la caliza, marga y arena.
2. Los óxidos considerados, en la composición de las fuentes, así como en la mezcla, son los ya mencionados CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . El período de análisis es de 1 minuto, lo cual determina también un período de control de 1 minuto. Por tanto, cada minuto se mide la composición de la mezcla y las señales de control es decir, las nuevas consignas de caudal, se aplican al proceso.
3. La composición de las fuentes cambia de forma continua minuto a minuto, como se explica más adelante, para cada uno de los dos escenarios considerados.
4. El caudal total de la mezcla es de 1, es decir, se despliegan los datos y los resultados en tanto por uno.
5. Los límites absolutos de las fuentes son 0 y 1, y el límite incremental para todas las fuentes es de 0.02.
6. Los ruidos gaussianos que se añaden a la composición real de la mezcla, para simular la falta de precisión del analizador, son los correspondientes a una banda de 600 mm; y por tanto, de desviaciones estándar 0.5, 0.41, 0.37 y 0.09.
7. La desviación estándar de los ruidos gaussianos añadidos a las consignas de caudal para simular la falta de precisión de los controladores de caudal son de 2.5%, 0.25% y 2.25% para la caliza, arena y marga, respectivamente. Esto representa un muy elevado nivel de ruido de proceso, ya que para un caudal de caliza del 50%, por ejemplo, el caudal real aplicado al proceso puede oscilar aleatoriamente entre 46.25% y 53.75%.

6.5.2 Datos de las composiciones de las fuentes

Los datos aportados por el cliente sobre la composición química de sus materias primas para el proceso de simulación se muestran en las siguientes tres tablas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Loi	41.13	41.88	40.90	42.53	39.56	39.65	37.68	38.69	35.64	42.53
SiO2	4.34	4.11	5.19	3.16	6.97	7.92	10.41	9.77	12.39	3.16
Al2O3	1.69	1.18	1.19	1.12	1.93	1.50	2.19	1.91	2.54	1.12
Fe2O3	0.58	0.47	0.48	0.35	0.76	0.67	1.01	0.81	1.20	0.39
CaO	50.68	49.74	49.85	49.53	47.01	47.49	46.27	45.60	45.12	49.53
MgO	0.71	1.12	1.36	1.82	2.08	1.65	1.20	2.27	1.09	1.82
LSF	348.1	375.9	306.3	475.3	210.5	194.5	142.6	151.1	117.1	474.1
SM	1.91	2.49	3.11	2.15	2.59	3.65	3.25	3.59	3.31	2.09

Tabla 11.1. Análisis de las Calizas (1-10) de planta Industrial 1

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Loi	42.11	41.13	43.13	41.55	42.57	42.59	42.90	41.88	42.16	41.62
SiO2	2.85	4.34	2.51	2.83	2.11	1.80	1.59	4.11	2.46	3.46
Al2O3	0.94	1.69	0.75	0.70	0.64	0.52	0.15	1.18	0.88	1.23
Fe2O3	0.30	0.58	0.27	0.39	0.22	0.17	0.72	0.47	0.29	0.61
CaO	57.70	50.68	51.17	51.39	52.14	52.88	53.87	49.74	52.20	50.85
MgO	0.82	0.71	0.94	1.06	0.85	0.64	0.72	1.12	0.95	0.92
LSF	555.7	348.1	631.4	569.8	764.6	915.7	1056.	375.9	641.8	439.8
SM	2.30	1.91	2.46	2.60	2.45	2.61	1.83	2.49	2.10	1.88

Tabla 11.2. Análisis de la Calizas (11-20) de planta Industrial 1

	1
<u>Loi</u>	6.12
<u>SiO2</u>	80.27
<u>Al2O3</u>	2.50
<u>Fe2O3</u>	2.78
<u>CaO</u>	1.68
<u>MgO</u>	0.45
<u>LSF</u>	0.73
<u>SM</u>	15.20

Tabla 12. Análisis de la Arena de planta industrial

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<u>Loi</u>	32.39	31.99	30.98	29.23	29.09	30.52	31.27	30.44	32.39	31.44
<u>SiO2</u>	16.81	17.60	18.83	23.41	21.27	19.39	18.24	19.68	16.81	18.44
<u>Al2O3</u>	5.97	6.35	6.80	8.02	7.51	7.19	6.66	6.86	5.97	7.06
<u>Fe2O3</u>	2.27	2.38	2.60	3.00	2.98	2.73	2.69	2.67	2.27	2.78
<u>CaO</u>	37.37	36.09	34.72	32.31	32.43	34.83	35.25	36.07	37.37	35.14
<u>MgO</u>	2.08	2.62	3.01	1.43	2.39	2.16	2.96	1.48	2.08	2.07
<u>LSF</u>	67.08	61.75	55.49	41.89	45.10	53.84	57.97	55.43	67.08	56.76
<u>SM</u>	2.04	2.02	2.00	2.12	2.08	1.95	1.95	2.07	2.04	1.87

Tabla 13.1. Análisis de la Marga (1-10) de planta industrial

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Loi	30.00	27.74	25.79	30.46	28.08	29.23	27.73	30.02	29.35	30.55
SiO₂	20.18	22.63	26.72	22.16	22.41	23.41	23.21	20.41	21.10	19.92
Al₂O₃	7.77	8.51	9.05	7.89	8.31	8.02	8.05	7.51	8.02	7.03
Fe₂O₃	2.95	3.31	3.69	3.19	3.24	3.00	3.39	2.94	2.99	2.73
CaO	33.76	30.78	27.50	29.17	31.03	32.31	30.70	33.05	32.81	34.81
MgO	1.92	3.06	2.70	2.93	3.08	1.43	3.04	2.50	2.38	2.02
LSF	49.83	40.65	31.22	39.64	41.47	41.89	39.95	48.55	46.44	52.75
SM	1.88	1.91	2.10	2.00	1.94	2.12	2.03	1.95	1.92	2.04

Tabla 13.2. Análisis de la Margas (11-20) de planta industrial 1

6.5.3 Escenario 1: Evolución secuencial de la composición de las fuentes

En este escenario, las composiciones iniciales de la caliza, arena y marga son las de la primera columna (nº 1) de las tablas anteriores. La composición de la fuente de caliza cambia de la columna 1 de la tabla de caliza (tabla 11.1) a la columna 2 en 10 minutos, y lo mismo ocurre con la marga, que cambia de la columna 1 a la columna 2 de la tabla de marga (tabla 13.1) en 10 minutos. Esta variación continúa ocurriendo - en secuencia- para todas las parejas de calizas y margas, es decir, del minuto 10 al 20 se pasará de la columna 2 a la 3 tanto para calizas como para margas, y así sucesivamente. El tercer material se caracteriza por el análisis de la arena silícea. Con una frecuencia de 1 análisis/minuto, se obtiene una secuencia de 190 análisis, sumando en total más de tres horas de control en simulación.

Los índices estadísticos de resultado más interesantes, como se ilustra en las figuras a continuación, son:

- El número de minutos (análisis) necesarios para cortar el setpoint.

- El número de análisis que se han de promediar para obtener una desviación estándar de $LSF < 2$ y una desviación estándar de $SM < 0.1$.
- La desviación estándar y la media de LSF y SM al final de periodo de simulación, calculada a partir de todos los datos de análisis de la mezcla obtenidos durante toda la simulación.

En este experimento de 190 minutos de control en simulación, los setpoints de LSF y SM son de 96 y 2.6, respectivamente.

6.5.4 Escenario 1: Evolución aleatoria de la composición de las fuentes

Este escenario considera una combinación aleatoria de los análisis de las calizas, margas y arena para simular un caso caracterizado por una marcada variabilidad de las materias primas de los alimentadores.

Este escenario, al igual que el escenario 1, cambian las composiciones de caliza y marga cada 10 minutos. En el escenario 1 dicha evolución es en orden, mientras que en el caso del escenario 2, los cambios en las composiciones se seleccionan de manera aleatoria, a partir de las tablas de datos proporcionadas. Ambos escenarios se implementan utilizando el MPS del Capítulo 5, utilizando la opción de “cambios predefinidos en las composiciones”, explicada en la sección 5.1.1.3 de dicho Capítulo 5.

Se presentan dos experimentos para mostrar el rendimiento de MAC en este escenario, siendo la única diferencia entre ambos la duración, que es de 190 minutos en el primero, y de 24 horas en el segundo. En ambos casos, los setpoints de LSF y SM son de 96 y 2.6, respectivamente.

6.5.5 Resultados obtenidos

6.5.5.1 Escenario 1

Los resultados del experimento ilustrativo seleccionado para este escenario se muestran en las figuras 124 a 134, como se explica a continuación:

- Las Figuras 124 y 125 muestran la evolución secuencial de las calizas y las margas en el MPS en el escenario 1.
- La Figura 126 muestra la evolución de los módulos de calidad y sus setpoints. El LSF aparece dividido por 10.
- La Figura 127 representa la evolución de las consignas de caudal calculados por MAC.
- La Figura 128 muestra los cambios en la composición de la fuente de caliza.
- La Figura 129 muestra los cambios en la composición de la fuente de marga.
- La Figura 130 muestra la composición en la mezcla medida para el óxido de CaO y su valor filtrado entre los minutos 60 y 100, ilustrando el elevado nivel de ruido de medida en el proceso simulado.
- La figura 131 muestra las consignas de caudal para la fuente de caliza calculas por MAC y los caudales reales aplicados a la simulación del proceso entre los minutos 60 y 100, ilustrando el elevado nivel de ruido de proceso.
- La Figura 132 presenta la evolución de la composición de la mezcla.
- La Figura 133 muestra la evolución del LSF y presenta los índices de rendimiento correspondientes. Además, al objeto de poder hacer un mero análisis comparativo, la figura 134 presenta unos índices de rendimiento ilustrativos para una aplicación real de control PID de LSF en planta.
- La Figura 135 muestra la evolución del SM y presenta los índices de rendimiento correspondientes.

6.5.5.2 Escenario 2

Los resultados del primer experimento ilustrativo (190 minutos) seleccionado para este escenario se muestran en las figuras 136 a 143, como se explica a continuación:

- Las Figuras 136 y 137 muestran la evolución aleatoria de las calizas y las margas en el simulador en el escenario 1.
- La Figura 138 muestra la evolución de los módulos de calidad y sus setpoints. El LSF aparece dividido por 10.
- La Figura 139 representa la evolución de los caudales calculados por MAC.
- La Figura 140 muestra los cambios en la composición de la fuente de caliza.
- La Figura 141 muestra los cambios en la composición de la fuente de marga.
- La Figura 142 muestra la evolución del LSF y presenta los índices de rendimiento correspondientes.
- La Figura 143 muestra la evolución del SM y presenta los índices de rendimiento correspondientes.

Los resultados del segundo ejemplo ilustrativo (24 horas) seleccionado para este escenario se muestran en las figuras 144 a 149, que presentan contenidos equivalentes a los de las figuras 126 a 131 para el primer experimento previamente considerado.

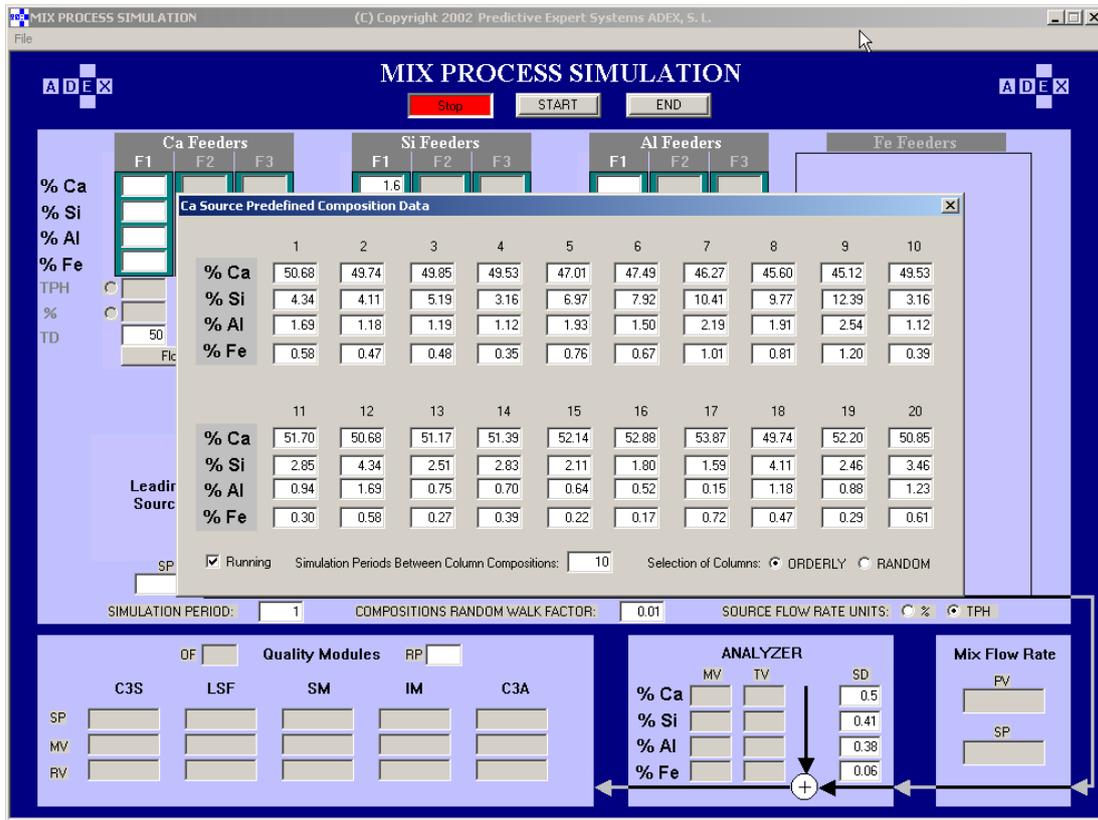


Figura 124. Evolución secuencial de las calizas

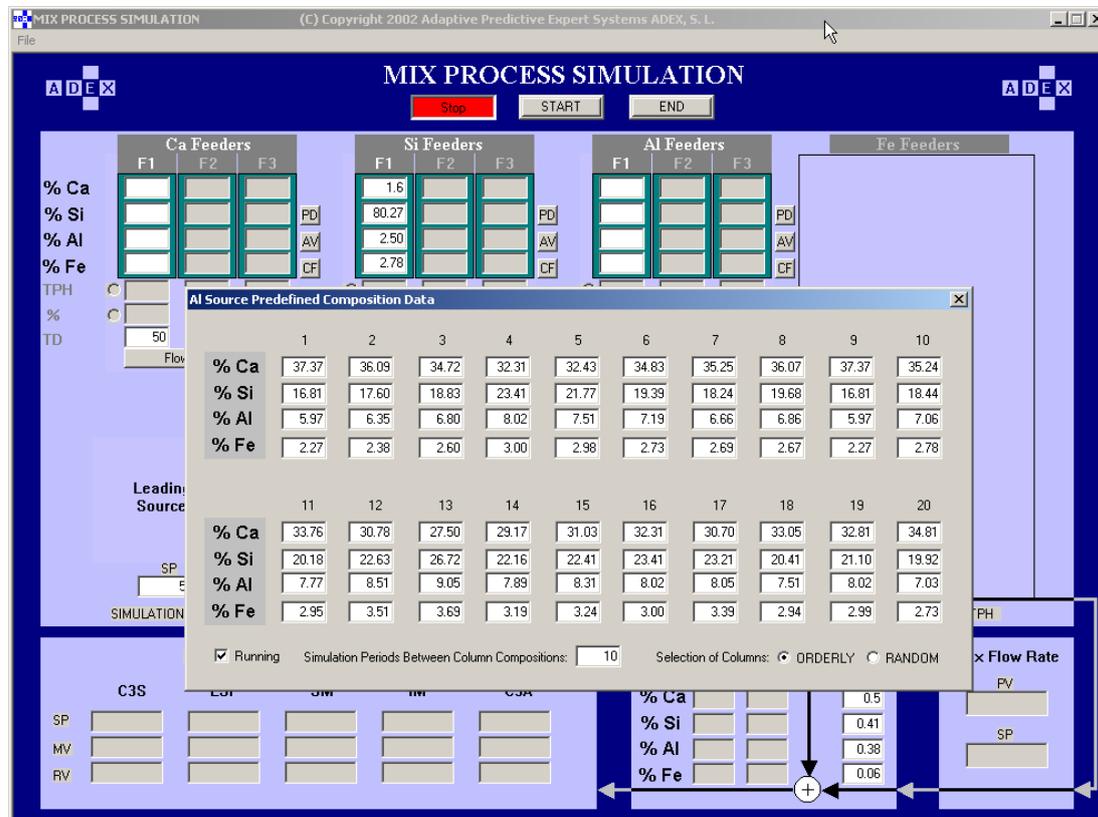


Figura 125. Evolución secuencial de las margas

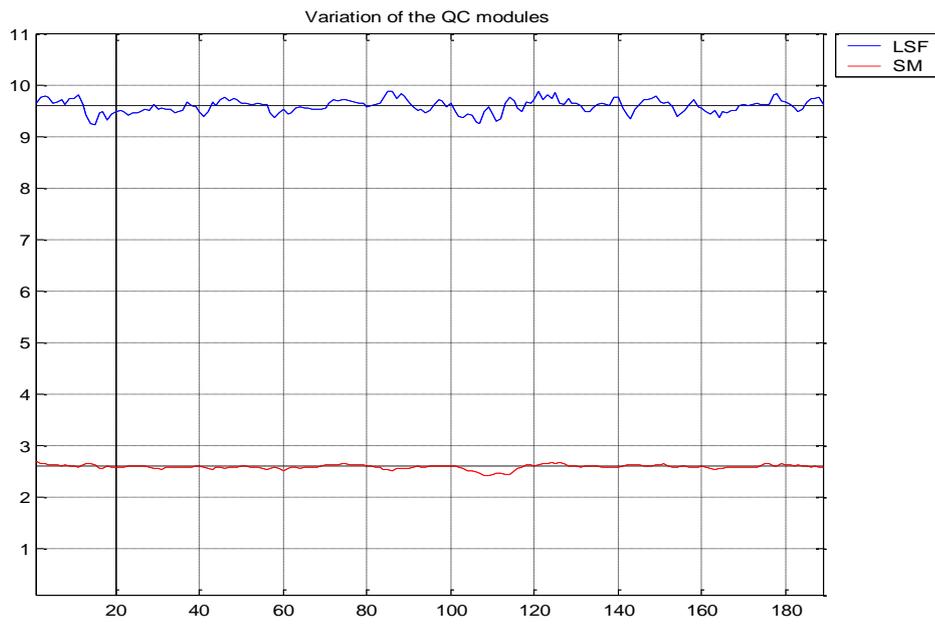


Figura 126. Evolución de los módulos de calidad - Experimento 1 del Escenario 1

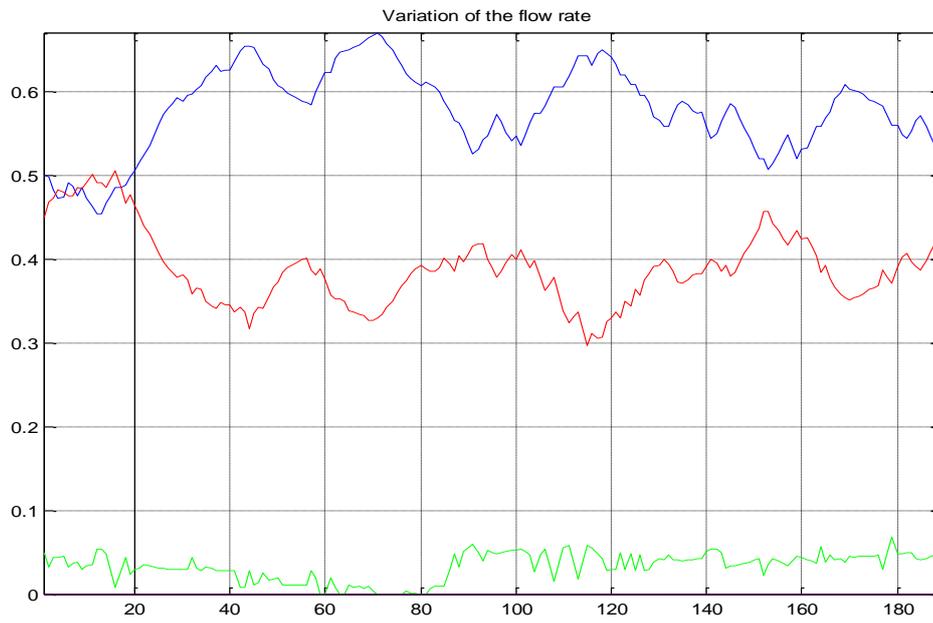


Figura 127. Evolución de las consignas de caudal en el Experimento 1 del Escenario 1

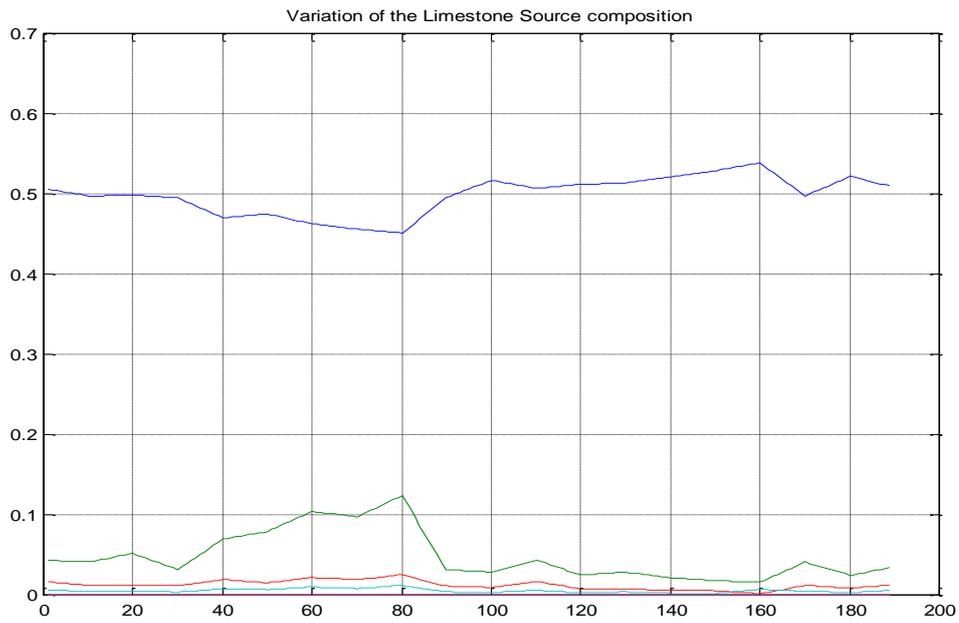


Figura 128. Evolución de la composición de la Caliza en el Experimento 1 del Escenario 1

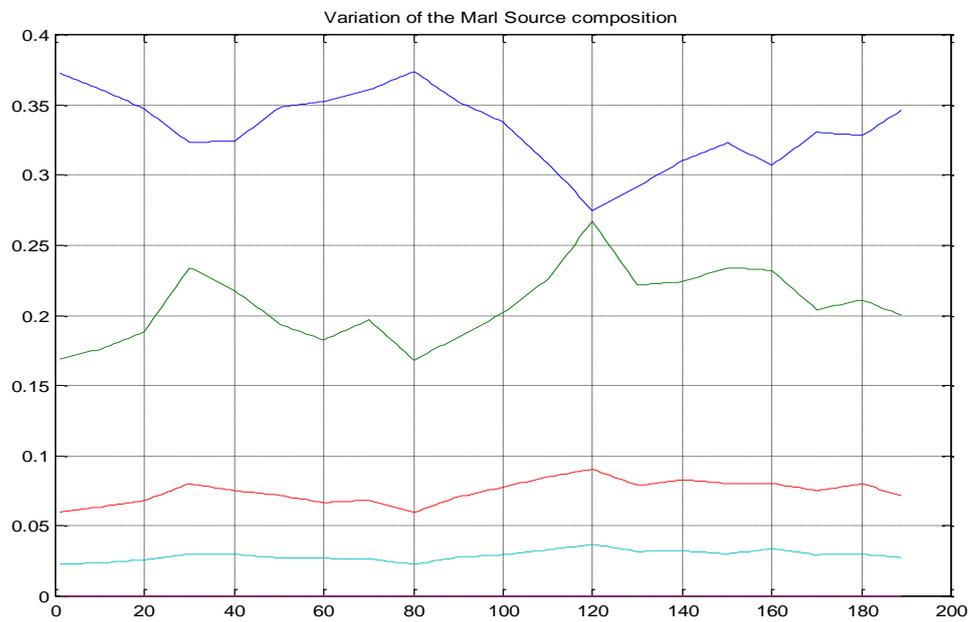


Figura 129. Evolución de la composición de la Marga en el Experimento 1 del Escenario 1

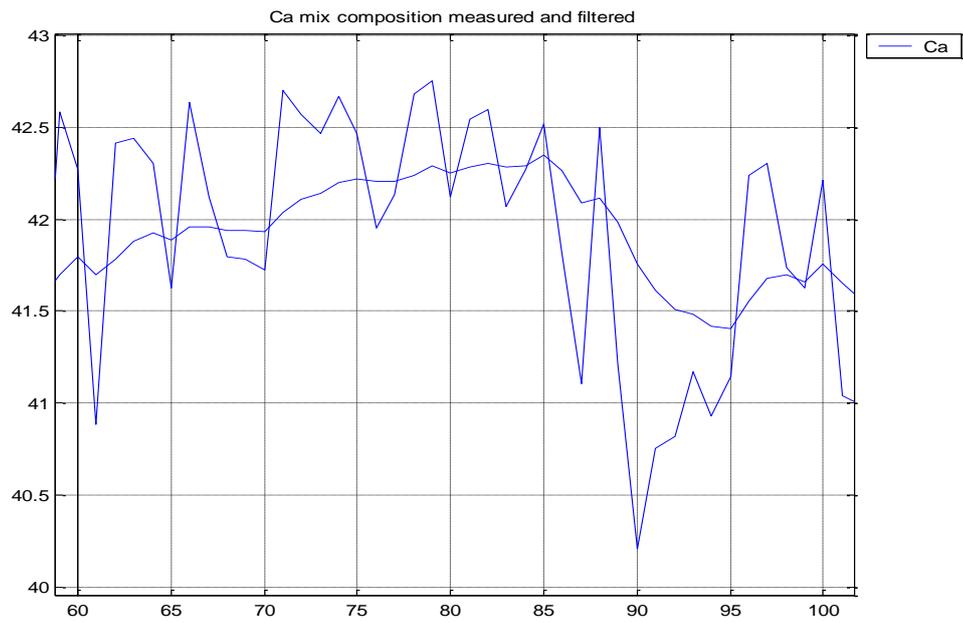


Figura 130. Evolución de la composición medida en la mezcla para el óxido de Ca y su valor filtrado en el Experimento 1 del Escenario 1

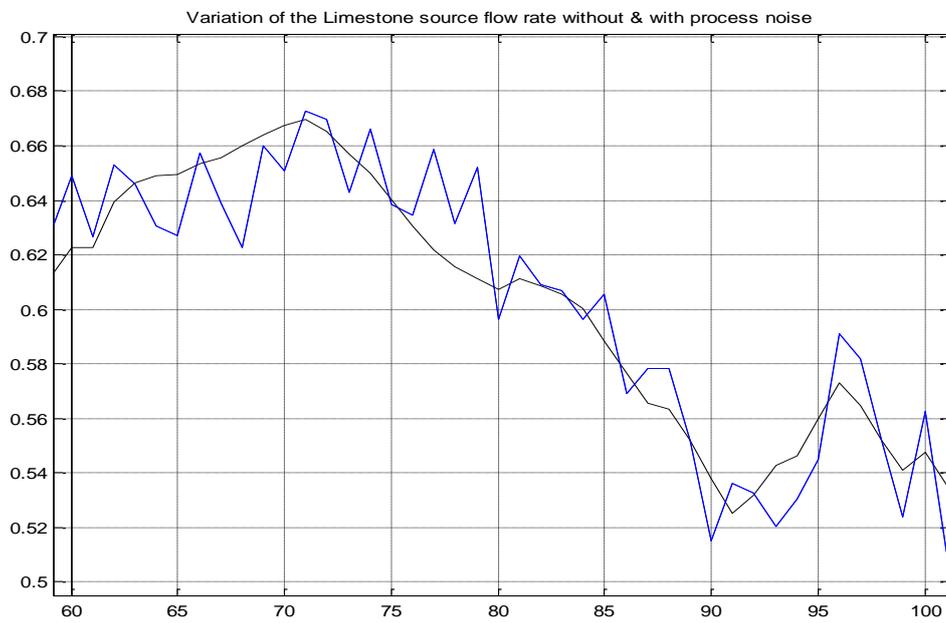


Figura 131. Evolución del caudal de la fuente de caliza con y sin ruido de proceso en el Experimento 1 del Escenario 1

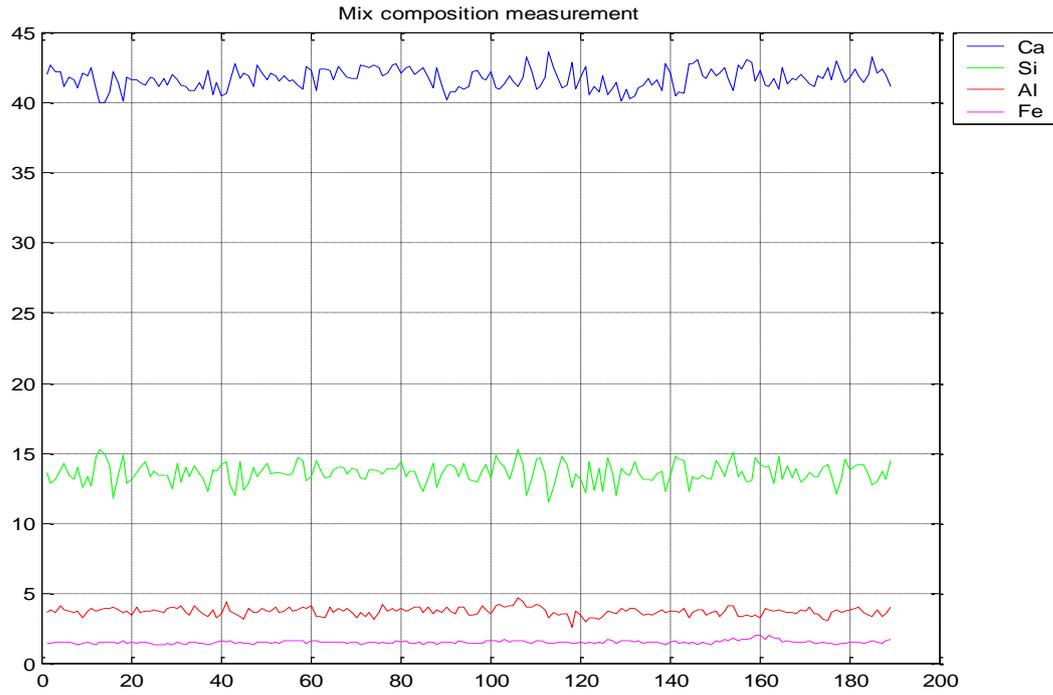


Figura 132. Evolución de la composición de la mezcla en el Experimento 1 del Escenario 1

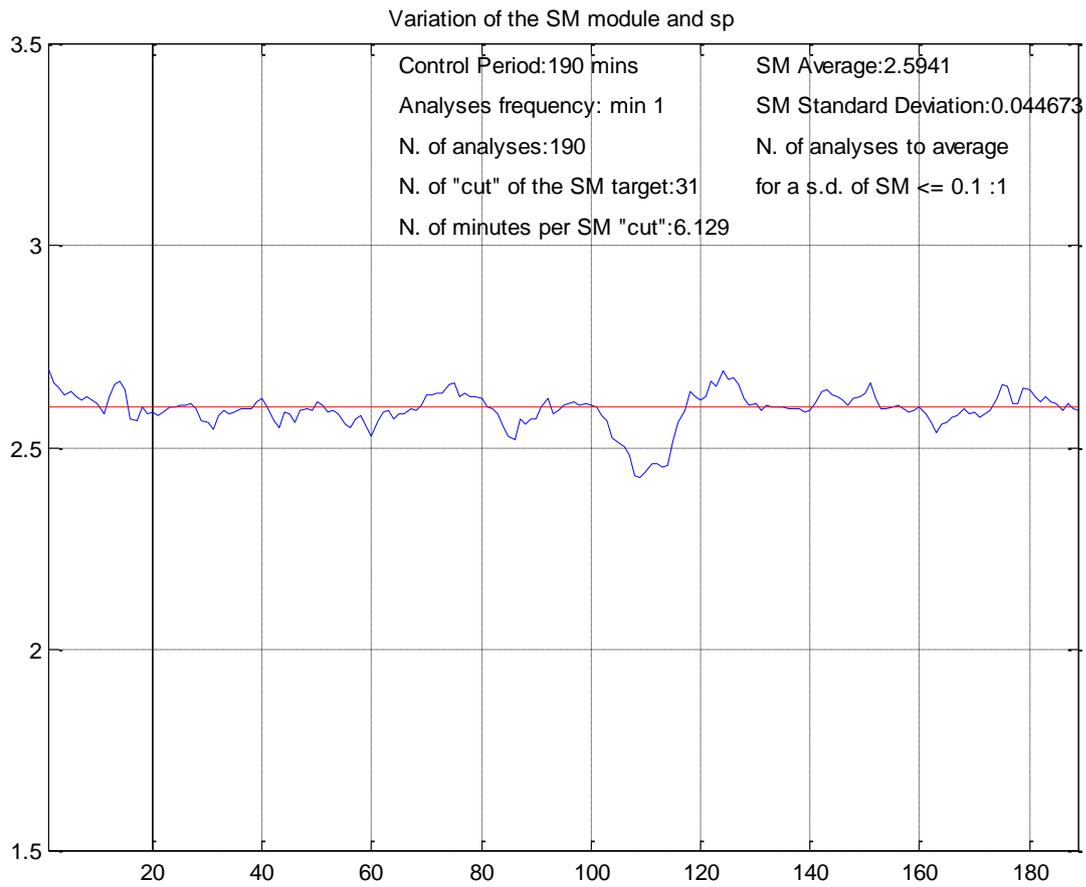


Figura 135. Evolución de SM e índices de rendimiento en el Experimento 1 del Escenario 1

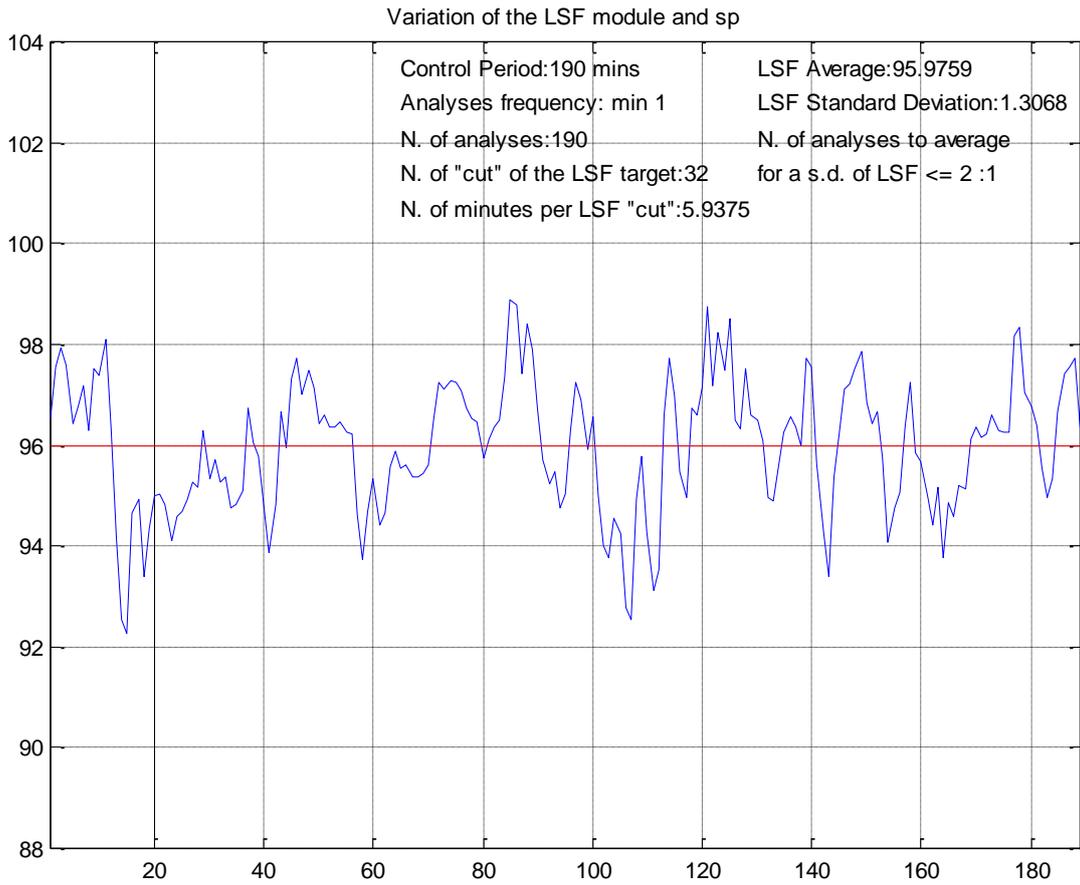


Figura 133. Evolución de LSF e índices de rendimiento en el Experimento 1 del Escenario 1

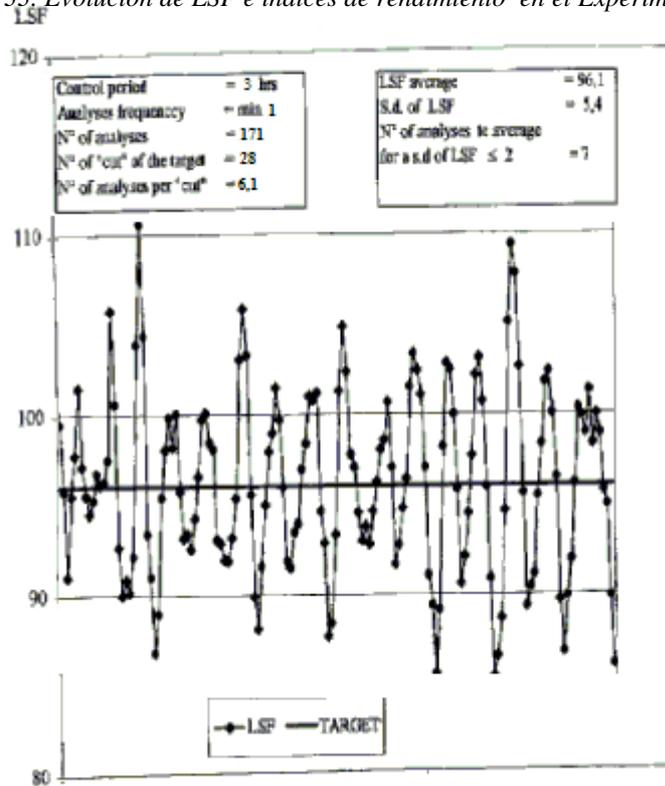


Figura 134. Evolución de control PID de LSF en aplicación real en planta

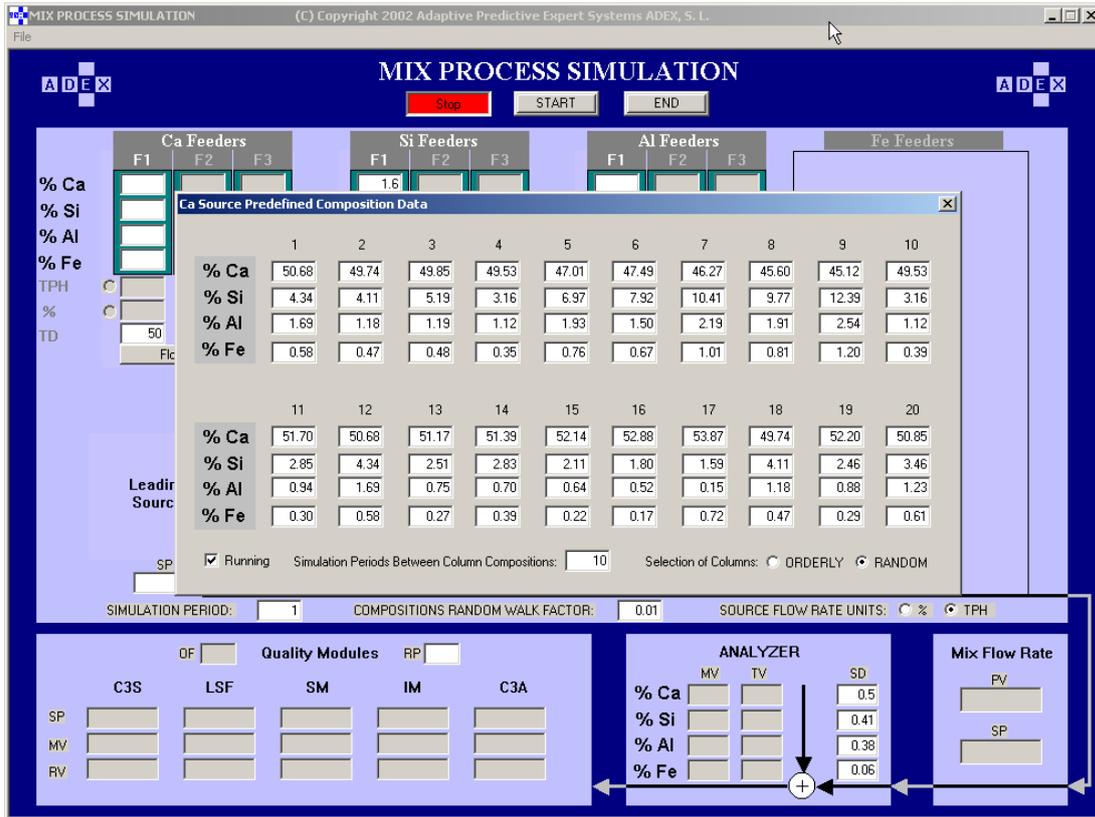


Figura 136. Evolución aleatoria de las calizas

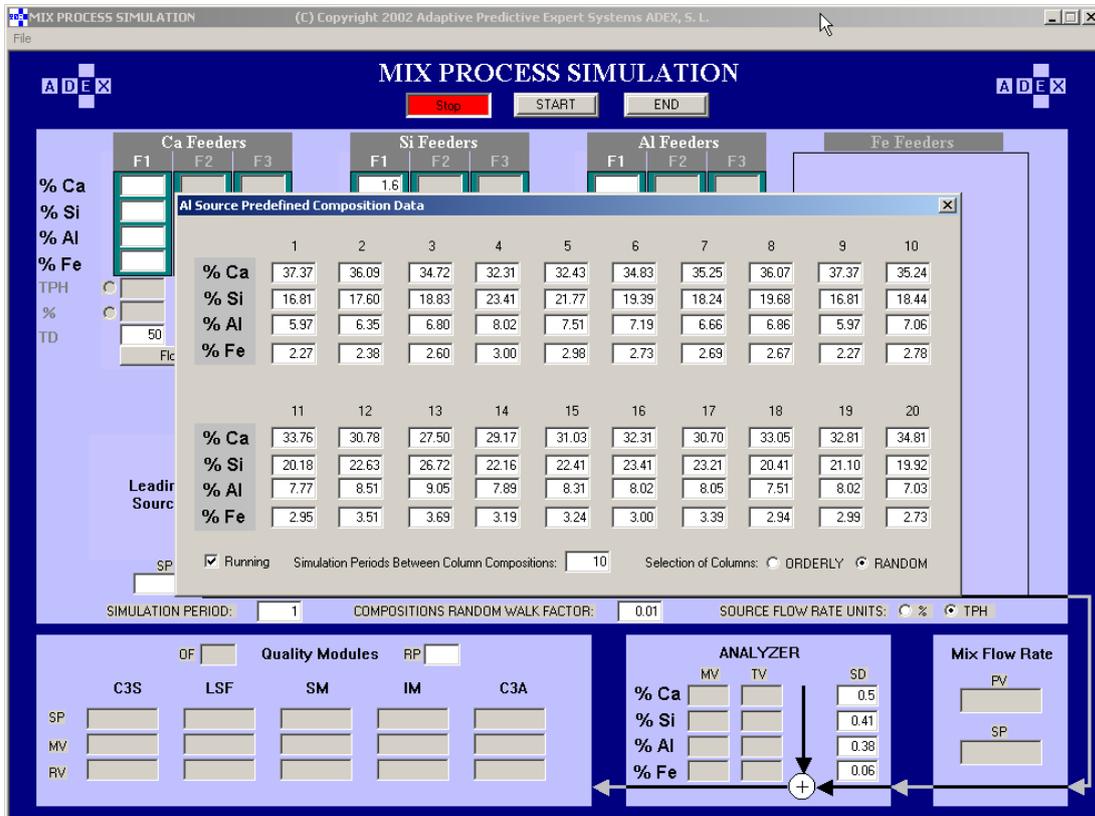


Figura 137. Evolución aleatoria de las margas

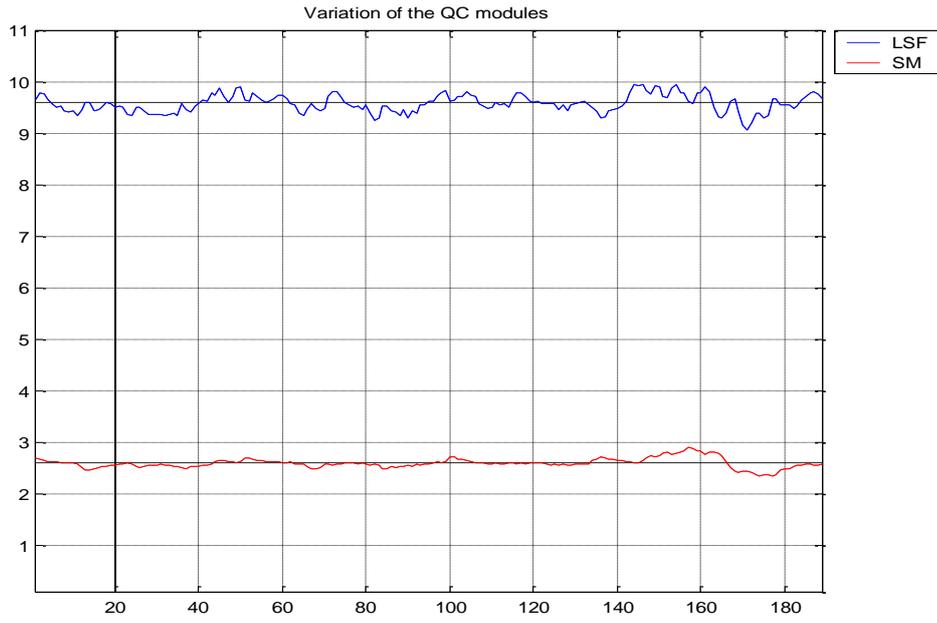


Figura 138. Evolución de los módulos de calidad - Experimento 1 del Escenario 2

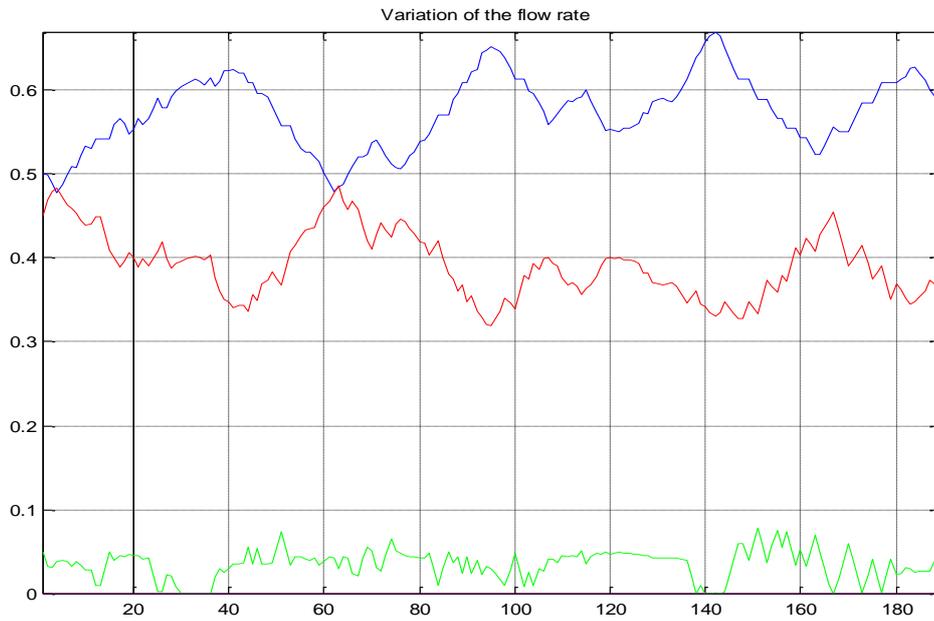


Figura 139. Evolución de las consignas de caudal en el Experimento 1 del Escenario 2

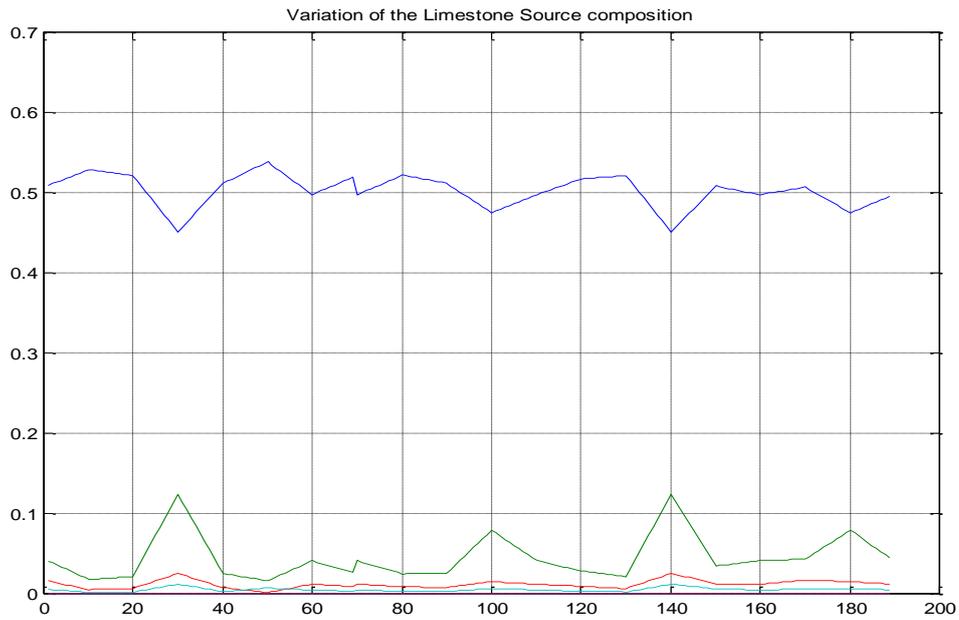


Figura 140. Evolución de la composición de la Caliza en el Experimento 1 del Escenario 2

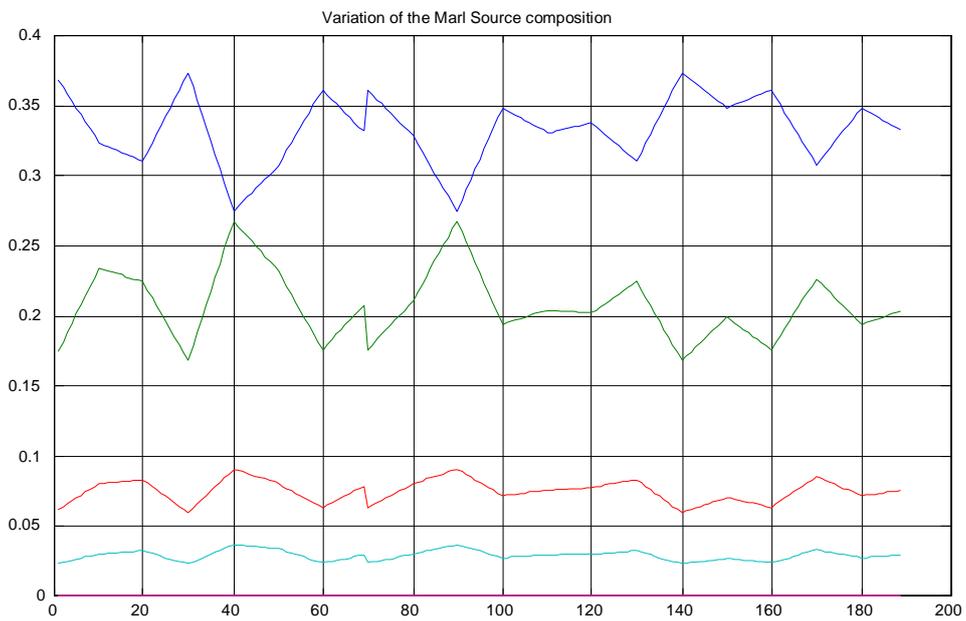


Figura 141. Evolución de la composición de la Marga en el Experimento 1 del Escenario 2

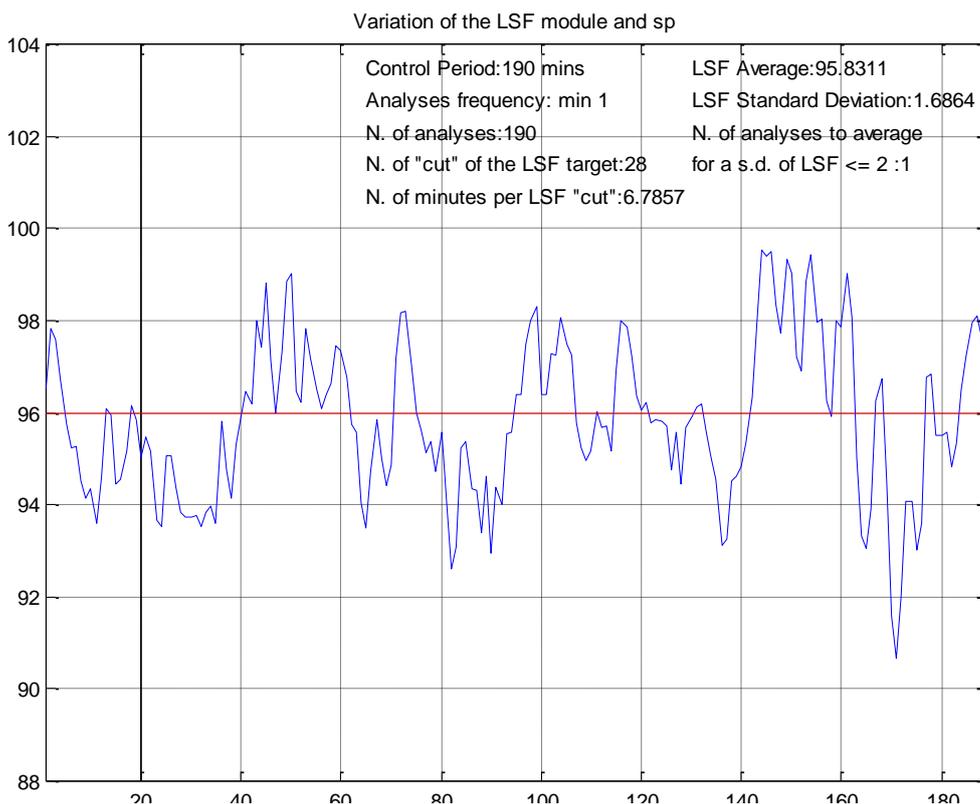


Figura 142. Evolución de LSF e índices de rendimiento en el Experimento 1 del Escenario 2

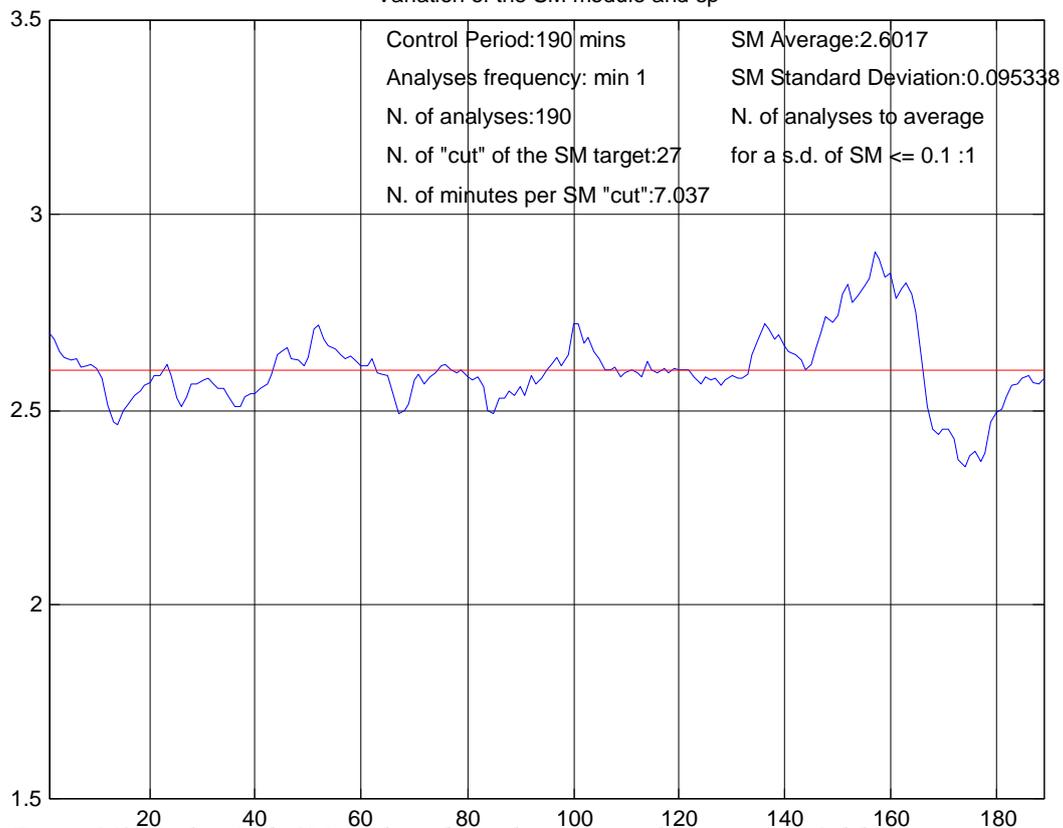


Figura 143. Evolución de SM e índices de rendimiento en el Experimento 1 del Escenario 2

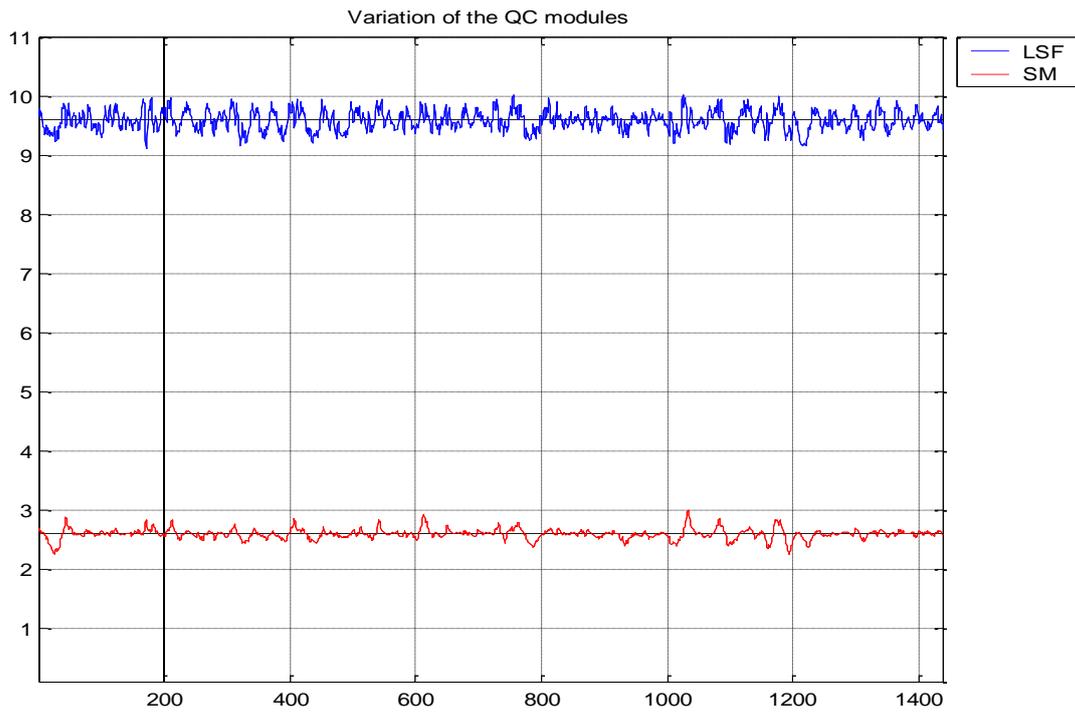


Figura 144. Evolución de los módulos de calidad - Experimento 2 del Escenario 2

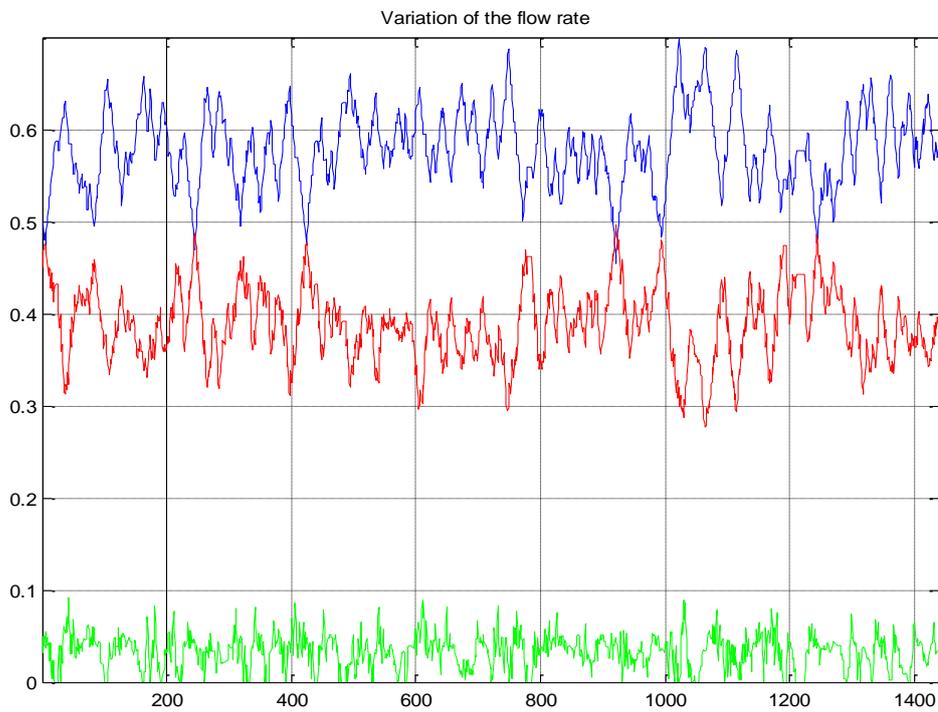


Figura 145. Evolución de las consignas de caudal en el Experimento 1 del Escenario 2

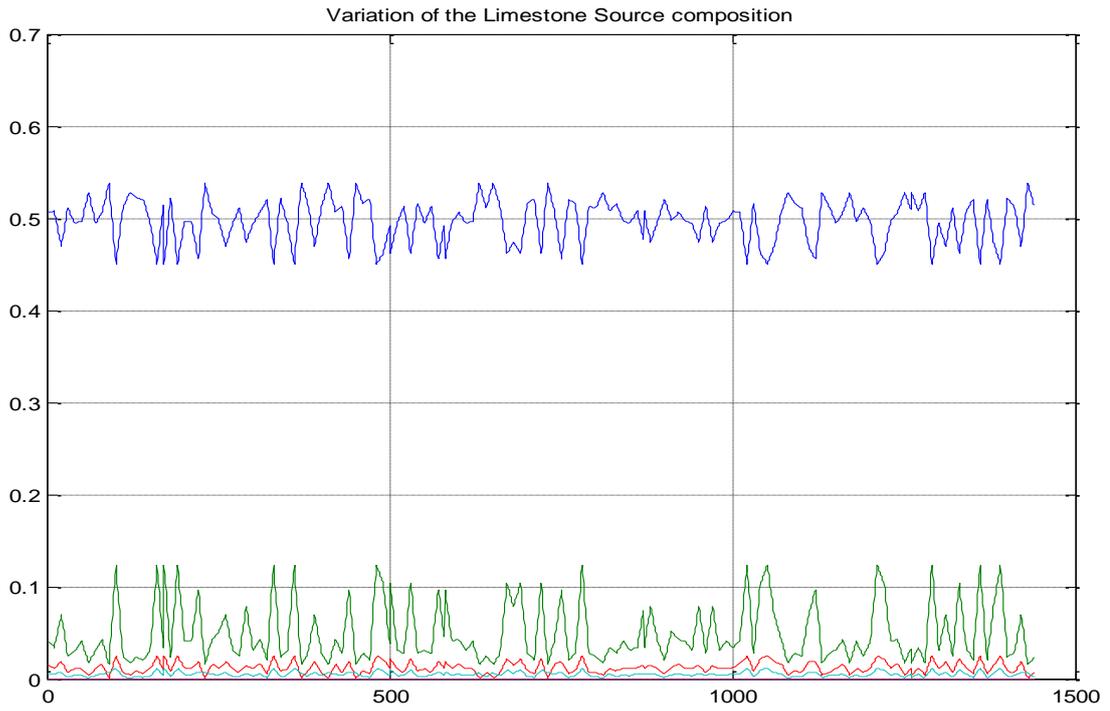


Figura 146. Evolución de la composición de la Caliza en el Experimento 2 del Escenario 2

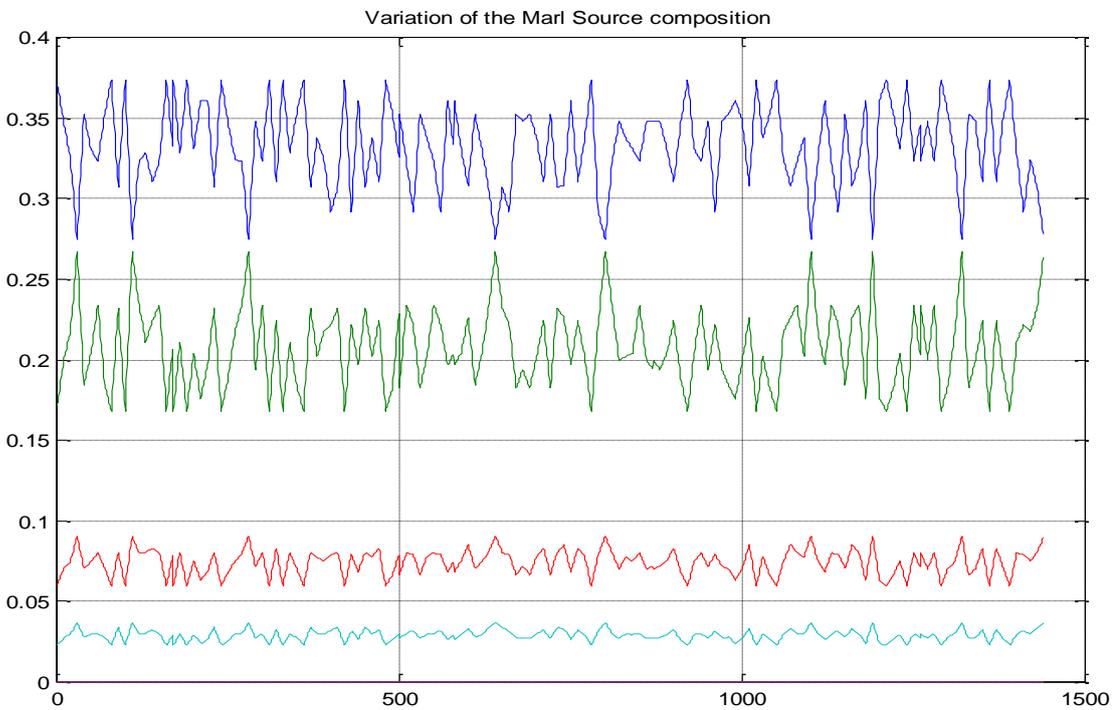


Figura 147. Evolución de la composición de la Marga en el Experimento 2 del Escenario 2

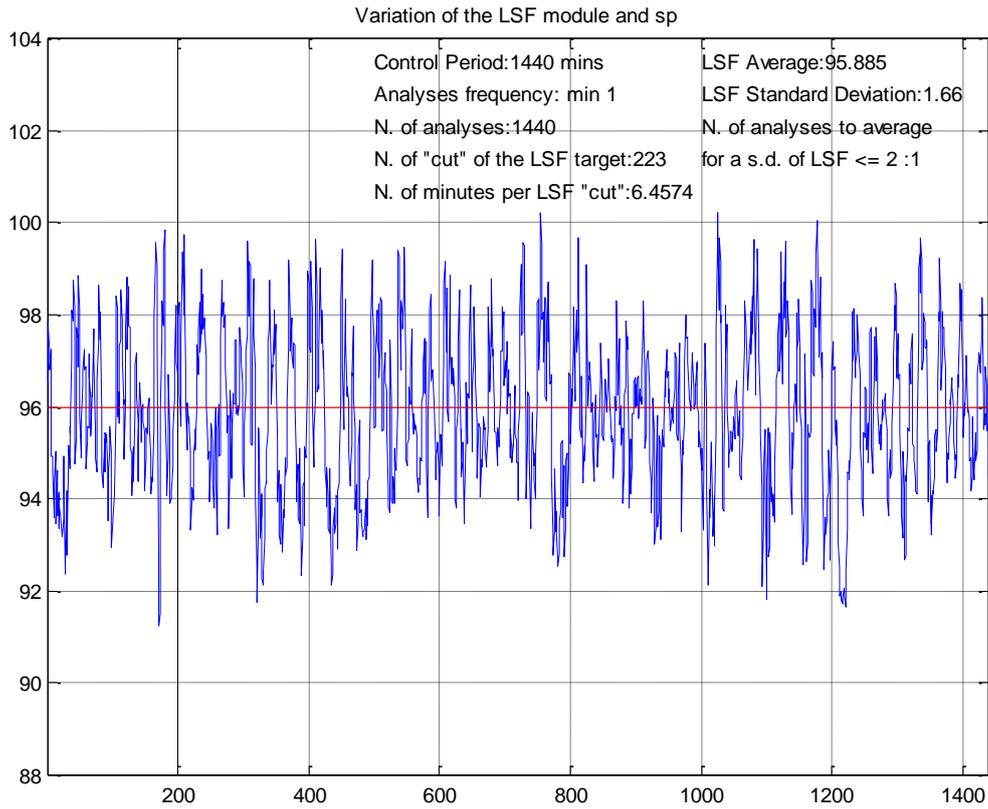


Figura 148. Evolución de LSF e índices de rendimiento en el Experimento 2 del Escenario 2

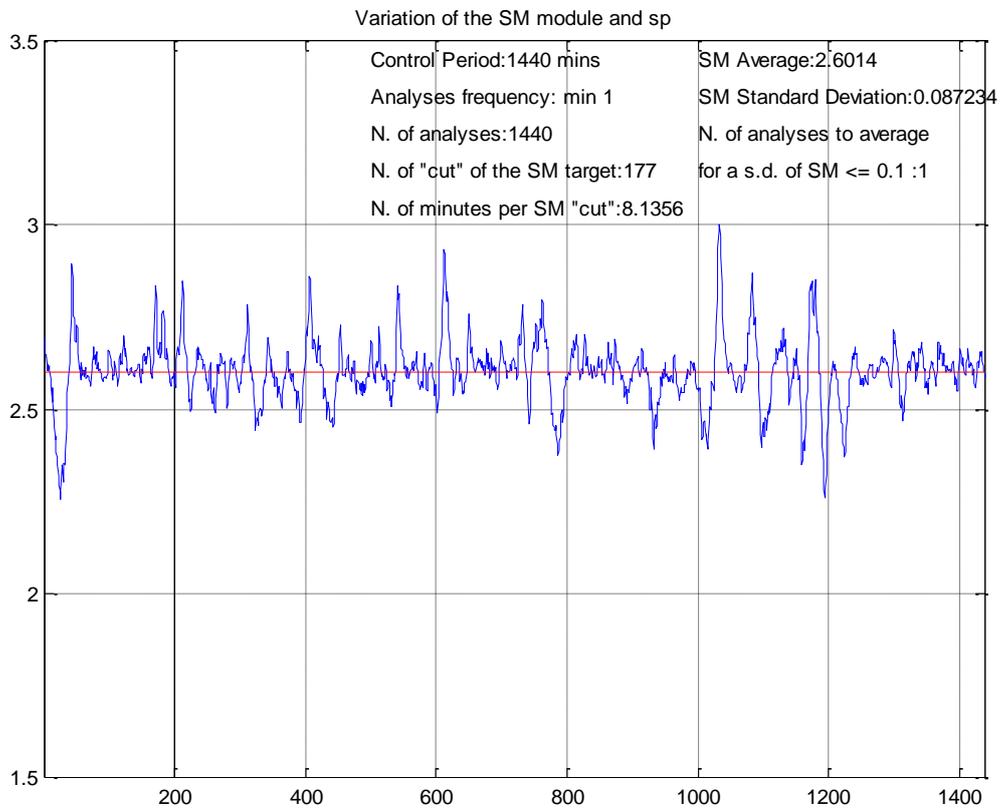


Figura 149. Evolución de SM e índices de rendimiento en el Experimento 2 del Escenario 2

6.5.5 Análisis de los resultados

La Tabla 14 presenta los índices de rendimiento de LSF obtenidos en la aplicación real de control de LSF en planta, Figura 134, y los índices obtenidos para los experimentos simulados de control con MAC de los dos escenarios antes referidos.

Índice	Experimentos			
	PID en Planta	Escenario 1	Escenario 2.1	Escenario 2.2
Duración	3 horas	190 min	190 min	24 horas
Período de Análisis = Período de Control	1 min	1 min	1 min	1 min
Nº de Análisis	171	190	190	1440
Nº de Cortes al setpoint	28	32	28	223
Nº de Minutos por Corte	6.1 min	5.94 min	6.7 min	6.45 min
Media de LSF	96.1	95.98	95.83	95.89
D.E de LSF	5.4	1.31	1.68	1.66
Nº de análisis a promediar para obtener una desviación estándar de $LSF < 2$	7	1	1	1

Tabla 14. Índices de rendimiento del control de LSF

En los experimentos simulados de control con MAC, se puede observar que:

- La desviación estándar de LSF es, en todos los casos, menor que 2, teniendo en cuenta todos los análisis en sí mismos, es decir, sin tener que promediar más de un análisis para el cálculo de este valor.

- La desviación estándar para el experimento del escenario 1 (1.31) es menor que la que se obtiene en los experimentos del escenario 2 (1.68 y 1.66), lo cual es lógico, ya que en este escenario 2 la variabilidad de los materiales es mayor.
- La media de LSF está, en todos los casos, muy próxima al valor de la consigna. La diferencia en el experimento del escenario 1 es menor que 0.05, y en los del escenario 2 es menor que 0.2
- El número de minutos (análisis) por corte está entre 5 y 7.

La siguiente Tabla 15 presenta los mismos índices de rendimiento previamente considerados, pero en relación al SM, para los experimentos simulados de control con MAC de los dos escenarios antes referidos.

Índice	Experimentos		
	Escenario 1	Escenario 2.1	Escenario 2.2
Duración	190 min	190 min	24 horas
Período de Análisis = Período de Control	1 min	1 min	1 min
Nº de Análisis	190	190	1440
Nº de Cortes al setpoint	31	27	177
Nº de Minutos por Corte	6.129	7.03	8.13
Media de SM	2.59	2.60	2.60
D.E de LSF	0.045	0.09	0.087
Nº de análisis a promediar para obtener una desviación estándar de SM < 0.1	1	1	1

Tabla 53. Índices de rendimiento del control de SM

Se puede observar que:

- La desviación estándar de SM es, en todos los casos, menor que 0.1, teniendo en cuenta todos los análisis en sí mismos, es decir, sin tener que promediar más de un análisis para el cálculo de este valor.
- La desviación estándar para el experimento del escenario 1 (0.45) es menor que la que se obtiene en los experimentos del escenario 2 (0.09 y 0.0871), lo cual es lógico, ya que en este escenario 2 la variabilidad de los materiales es mayor.
- La diferencia entre la media de SM y su consigna está en todos los casos por debajo de 0.02.
- El número de minutos (análisis) por corte está entre 6 y 9.

Por tanto, de este análisis de los resultados de la aplicación de MAC a esta simulación del proceso de mezcla, con datos de planta de las composiciones que presentaban cambios drásticos en las calizas y las margas, con elevados niveles de ruido de medida y de proceso, se puede decir que, de acuerdo a los objetivos de esta tesis, sin ningún conocimiento de la composición de las calizas, margas y arena, ni de sus cambios, MAC ha sido capaz de obtener un control preciso y robusto de LSF y SM en la mezcla. Además, las desviaciones estándar de LSF y SM han sido inferiores a 2 y 0.1, respectivamente, sin necesidad de promediar ningún análisis para la obtención de estos resultados. Asimismo, la diferencia entre las medias de LSF y SM y sus consignas, ha sido inferior a 0.2 y 0.02, y el número de minutos por corte, menor de 7 y 9, respectivamente.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Los sistemas de control del proceso de mezcla de materiales han tenido siempre la problemática de enfrentarse a una dinámica multivariable, interactiva, no lineal, desconocida y variable con el tiempo, que tiene su origen fundamentalmente en las composiciones químicas desconocidas y variables con el tiempo de los alimentadores. A esta complejidad, se añade la presencia de retardos, ruidos medida y de proceso, que hacen del control de la mezcla de materiales un auténtico desafío.

Las soluciones aplicadas industrialmente hasta ahora tratan de acotar parcialmente el problema de la dinámica variable en el tiempo partiendo de una identificación de las composiciones de la alimentadores presentes en el proceso de mezcla, la cual es aceptable sólo en ocasiones, ocurriendo muy frecuentemente que al cabo de unos pocos ciclos de control dicha estimación se desvirtúa totalmente, requiriendo de nuevo reajuste, y usando un controlador PID para compensar la desviación, lo cual constituye una solución precaria debido a las limitaciones inherentes a los parámetros fijos del control PID.

Por otro lado, la metodología de control AP ha sido aplicada en numerosas ocasiones por Juan M. Martín Sánchez en diferentes procesos componentes de la fabricación del cemento, como el control del horno o los molinos, en donde la capacidad de adaptación de esta tecnología es la piedra angular de la identificación de las diferentes dinámicas cambiantes, que da lugar al control optimizado y satisfactorio de estos procesos. Sin embargo, hasta ahora, ni la metodología AP ni su extensión ADEX, habían sido aplicadas como parte del sistema de mezcla de materiales del cemento.

La presente tesis doctoral describe el nuevo sistema de control de la mezcla adaptativo, basado en control optimizado adaptativo, y lo aplica en particular al proceso de mezcla de materiales en la industria el cemento, generando así el *Mix ADEX Controller*, MAC, si bien, su aplicación es válida para procesos de mezcla de materiales en cualquier sector de la industria.

El nuevo sistema de control de la mezcla no está basado en la estimación de la composición de las fuentes, a diferencia del estado de la técnica anterior, sino

únicamente en un conocimiento genérico de los distintos tipos de material. Establece una correspondencia compuesto-módulo biunívoca entre los compuestos que determinan el valor de los módulos de calidad en la mezcla y estos últimos; define los conceptos de fuente de compuesto y fuente del módulo, y utiliza un esquema de control adaptativo predictivo (ADEX) para calcular un conjunto de señales de control avanzado, definidas como porcentajes de caudal de cada fuente de compuesto contenidos en las correspondientes fuentes de módulo. A partir de dichas señales de control avanzado se determinan con facilidad los caudales a aplicar a cada uno de los alimentadores.

De esta forma, el nuevo sistema de control de la mezcla de materiales permite alcanzar un control preciso y robusto de la calidad en el proceso de mezcla, a pesar de cambios aleatorios e incluso discontinuos de las composiciones de los materiales que intervienen. Asimismo, esta solución, que no presenta limitaciones metodológicas con relación al número de alimentadores del proceso de mezcla, permite diagnosticar deficiencias en la composición de los materiales que se mezclan para alcanzar las consignas de los módulos de calidad. Adicionalmente, cuando una deficiencia es diagnosticada, la nueva solución permite la utilización en la medida de lo necesario de alimentadores correctivos que suministran materiales de mayor coste, pero capaces de corregir la mencionada deficiencia. De esta manera, puede optimizarse el uso de los materiales disponibles y garantizar la calidad deseada en el proceso de mezcla.

Basándose en una extensa comprobación en simulación, se ha definido el diseño final de la nueva solución y su metodología de aplicación. La validez, precisión y robustez de este tipo de solución, confirmada en la extensa comprobación llevada a cabo en la presente tesis, augura una importante repercusión de la misma, con gran interés tecnológico e industrial, en especial, por el alcance del desarrollo llevado a cabo, en el área de la fabricación de cemento, en donde es directamente aplicable la solución propuesta, no solo a la mezcla de materias primas, sino también al proceso de premezcla, al considerarse éste un caso particular de mezcla con dos fuente de compuesto que sólo pretende controlar un módulo de calidad. En futuros desarrollos

se espera aplicar la metodología a otros procesos industriales de especial interés, como el proceso de mezcla en la industria del carbón o el proceso de fabricación de materiales termoplásticos a partir de una mezcla de cauchos, petróleos y polipropilenos.

BIBLIOGRAFÍA

ADEXCOP v.1. (2015). *User Manual*.

Alwadie, A., Ying, H. & Shah, H. (2003). A practical two-input two-output Takagi-Sugeno fuzzy controller. *International Journal of Fuzzy Systems*, 5, págs. 123-130.

Álvarez, R. (2005). *Métodos de Trituración, Molienda y Clasificación*. Fundación Gómez Pardo.

Aström, K., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. Research Triangle Park: Instrumentation, Systems and Automatic Society.

Bányász, C, Kevicsky, L. & Vajk, I. (2003). A novel adaptive control system for raw material blending. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol 23, no.1, págs. 87-96.

Bavdaz, G, & Kocijan, J. (2007). Fuzzy controller for cement raw material blending process in cement industry. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol 29, no. 1, págs, 17-34.

Berg, J.L. (1999). High Frequency Blend Control. *World Cement*, págs. 1-5.

Bittanti, S., Franchini, A., Lovera, M. & Manigrasso, R. (1997). Adaptive control of raw material mix in cement plants, *Control of industrial systems, Control for the Future of the Youth, Proceedings, volumen from the IFAC Conference*, 1269-74.

Bond, J., Coursaux, R. & Worthington, R. (2000) Blending Systems and Control Technologies for Cement Raw Materials. *IEEE Industry Applications Magazine*, págs. 49-59.

Bristol, E.H. (1966). On a new measure of interactions for multivariable process control. *IEEE Trans. Autom. AC-11*, 133-134.

CB OmniTM Online Elemental Analyzer (2015).

<http://thermoscientific.com/en/product/cb-omni-online-elemental-analyzer-2.html>

Ceballos, F.J. (2008). *Visual C++, Programación Avanzada en Win32*. Editorial RA-MA.

Ceballos, F.J. (2007). *Programación orientada a objetos con C++, 4ª Edición*. Editorial RA-MA.

Ceballos: Programación orientada a objetos con C++ 4Ed

Clarke, D., Mohtadi, C. & Tuffs, P. (1987). Generalized Predictive Control – Part I. The basic algorithm and Part II. Extensions and interpretations. *Automatica*. 23(2), 149-160.

DeGroot, M. & Schervish, M. (2014). *Probability and statistics*, 4th edition. Harlow, Essex. Pearson Education Limited

García, L. (2007). *Ciencia de Materiales*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

Glorieux, G., Lanz, V. & Woodward, R. (1990). Operating Experience with On-line Analyzer for Automatic Raw Mix Control in a Belgium Cement Plant. *IEEE Cement Industry Technical Conference*, págs 187-205.

Gomá, F. (1979). *El Cemento Portland y otros Aglomerantes*. Editores Técnicos Asociados, S.A.

Gottfried, B. (2010). *Programación en C*. 2ª Edición. McGraw-Hill Interamericana.

Herrera, J. (2005). *Métodos de Explotación*. Fundación Gómez Pardo.

Jacobs, R. & Regis, S. (2006). Automated cement plant quality control: in-situ versus extractive sampling and instrumentation. *IEEE Industry Applications Magazine*, Marzo/Abril 2006, págs. 21-28.

Klema, V. & Laub, A. (1980). The singular value decomposition: Its computation and some applications. *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol AC-25, no. 2, págs. 164-176.

Landau, I.D. (1973). Design of model reference adaptive systems using the positivity concept. *Proc. 3rd IFAC Symposium on Sensitivity, Adaptivity and Optimality*, Ischia, Italy; 307-314.

Leetham, D. (2008). Online Stockpile Analysis, *World Cement*.

Luyben, W. (1990). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers, second edition*. McGraw-Hill.

The Mathworks, Inc. (2015). *Matlab[®] Primer*.

Martín-Sánchez, J.M. (1974). *Contribución a los sistemas adaptativos con modelo de referencia a partir de la teoría de la hiperestabilidad*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.

Martín-Sánchez, J. (1976). A new solution to adaptive control. *Proceedings of the IEEE Vol. 64*, pp. 1209-1218.

Martín-Sánchez, J. (1977). Reply to comments on “A new solution to adaptive control”. *Proc. of IEEE Vol. 65*, pp. 587-588.

Martín-Sánchez, J.M. (1980). *Adaptive Predictive Control System*. European Patent No. 0037579.

Martín-Sánchez, J.M., Shah, S.L. (1984). Multivariable adaptive predictive control of a binary distillation column. *Automatica*; 20:607-620.

Martín-Sánchez, J.M. & Rodellar, J. (1996). *Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization*. Prentice Hall International.

Martín-Sánchez, J.M. (2000). *Adaptive Predictive Expert Control System*. International Patent Application n° PCT/US00/17836

Martín-Sánchez, J.M. & Rodellar, J. (2005). *Control Adaptativo Predictivo Experto. Metodología, Diseño y Aplicación*. Madrid: UNED.

Martín-Sánchez, J.M. (2012). Editorial: Special Issue on Industrial Optimized Adaptive Control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing.*, 26 (10): 879-880.

Martín-Sánchez, J.M., Lemos, J.M. & Rodellar, (2012). Survey of Industrial Optimized Adaptive Control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing.*, 26 (10).

Martín-Sánchez, J.M. & Rodellar, J. (2015). *ADEX Optimized Adaptive Controllers and Systems. From Research to Industrial Practice*. Springer.

Mohamed A. & Hesham I. (2010). Variation of feed chemical composition and Its Effect on Clinker Formation – Simulation Process. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, Vol II, WCECS 2010, October 20-22. San Francisco, California.

Muteki, K., MacGregor, J. & Ueda, T. (2007). Mixtures designs and models for the simultaneous selection of ingredients and their ratios. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 86, no. 1, pp. 17–25.

Nevado, A., Cabrera, P. & Martín-Sánchez, J.M. (2014). *Conceptos básicos de filtrado, estimación e identificación*. Madrid: UNED.

Ogata, K. (1995). *Discrete-Time Control Systems (2nd Edition)*. Prentice Hall

Oliveira, V., Amrhein, M & Karimi, A. (2011). Robust gain-scheduled blending control of raw-mix quality in cement industries. *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, págs. 4189-4194.

Olsen, D., Goli, S., Faulkner, D. & McKane, Aimee (2010). *Opportunities for energy efficiency and demand response in the California cement industry*, LBNL-4849E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.

Özsoy, C., Kural, A., Çetinkaya, M. & Ertug, S. (1999). Constrained MIMO self-tuning composition control in cement industry. *Proceedings 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Vol 2, págs. 1021-1028.

Patterson, R. (1998). Automating raw mix control using multifunctional software. *IEEE Cement Industry Technical Conference*, págs. 4189-4194.

Peña, D.(2008). *Fundamentos de Estadística*, 2ª Edición. Ed. Alianza Editorial, S.A.

QCX/BlendExpert (2015). *Features and Optimising*

<http://flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Laboratory+Solutions/Quality+Control+Software/Mix+Optimization++General/QCX+BlendExpert>

Riesco, F.J. & Martín-Sánchez, J.M. (2009). *Método de Control Avanzado para la Mezcla de Materiales. Patente Española n° 2307383 B1*.

- Riesco, J., Mur, F. & Martín-Sánchez, J.M. (2005). Control avanzado para la mezcla de materiales en la industria del cemento. *I Seminario de aplicaciones industriales de control avanzado -SAICA*.
- Shinskey, F. G. (1996). *Process Control Systems*, 4th ed., New York. McGraw-Hill.
- Stroustrup, B. (2013). *The C++ programming language*, 4th edition. Addison-Wesley.
- Swain, A.K. (1995). Material Mix Control in Plant Automation. *IEEE Control Systems Magazine*, vol 15, págs. 23-27.
- Tokkesdal, S. & Kemmerer, J. (2001). Raw mix control: QCX/Blend Expert. *World Cement*, págs. 81-85.
- Tran, K-C., Nguyen, V. & Martín Sánchez, J. (2000) Optimisation of Kiln-Feed Quality. *World Cement*. Agosto 2000, págs. 75-77.
- Tsamatsoulis, D. (2005). Development and Application of a Cement Raw Meal Controller. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, págs. 7164-7174.
- Tsamatsoulis, D. (2009). Dynamic Behavior of Closed Grinding Systems and Effective PID Parameterization. *WSEAS Transactions on Systems and Control.*, Vol. 4, págs. 581-602.
- Tsamatsoulis, D. (2011). Effective Optimization of the Control System for the Cement Raw Meal Mixing Process. Optimizing Robust PID Controllers using Real Process Simulators. *WSEAS Transactions on Systems and Control.*, Vol. 6, págs. 276-278.
- Tsamatsoulis, D. (2014). Modelling and Simulation of raw material blending process in cement raw mix milling installations. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol 92, Issue 11, págs 1882-1894.
- Xiaoping, R, Yun, L. & Yonggui, D. (1996). Application of expert control technique in raw mixing of cement. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, págs. 829-833.
- Zanabria, C. (2008) Análisis in situ de la cantera de caliza usando análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos, *Rev. Soc. Química Perú*. págs. 332-342.

Weiss, J & Gartner, E. (1986). New Control Strategies for Raw Mix Preparation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol IA-22. No 2. Marzo/Abril 1986, págs. 324-329.

Whitacre, J., Schellenberg, S., & Iorio, A. (2014). *Coal Blending: Business Value, Analysis, and Optimization*. Technical Report. Other Computer Science, Cornell University.

ANEXO 1

PATENTE DEL MÉTODO DE CONTROL AVANZADO PARA LA MEZCLA DE MATERIALES



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 307 383**

② Número de solicitud: 200601238

⑤ Int. CL:
G05B 13/00 (2006.01)
B01F 13/10 (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

⑲ Fecha de presentación: **12.05.2006**

⑳ Fecha de publicación de la solicitud: **16.11.2008**

Fecha de la concesión: **09.09.2009**

㉑ Fecha de anuncio de la concesión: **22.09.2009**

㉒ Fecha de publicación del folleto de la patente:
22.09.2009

㉓ Titular/es: **ADAPTIVE PREDICTIVE EXPERT
CONTROL ADEX S.L.
Plaza Valle de la Jarosa, nº 77
28035 Madrid, ES**

㉔ Inventor/es: **Riesco Ruiz, Francisco Javier y
Martín Sánchez, Juan Manuel**

㉕ Agente: **Aiesci Naranjo, Paola**

㉖ Título: **Método de control avanzado para la mezcla de materiales.**

㉗ Resumen:

Método de control avanzado para la mezcla de materiales de la presente invención determina, usando medidas periódicas de la composición de la mezcla y lazos de control avanzado, la dosificación de los alimentadores del proceso de mezcla. Dichos alimentadores son agrupados en fuentes de los compuestos que definen los módulos de calidad de la mezcla; dichas fuentes de compuestos son asimismo agrupadas en fuentes de los distintos módulos de calidad considerados, y dichos lazos de control avanzado producen, para los distintos módulos de calidad, señales de control avanzado definidas como porcentajes de caudal de una fuente de compuesto contenido en el caudal de una fuente de módulo. A partir de dichas señales de control avanzado se determina la dosificación de los alimentadores del proceso de mezcla.

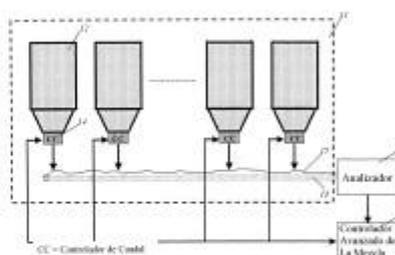


Fig. 1

ES 2 307 383 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. Pº de la Castellana, 75 - 28071 Madrid

ES 2 307 383 B1

DESCRIPCIÓN

Método de control avanzado para la mezcla de materiales.

5 **Campo de la invención**

La presente invención concierne a un método para el control avanzado del proceso de mezcla de materiales con composiciones conocidas o desconocidas procedentes de distintas fuentes.

10 **Estado de la técnica**

El proceso de mezcla de materiales es típico de ciertas industrias tales como la del cemento, la petroquímica, la de la energía y otras. Los materiales procedentes de distintos alimentadores son dosificados con el fin de conseguir que ciertos índices o módulos de calidad de la composición de la mezcla alcancen y se mantengan en valores deseados. Dichos módulos de calidad son función del porcentaje de ciertos compuestos contenidos en la mezcla. Dichos compuestos están contenidos en los diferentes materiales que se mezclan, aunque en proporciones diferentes para cada uno de ellos. Utilizando un analizador en línea se obtiene periódicamente una medida de los porcentajes de dichos compuestos en la mezcla, a partir de la cual el sistema de control de la mezcla debe de calcular los caudales a obtener de cada uno de los alimentadores. Generalmente, el sistema de control de la mezcla envía dichos caudales calculados como consignas a los correspondientes controladores locales de caudal de cada uno de los alimentadores.

El problema de determinar el caudal de cada uno de los alimentadores para conseguir el valor deseado de los módulos de calidad de la composición de la mezcla, sería relativamente fácil de resolver si conociéramos con precisión la composición del material en cada uno de los alimentadores. Sin embargo, la composición de dichos materiales es generalmente desconocida y varía con el tiempo de forma aleatoria e incluso discontinua. Por otra parte, los módulos de calidad son funciones no lineales del porcentaje de dichos compuestos en la mezcla, lo que adicionalmente complica el problema de control.

A título de ejemplo, en la industria del cemento, se mezclan materiales tales como caliza, arena, marga, pirita y otros, que contienen, en distintas proporciones cada uno de ellos, óxidos de calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe). Los módulos de calidad más utilizados son generalmente el Factor de Saturación de Cal (LSF), el Módulo de Silicio (SM) y el Módulo de hierro (IM), que se definen por medio de ecuaciones tales como:

$$LSF = 100CaO / (2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35 Fe_2O_3) \quad (1)$$

$$SM = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (2)$$

$$IM = Al_2O_3 / Fe_2O_3 \quad (3)$$

Donde la fórmula de los óxidos indica su concentración en la mezcla. Alternativamente, otros módulos de calidad pueden ser utilizados tales como:

$$C_3S = 4.071 CaO - (7.602 SiO_2 + 6.718 Al_2O_3 + 1.43 Fe_2O_3 + 2.852 SO_3) \quad (4)$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.692 Fe_2O_3 \quad (5)$$

Cuando los módulos C_3S y C_3A son utilizados reemplazan a LSF e IM, respectivamente.

Modernos analizadores, basados en rayos gamma y en rayos X, se utilizan actualmente en la industria del cemento para obtener medidas en línea de los porcentajes de dichos óxidos en la mezcla con periodos que pueden oscilar entre uno y quince minutos. A partir de estos porcentajes medidos se calculan los valores de los correspondientes módulos de calidad, que el sistema de control de la mezcla debe de utilizar para calcular los caudales a aplicar a los distintos alimentadores de los materiales que se mezclan.

Sin embargo, el proceso de la mezcla de materiales en la industria del cemento es de naturaleza compleja, porque los materiales que se mezclan, procedentes de minas y canteras, tienen composiciones desconocidas y variables con el tiempo y en muchos casos el proceso de mezcla opera con tiempos muertos de transporte. Por lo tanto, la relación dinámica entre los caudales aplicados a los distintos alimentadores y los módulos de calidad obtenidos en la composición de la mezcla, es de naturaleza multivariable, interactiva, no lineal, desconocida y variable con el tiempo.

El ejemplo previamente descrito de la industria del cemento, ilustra asimismo la naturaleza dinámica del proceso de mezcla en otras industrias. Debido a dicha naturaleza dinámica, las soluciones de control tradicionales han sido incapaces de proporcionar una solución satisfactoria, y se han utilizado técnicas avanzadas con resultados no plenamente satisfactorios.

En dichas técnicas avanzadas, las medidas de la composición de la mezcla, proporcionadas por el analizador, se combinan con los caudales de los alimentadores para estimar las composiciones de los materiales en los alimentadores. Utilizando esta estimación y las consignas de los módulos de calidad de la composición de la mezcla, se calculan los

ES 2 307 383 B1

nuevos caudales de los alimentadores, de forma que los valores predichos de los módulos de calidad sean tan próximos como sea posible a sus consignas. Sin embargo, debido a errores en la estimación de la composición de los materiales en los alimentadores, los valores predichos en general no coinciden con los de consigna. Para compensar estos errores, se han utilizado controladores PID tradicionales o sistemas basados en reglas, de forma que a partir de las diferencias entre las medidas de los módulos de calidad y sus consignas, se generan señales de control actuando sobre consignas auxiliares de los módulos de calidad que son utilizadas por el esquema predictivo. Sin embargo, este tipo de esquema de control para el proceso de mezcla de materiales, variable con el tiempo y de características no lineales, es difícil de estabilizar con controladores PID o sistemas basados en reglas. Por tanto, sigue existiendo la necesidad de un sistema y un método para controlar de forma plenamente satisfactoria la dosificación de los alimentadores en el proceso de mezcla.

Breve descripción de la invención

El método de control avanzado para el proceso de mezcla, objeto de esta invención, utiliza un ordenador digital, o cualquier otro sistema o medio de cálculo adecuado, para determinar, a partir de las medidas periódicas de la composición de la mezcla generadas por un analizador en línea, la dosificación de los alimentadores del proceso de mezcla, superando los problemas de técnicas previas y obteniendo un control preciso y estable de los módulos de calidad en la composición de la mezcla, a pesar de la naturaleza compleja de este tipo de proceso.

El método de la presente invención puede aplicarse a procesos de mezcla con un número ilimitado de alimentadores. Cada uno de estos alimentadores es considerado, teniendo en cuenta la procedencia y el tipo de material que contiene, como suministrador de uno de los compuestos que se consideran en el cálculo de los módulos de calidad de la mezcla. El que un alimentador se considere como suministrador de un cierto compuesto no implica que este sea mayoritario en el material del alimentador, ni tampoco que dicho material no contenga otros compuestos que afectan a la calidad de la mezcla, pero sí indica que el material de dicho alimentador debe utilizarse para conseguir que el compuesto en cuestión se encuentre en el porcentaje adecuado dentro de la mezcla para alcanzar las consignas de los módulos de calidad en la mezcla.

El método que define la presente invención esta basado en las dos definiciones siguientes:

Definición 1: El conjunto de alimentadores considerados como suministradores de un compuesto se define como la fuente de dicho compuesto.

Definición 2: El conjunto de fuentes de un compuesto consideradas para el control de un módulo de calidad se define como la fuente de dicho módulo de calidad.

El método de la presente invención puede describirse en los tres puntos siguientes:

1 - Se establece una correspondencia biunívoca entre cada uno de los módulos de calidad y un compuesto de los considerados en el cálculo de dichos módulos. Por ejemplo, dicha correspondencia puede ser tal que cuando el porcentaje de dicho compuesto aumenta en la mezcla el valor del correspondiente módulo de calidad también aumenta y, viceversa, cuando el porcentaje de dicho compuesto disminuye en la mezcla el valor del correspondiente módulo de calidad también disminuye. De acuerdo con este ejemplo de correspondencia, los procesos de mezcla aquí considerados son tales que: (1) la fuente de un compuesto tiene en general suficiente porcentaje de dicho compuesto para que en ella misma el módulo de calidad correspondiente este significativamente por encima de la consigna que se asigna a dicho módulo en la mezcla, y (2) la fuente de un módulo de calidad, excluyendo, la fuente del correspondiente compuesto, tiene en general en ella misma el correspondiente módulo de calidad significativamente por debajo de su consigna.

2 - Se utiliza un lazo de control avanzado para controlar cada uno de los módulos de calidad en cuestión. Cada uno de dichos lazos de control avanzados recibe como variable de proceso a controlar la medida del módulo de calidad, calculada periódicamente a partir de las medidas de la composición de la mezcla realizadas por el analizador en línea, y produce como señal de control avanzado el porcentaje (%) de caudal de la fuente del compuesto correspondiente al módulo de calidad contenido en el caudal de la fuente de dicho módulo de calidad. Esta señal de control avanzado es denominada abreviadamente "% de la fuente del compuesto en la del módulo".

3 - A partir de dichos % de la fuente del compuesto en la del módulo generados por los distintos lazos de control avanzados se calculan los caudales de las distintas fuentes de compuestos consideradas en el proceso de mezcla. Este cálculo es sencillo como se muestra más adelante en la descripción detallada de la invención.

El método de esta invención puede detectar una deficiencia, en la composición de una o varias de las fuentes de compuestos, cuando una de las señales de control avanzado, % de la fuente del compuesto en la del módulo, alcanza su límite inferior de 0%, o su límite superior de 100%, y a pesar de ello el correspondiente módulo de calidad se mantiene alejado de su consigna. En estas condiciones el sistema y método de esta invención produce un diagnóstico de deficiencia y calcula, en caso de existir uno o varios "alimentadores correctivos" con material capaz de corregir la mencionada deficiencia, una consigna de caudal para dichos uno o varios alimentadores correctivos con el fin de que el módulo en cuestión alcance su consigna. Los alimentadores correctivos son solo utilizados en estas condiciones y en tanto que se requieran para que el módulo de calidad en cuestión se mantenga en su consigna. El diagnóstico de deficiencia se mantendrá en tanto que se utilice un alimentador correctivo.

ES 2 307 383 B1

El método de esta invención determina pues la consigna de caudal de las distintas fuentes de los compuestos del proceso de mezcla y permite su distribución libremente entre los correspondientes alimentadores. En caso de existir un diagnóstico de deficiencia en una de dichas fuentes, la mencionada consigna se divide en dos, una que se distribuirá entre los alimentadores no correctivos y, otra, que se distribuirá entre los alimentadores correctivos. Dicha distribución de la consigna del caudal de la fuente que corresponde a los alimentadores no correctivos puede hacerse libremente y, en general, puede ser determinada por el operador humano. La consigna del caudal de la fuente que corresponde, en su caso, a los alimentadores correctivos, puede asimismo distribuirse libremente entre los mismos.

La presente invención supera los problemas de técnicas previas, basadas en el conocimiento preciso de las composiciones de las materias primas, y obtiene un control preciso y estable de los módulos de calidad en la mezcla, sin necesidad de un conocimiento preciso de la composición de dichas materias primas, ni de su variación con el tiempo, y en presencia de ruidos de proceso, de ruidos de medida y de tiempos muertos, sin requerir ningún tipo de ajuste manual. Además, el sistema y método de la presente invención es capaz de aplicarse a procesos de mezcla con un número ilimitado de alimentadores, detectar las posibles deficiencias en las composiciones de las fuentes de los compuestos del proceso de mezcla y utilizar alimentadores correctivos, si están disponibles, únicamente en la medida que son necesarios para compensar dichas deficiencias, optimizando de esta forma la utilización de las materias primas.

Breve descripción de las figuras

Los detalles del método de la presente invención están explicados en la Descripción en Detalle de la Invención, la cual hace referencia a las siguientes figuras:

La Figura 1 es un diagrama ilustrativo de la interacción del proceso de mezcla y el sistema y método de la presente invención;

La Figura 2 es un diagrama de bloques que muestra las operaciones que el sistema o método de la presente invención ejecuta;

La Figura 3 es un ejemplo de proceso de mezcla dentro de la industria del cemento;

La Figura 4 muestra el detalle de cómo el sistema o método de la presente invención calcula, en cada instante de control k , las consignas de caudal para las distintas fuentes de un proceso de mezcla de cemento, a partir de las medidas de los módulos de calidad de la mezcla;

La Figura 5 representa un proceso de mezcla simulado, indicando la actuación sobre el mismo de ruidos de proceso y de medida, así como cambios de composición en las fuentes;

La Figura 6 representa el proceso de mezcla simulado, que pertenece a la industria del cemento y se considera en el ejemplo experimental;

La Figura 7 muestra la evolución de los módulos de calidad de LSF, SM e IM y de sus consignas en el proceso de mezcla del ejemplo experimental;

La Figura 8 es un gráfico con la evolución de las consignas de caudal generadas por el sistema y método de la presente invención para cada fuente de compuesto dentro del ejemplo experimental.

La Figura 9 muestra las variaciones aleatorias y discontinuas de los porcentajes de los compuestos en sus fuentes respectivas dentro del ejemplo experimental.

Descripción en detalle de la invención

La Figura 1 muestra un diagrama ilustrativo de la interacción del proceso de mezcla y el método de la presente invención. Debe indicarse que no se intenta que la invención se vea limitada por la siguiente descripción de su aplicación al proceso de mezcla representado en la Figura 1, y que la adaptación del sistema y del método inventados a otras representaciones de procesos de mezcla será evidente para aquellos expertos en la materia, siguiendo la explicación proporcionada de aquí en adelante. Como se muestra en la Figura 1, el proceso de mezcla 11 comprende un número variable de alimentadores 12 u otros contenedores con medios para suministrar su contenido, que son los materiales para la mezcla, a una cinta transportadora 13. El caudal de material que cada alimentador 12 suministra a la cinta transportadora 13 es regulado por un controlador de caudal 14, de forma que dicho caudal se mantiene alrededor de su consigna. La cinta transportadora 13 lleva el material mezclado 15 hasta el analizador en línea 16, que genera periódicamente medidas de la composición de la mezcla. Dicho analizador puede ser cualquiera de los que actualmente existen en el mercado, basados en el uso de rayos gamma o de rayos X o cualquier otro tipo de tecnología capaz de obtener resultados de análisis en línea satisfactorios. El analizador se comunica con el ordenador o dispositivo de cálculo 17 donde se implementa el sistema y método de control avanzado de la mezcla de la presente invención. El método de la presente invención lleva a cabo periódicamente el procesamiento de los datos obtenidos de la medida de la composición de la mezcla para calcular las consignas de caudal que deberán aplicarse a cada uno de los controladores de caudal 14. El ordenador 17 periódicamente se comunica de forma bidireccional con los controladores de

ES 2 307 383 B1

caudal 14, para enviarles dichas consignas de caudal y recibir las medidas de los caudales que realmente suministran los alimentadores 12 a la cinta transportadora 13. Dichas medidas de caudal son asimismo utilizadas por el método de la presente invención para calcular dichas consignas.

5 Como ya se ha indicado en la Breve Descripción de la Invención, el método de esta invención considera cada uno de los alimentadores del proceso de mezcla como suministradores de un compuesto que interviene en el cálculo de los módulos de calidad. Asimismo, el conjunto de alimentadores suministradores de un compuesto definen la fuente de dicho compuesto.

10 En la presente descripción consideraremos que el número de fuentes de compuestos es igual a n , cada una de estas fuentes contribuirá a la mezcla producida con un caudal, que será determinado en cada instante de control k , donde k es un entero que mide el tiempo en períodos de control.

15 El objetivo de un método de control óptimo para un proceso de mezcla es calcular los caudales de las diferentes fuentes de compuestos en cada instante de control k de manera que los módulos de calidad de la composición de la mezcla se aproximen a sus consignas en un tiempo mínimo y se mantengan en ellas a lo largo del proceso.

20 El método de esta invención define un lazo de control avanzado para cada módulo de calidad. En cada lazo de control avanzado la variable de proceso a controlar es el correspondiente módulo de calidad y la señal de control avanzado es el correspondiente % de la fuente del compuesto en la del módulo. Con el fin de facilitar el buen funcionamiento de los lazos de control avanzado puede ser conveniente determinar un tiempo de retardo adecuado entre las señales de control avanzado y sus correspondientes módulos de calidad. Ello demanda que las fuentes de compuestos incluidas en la correspondiente fuente del módulo tengan el mismo tiempo de retardo en períodos de control con respecto a las medidas del correspondiente módulo de calidad. Conociendo el valor máximo de dicho tiempo de retardo en períodos de control MR entre los alimentadores con caudal variable de dichas fuentes de compuestos, que consideraremos igual a un cierto valor entero MR, puede añadirse de forma conveniente tiempos de retardo a dichos alimentadores para que todos ellos tengan el mismo máximo tiempo de retardo MR. Para añadir en la práctica estos tiempos de retardo, bastará con retener la aplicación de la consigna de caudal calculado para cada alimentador durante su correspondiente tiempo de retardo añadido. El tiempo de retardo de un alimentador es igual al tiempo de transporte del material que el alimentador suministra, desde el alimentador hasta el analizador 16, más el tiempo de medida del analizador.

La Figura 2 ilustra las operaciones que el método de la presente invención ejecuta por medio del ordenador 17 en cada instante de control k . Estas operaciones se describen a continuación:

35 (a) En el paso 18 mostrado en la Figura 2, adquisición de la composición de la mezcla medida por el analizador en línea 16. Esta medida puede ser filtrada para obtener una mejor estimación de la composición de la mezcla.

40 (b) En el paso 19, cálculo de los módulos de calidad MC_i ($i = 1, NM$) de acuerdo con las formulas que los definen, que para cada caso concreto pueden ser distintas. Los módulos de calidad así obtenidos pueden asimismo ser filtrados si se desea.

45 (c) En el paso 20, ejecución de los lazos de control avanzado $MCLAZO_i$ ($i = 1, NM$) correspondientes a cada módulo de calidad, utilizando una herramienta software de control HSC. La aplicación de una herramienta software de control en este contexto puede llevarse a cabo de diferentes maneras que son bien conocidas para aquellos que son expertos en las tecnologías de los computadores. A título de ejemplo se crearán inicialmente los citados NM lazos utilizando la herramienta software de control. Posteriormente, en cada instante de control k , la herramienta software de control será invocada para ejecutar cada uno de los lazos después de recibir los datos apropiados. Esta ejecución puede describirse mediante el conjunto de ecuaciones:

$$50 \quad PFCMC_i(k) = HSC(MCLAZO_i, "MC_i(k)", "MCSP_i(k)", "PFCMCR_i(k-1)") \quad (i = 1, NM) \quad (6)$$

55 En cada una de las anteriores ecuaciones del conjunto (6) la herramienta software de control HSC recibe cuatro argumentos dentro del paréntesis en el segundo miembro de la ecuación y devuelve para cada lazo $MCLAZO_i$ la señal de control avanzado en el instante de control k , que aparece en el primer miembro de las ecuaciones (6). Dicha señal de control avanzado $PFCMC_i(k)$ es como ya se ha indicado el correspondiente % de la fuente de caudal del compuesto en la del módulo. El primero de los argumentos que recibe la herramienta software de control es el nombre del lazo que debe ser ejecutado $MCLAZO_i$, el segundo y el tercero son la medida del correspondiente módulo de calidad $MC_i(k)$ y su consigna $MCSP_i(k)$ en el instante de control k . El cuarto es el valor de la señal de control avanzado realmente aplicada al proceso de mezcla en el instante anterior $k-1$, $PFCMCR_i(k-1)$. Para calcular este cuarto argumento, el sistema y método de la presente invención puede utilizar la medida de los caudales reales de las fuentes de los compuestos que el ordenador 17 adquiere en su comunicación con los controladores de caudal 14. Diferentes tipos de herramientas software de control pueden ser utilizadas en la presente invención, incluyendo controladores basados en las técnicas tradicionales de control proporcional, integral y derivativo (PID), controladores inteligentes, de lógica difusa o expertos, controladores basados en redes neuronales, controladores adaptativos con modelo de referencia, controladores auto-ajustables y sistemas de control adaptativo predictivo. Estos últimos son bien conocidos en el área de sistemas de control. Ver, por ejemplo, el libro de J.M. Martín Sánchez y J. Rodellar, *Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization*, publicado por Prentice-Hall International Series in Systems and Control

ES 2 307 383 B1

Engineering, 1996. Un ejemplo de este tipo de sistema está descrito en la patente USA No. 4,197,576. Asimismo, la compañía Adaptive Predictive Expert Systems ADEX, S.L., dispone de un producto comercial que consiste en una herramienta software de control tal como la previamente descrita, que permite la aplicación de controladores adaptativos predictivos expertos, descritos en la solicitud de patente internacional PCT/IB00/01368, publicada el 4 de enero de 2001 por la World Intellectual Property Organization (WIPO). Una vez calculadas en (6) las señales de control avanzado, se aplicarán a las mismas sus límites absolutos naturales por ser señales porcentuales, es decir 0% como límite inferior y 100% como límite superior, y asimismo el límite incremental que se considere más conveniente.

(d) En el paso 21, se verificará la existencia de condiciones para emitir diagnósticos de deficiencia en la composición de una o varias fuentes de compuestos. De acuerdo con el ejemplo de correspondencia entre módulos de calidad y compuestos considerado previamente en la Breve Descripción de la Invención, dichas condiciones pueden ser las siguientes:

- 1- Una señal de control avanzado alcanza y permanece en su límite superior de 100% y, a pesar de ello, el correspondiente módulo de calidad bajo control permanece bajo su consigna y no tiende hacia ella.
- 2- Una señal de control avanzado alcanza y permanece en su límite inferior de 0% y, a pesar de ello, el correspondiente módulo de calidad bajo control permanece por encima de su consigna y no tiende hacia ella.

En el primer caso, es obvio que dicho módulo de calidad no es suficientemente alto en la correspondiente fuente del compuesto, ya que el caudal de la fuente del módulo procede enteramente (100%) de la fuente del compuesto y, sin embargo, el módulo de calidad en la mezcla no llega a alcanzar su valor de consigna. Debe recordarse que dicha fuente del compuesto debe tener un valor alto del correspondiente módulo de calidad, es decir, significativamente por encima de su consigna. Así pues en este caso el diagnóstico será "Módulo de Calidad bajo en la Fuente del Compuesto".

En el segundo caso, es obvio que dicho módulo de calidad no es suficientemente bajo en la correspondiente fuente del módulo, excluyendo la fuente del correspondiente compuesto, ya que la contribución de la fuente de dicho compuesto al caudal de la fuente de dicho módulo es nula (0%) y, sin embargo, el módulo de calidad en la mezcla permanece superior a su valor de consigna. Debe recordarse que dicha fuente del módulo excluyendo la fuente del compuesto debe tener un valor bajo del correspondiente módulo de calidad, es decir, significativamente por debajo de su consigna. Así pues en este caso el diagnóstico será "Módulo de Calidad alto en la Fuente del Módulo excluyendo la fuente del compuesto".

Las condiciones previamente descritas determinarán pues la emisión de un diagnóstico de deficiencia en la composición de al menos una de las fuentes de compuestos. En caso de que dicha fuente disponga de uno o varios alimentadores correctivos, estos serán utilizados en la medida de lo necesario para que la consigna en el correspondiente módulo de calidad sea alcanzada en la mezcla. La utilización de los alimentadores correctivos se describe más adelante en la operación (f). En tanto que un alimentador correctivo sea utilizado el correspondiente diagnóstico de deficiencia se mantendrá emitido.

(e) En el paso 22, se realizará el cálculo de las consignas de caudal de las fuentes de los compuestos. El cálculo de las señales de control avanzado según (6) impondrá NM condiciones al cálculo de las consignas de caudal para las n fuentes de compuestos. Adicionalmente, dichas consignas de caudal $SPFi(k)$ ($i = 1, n$) deberán verificar que la suma de todas ellas es igual a la consigna del caudal de mezcla producido, tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n SPFi(k) = SPM(k + MR) \quad (7)$$

donde $SPM(k + MR)$ es la consigna de caudal para la mezcla producida en el instante $k + MR$, donde MR tiene en cuenta los tiempos de retardo del proceso como ya se ha considerado previamente. A partir de las NM condiciones impuestas por las señales avanzadas de control y de la condición de la ecuación (7), las consignas de caudal para cada una de las n fuentes de compuestos serán calculadas y se les aplicarán los límites absolutos e incrementales que se consideren convenientes. Si $NM + 1$ es igual a n, el cálculo de las consignas de caudal para las fuentes de los compuestos tendrá una solución única. Si n es menor que $NM + 1$, que puede ocurrir en situaciones en las que se producen fallos en los alimentadores, no será posible conducir todos los módulos de calidad hacia sus consignas. En este caso deberá establecerse una prioridad para determinar que módulos de calidad permanecerán bajo control. Si $NM + 1$ es menor que n, los objetivos de control podrán lograrse utilizando un subconjunto de las fuentes de los compuestos. En este caso se deberá elegir que fuentes de compuestos utilizamos para obtener los objetivos de calidad en la mezcla.

El cálculo de las consignas del caudal de las fuentes de los compuestos, a partir de las condiciones (6) y (7), es sencillo y se describe en detalle más adelante en esta memoria utilizando un ejemplo ilustrativo de proceso de mezcla en el área de la producción de cemento.

Cuando el caudal de una fuente no está bajo control automático preciso y puede presentar cambios aleatorios y discontinuos, esta fuente puede ser seleccionada como fuente conductora. En este caso el sistema y método de

ES 2 307 383 B1

la presente invención puede calcular las consignas de los caudales de las otras fuentes a partir únicamente de las condiciones (6), realizando este cálculo considerando que la consigna para el caudal de la fuente conductora es el valor medido de dicho caudal. En este modo de funcionamiento, el cálculo de las consignas de las otras fuentes no tendrán en cuenta (7), por lo que se amoldarán al caudal de la fuente conductora para mantener los módulos de calidad de la mezcla en sus consignas, aunque el caudal de dicha mezcla no estará bajo control automático preciso.

(f) En el paso 23 se realizará la distribución de las consignas de caudal de las distintas fuentes de compuestos entre sus respectivos alimentadores. En el caso de no detectarse ninguna condición de diagnóstico de deficiencia en las composiciones de las fuentes en la operación (d) previamente descrita, dicha distribución se realizará libremente entre los alimentadores no correctivos, con la única condición de que la suma de las consignas de caudal asignadas a los alimentadores no correctivos correspondientes a cada una de las fuentes de compuestos sea igual a la respectiva consigna de caudal de dichas fuentes de compuestos.

Cuando una de las condiciones de diagnóstico, previamente consideradas en la operación (d), se verifica sobre la composición de una de las fuentes de compuestos, si dicha fuente dispone de uno o varios alimentadores correctivos empezará a utilizarlos en la medida de lo necesario para conseguir que el correspondiente módulo de calidad alcance su consigna.

Una de las formas de utilizar el alimentador o alimentadores correctivos puede consistir en dividir la consigna de caudal calculado $SPFi(k)$ para la fuente del compuesto en cuestión en dos partes. La primera parte $SPNCFi(k)$ a aplicar a los alimentadores de la fuente de compuesto no correctivos y la segunda parte $SPCFi(k)$ a aplicar al alimentador o alimentadores correctivos. Dicha segunda parte puede corresponder a un porcentaje de la consigna del caudal calculado para la fuente del compuesto que, partiendo inicialmente de cero, puede hacerse crecer, de forma lineal con los periodos de control o de cualquier otra forma que se estime conveniente, en la medida de lo necesario para permitir que el módulo de calidad en cuestión alcance su valor de consigna. Una vez el módulo de calidad en cuestión alcanza la consigna o se mantiene en un entorno suficientemente cercano a la misma, si al mismo tiempo la correspondiente señal de control avanzado se aleja suficientemente del límite absoluto correspondiente al diagnóstico, el porcentaje de la consigna de caudal de la fuente del compuesto aplicado al alimentador o alimentadores correctivos puede hacerse decrecer con un criterio adecuado hasta volver, en su caso, al valor inicial de cero, finalizando así la utilización del alimentador o alimentadores correctivos.

En el caso en el que se esté utilizando un alimentador correctivo, las consignas de caudal $SPNCFi(k)$ ($i = 1, n$) de las distintas fuentes de compuestos, correspondientes a los alimentadores no correctivos, podrán distribuirse entre estos libremente y, en general, puede ser determinada por el operador humano, con la única condición expresada en el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{NA_i} SPA_{ij}(k) = SPNCFi(k) \quad (i = 1, n) \quad (8)$$

donde NA_i es el número de alimentadores no correctivos de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$) y $SPA_{ij}(k)$ es la consigna de caudal para el alimentador j ($j = 1, NA_i$) de la fuente de compuesto i . Es decir, la suma de las consignas de los caudales de los alimentadores no correctivos de una fuente de compuesto deberá ser igual a la consigna de caudal de dicha fuente del compuesto a aplicar a los alimentadores no correctivos.

En caso de existir más de un alimentador correctivo para una determinada fuente de compuesto, la consigna de caudal $SPCFi(k)$ de dicha fuente a aplicar a los alimentadores correctivos puede distribuirse entre ellos de forma análoga a la descrita previamente para el caso de los alimentadores no correctivos.

(g) En el paso 24, se enviarán las consignas de caudal a los correspondientes controladores 14 de caudal de los alimentadores. Utilizando las consignas de caudal para los alimentadores no correctivos $SPA_{ij}(k)$ ($i = 1, n; j = 1, NA_i$), determinadas en la operación anterior, las consignas de caudal $SPCA_{ij}(k)$ ($i = 1, n; j = 1, NA_i$) a enviar en el instante k a los correspondientes controladores 14 de caudal de los alimentadores no correctivos se calculan mediante las ecuaciones:

$$SPCA_{ij}(k) = SPA_{ij}(k - RA_{ij}) \quad (i = 1, n; j = 1, NA_i) \quad (9)$$

Donde RA_{ij} representa el retardo añadido al alimentador j ($j = 1, NA_i$) de la fuente de compuesto i ($i = 1, n$). Las consignas de caudal a enviar a los controladores 14 de caudal de los alimentadores correctivos puede calcularse de forma análoga a la previamente descrita para los alimentadores no correctivos.

Un área de aplicación del método general previamente descrito para sistemas de control de procesos de mezcla es la de la producción de cemento. A continuación consideraremos un ejemplo de proceso de mezcla dentro de la industria del cemento, que nos permitirá ilustrar las características más relevantes del método y sistema general previamente descrito. El ejemplo de proceso de mezcla elegido está representado en la Figura 3 y se describe a continuación.

ES 2 307 383 B1

Los compuestos de interés en el proceso considerado que determinan la calidad de la mezcla son los óxidos de calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe). Las concentraciones de estos óxidos en la mezcla se miden con una frecuencia de un minuto, que define asimismo el período de control. De esta forma los caudales de cada una de las fuentes de los compuestos y de sus alimentadores pueden ajustarse con la frecuencia de un minuto.

Como ya se ha mencionado en el estado del arte anterior, los módulos de calidad más utilizados son generalmente el Factor de Saturación de Cal (LSF), el Módulo de Silicio (SM) y el Módulo de hierro (IM), que se definen por medio de ecuaciones tales como (1) a (3). Alternativamente, los módulos C₃S y C₃A, descritos por ecuaciones tales como (4) y (5), pueden reemplazar a LSF e IM, respectivamente.

Como se muestra en la Figura 3, el proceso de mezcla del ejemplo dispone de 8 alimentadores, que se describen a continuación:

Los alimentadores 25, 26 y 27 suministran distintos tipos de caliza con un alto contenido en CaO. Todos ellos pues son suministradores del compuesto óxido de Ca, necesario para alcanzar en la mezcla la consigna de LSF o C₃S. En consecuencia, estos tres alimentadores forman la fuente de CaO. Los alimentadores 25 y 26 son alimentadores no correctivos y el 27 es correctivo por ser de mayor contenido de CaO y tener un coste más elevado.

Los alimentadores 28 y 29 suministran distintos tipos de arena con un alto contenido en SiO₂. Los dos son pues suministradores del compuesto óxido de Si, necesario para alcanzar en la mezcla las consignas de LSF o C₃S y SM. En consecuencia, estos dos alimentadores forman la fuente de SiO₂. Ambos son alimentadores no correctivos.

Los alimentadores 30 y 31 suministran distintos tipos de marga con un cierto contenido en Al₂O₃. Los dos son pues suministradores de Al₂O₃, necesario preferentemente para alcanzar en la mezcla las consignas de SM e IM o C₃A. En consecuencia, estos dos alimentadores forman la fuente de Al₂O₃. El alimentador 30 es no correctivo. El alimentador 31 es correctivo por tener un mayor contenido de Al₂O₃ y tener un coste más elevado.

Finalmente, el alimentador 32 suministra pirita con un alto contenido en Fe₂O₃. Este alimentador es pues el suministrador de Fe₂O₃, necesario preferentemente para alcanzar en la mezcla la consigna de IM o C₃A. Este alimentador no correctivo constituye pues la fuente de Fe₂O₃.

La Figura 3 indica la pertenencia de los alimentadores a las distintas fuentes de compuestos y, asimismo, indica las fuentes de compuestos que forman las distintas fuentes de los módulos de calidad, que se describen a continuación:

La fuente del módulo de LSF está compuesta por las fuentes de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

La fuente del módulo SM está compuesta por las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

La fuente del módulo de IM está compuesta por las fuentes de Al₂O₃ y Fe₂O₃.

La aplicación de las operaciones (a) a (g), previamente descritas con la ayuda de la Figura 2, a este ejemplo ilustrativo, asumiendo que los módulos de calidad elegidos son LSF, SM e IM, se describe para cada instante de control k en las siguientes operaciones (a₁) a (g₁):

(a₁) Adquisición de las medidas de las concentraciones de CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ en la mezcla realizadas por el analizador en línea y filtrado de las mismas para obtener una mejor estimación de la composición de la mezcla.

(b₁) Cálculo del valor de los módulos de calidad en el instante k, LSF(k), SM(k) e IM(k), por medio de:

$$LSF(k) = 100 \text{ CaO}(k) / (2.8 \text{ SiO}_2(k) + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3(k) + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3(k)) \quad (10)$$

$$SM(k) = \text{SiO}_2(k) / (\text{Al}_2\text{O}_3(k) + \text{Fe}_2\text{O}_3(k)) \quad (11)$$

$$IM(k) = \text{Al}_2\text{O}_3(k) / \text{Fe}_2\text{O}_3(k) \quad (12)$$

Donde CaO(k), SiO₂(k), Al₂O₃(k) y Fe₂O₃(k), son las medidas ya filtradas de los óxidos respectivos. Si se desea, los valores de los módulos así obtenidos pueden asimismo filtrarse.

(c₁) Ejecución de los lazos de control avanzado LSFLAZO, SMLAZO e IMLAZO, correspondientes a los tres módulos de calidad, tal y como se ha descrito en la operación (e), por medio de las ecuaciones:

$$PFCLSF(k) = HSC(LSFLAZO, \text{ "LSF}(k)", \text{ "LSFSP}(k)", \text{ "PFCLSPR}(k-1)") \quad (13)$$

$$PFCSM(k) = HSC(SMLAZO, \text{ "SM}(k)", \text{ "SMSP}(k)", \text{ "PFCSMR}(k-1)") \quad (14)$$

$$PFCIM(k) = HSC(IMLAZO, \text{ "LSF}(k)", \text{ "IMSP}(k)", \text{ "PFCIMR}(k-1)") \quad (15)$$

ES 2 307 383 B1

Donde PFCLSF(k), PFCSM(k) y PFCIM(k) son los % de caudal de las fuentes de CaO, SiO₂(k) y Al₂O₃(k) contenidos en las de los módulos LSF, SM e IM, respectivamente, es decir, las señales de control avanzado producidas en el instante k por los lazos de control avanzado para los módulos LSF, SM e IM.

5 LSFSP(k), SMSPP(k) y IMSPP(k) son las consignas de los módulos LSF, SM e IM en la mezcla producida y PFCLSFR(k-1), PFCSMR(k-1) y PFCIMR(k-1) son las señales de control avanzado, correspondientes a dichos módulos, realmente aplicadas al proceso en el instante k-1. Como ya se ha indicado en la operación (c), para calcular estas últimas señales, el sistema y método de la presente invención puede utilizar la medida de los caudales reales de las fuentes de los compuestos que el ordenador 17 adquiere en su comunicación con los controladores de caudal 14.

10 (d_i) Verificación de la existencia de condiciones para emitir diagnósticos de deficiencia en la composición de una o varias fuentes de compuestos. Esta verificación se llevará a cabo tal y como se ha descrito previamente en la operación (d). Obviamente, se requerirán varios instantes de control consecutivos para comprobar que estando alguna de las señales de control avanzado en uno de sus límites, superior o inferior, el correspondiente módulo de calidad no tiende a su consigna.

15 (e_i) Cálculo de las consignas de los caudales de las fuentes de los compuestos. Las señales de control avanzado, previamente calculadas, por su propia definición, y por la elección hecha en este ejemplo ilustrativo de las fuentes de compuestos y de las fuentes de módulos, impondrán a los caudales a aplicar a cada una de las fuentes de los compuestos las siguientes condiciones:

$$PFCLSF(k) = 100 SPFCa(k) / (SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAI(k) + SPFFe(k)) \quad (16)$$

$$25 PFCSM(k) = 100 SPCFSi(k) / (SPCFSi(k) + SPCFAI(k) + SPCFFe(k)) \quad (17)$$

$$PFCIM(k) = 100 SPCFAI(k) / (SPCFAI(k) + SPCFFe(k)) \quad (18)$$

30 donde SPFCa(k), SPFSi(k), SPFAI(k) y SPFFe(k) son las consignas de los caudales de las fuentes de CaO(k), SiO₂(k), Al₂O₃(k) y Fe₂O₃(k), respectivamente.

Asimismo, la suma de las consignas de los caudales de las distintas fuentes debe ser igual a la consigna del caudal de la mezcla, lo que fue considerado previamente en la operación (e) paso 22 de esta descripción detallada de la invención por medio de la ecuación (7), que en este caso pasa a ser:

$$35 SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAI(k) + SPFFe(k) = SPM(k + MR) \quad (19)$$

40 donde SPM(k + MR) es la consigna del caudal de mezcla producida y MR es el retardo que se considere conveniente para los lazos de control avanzado. Es interesante hacer notar que el caudal de la fuente del módulo LSF es igual al caudal de la mezcla producida. A partir de las ecuaciones (16) a (19) se calculan las consignas de los caudales de las fuentes de los distintos compuestos.

45 La Figura 4 muestra el detalle de cómo se calculan, en cada instante de control k, las consignas de caudal de las distintas fuentes de CaO(k), SiO₂(k), Al₂O₃(k) y Fe₂O₃(k), a partir de las medidas de los módulos de calidad LSF(k), SM(k) e IM(k) calculadas en la operación (b_i).

50 Los pasos 33a, 33b y 33c de la Figura 4 muestran como los lazos de control avanzado LSFLAZO, SMLAZO e IMLAZO calculan las señales de control avanzado PFCLSF(k), PFCSM(k) y PFCIM(k) a partir de las correspondientes consignas LSFSP(k), SMSPP(k) y IMSPP(k) y de las señales de control avanzado realmente aplicadas en el instante k-1, PFCLSFR(k-1), PFCSMR(k-1) y PFCIMR(k-1), respectivamente, tal y como se ha descrito previamente en la operación (c_i) de este ejemplo ilustrativo.

55 A partir de las ecuaciones (16) y (19), se deduce que la consigna de caudal de la fuente de CaO, SPFCa(k), puede calcularse dividiendo la señal de control avanzada PFCLSF(k) por 100, operación realizada por el divisor 34a, y multiplicando el resultado por la consigna del caudal de la mezcla producido SPM(k + MR), operación realizada por el multiplicador 35a. Es decir:

$$60 SPFCa(k) = (PFCLSF(k) / 100) SPM(k + MR) \quad (20)$$

65 El denominador de la ecuación (17) es la consigna de caudal de la fuente del módulo SM, que puede obtenerse sustrayendo al caudal de la mezcla producida SPM(k + MR) la consigna de caudal SPFCa(k) de la fuente de CaO, operación realizada por el diferenciador 36a. En consecuencia, a partir de la ecuación (17), la consigna de caudal SPCFSi(k) de la fuente de SiO₂ puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado PFCSM(k) por 100, operación realizada por el divisor 34b, y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo SM, operación realizada por el multiplicador 35b. Es decir:

$$SPFSi(k) = (PFCSM(k) / 100) (SPM(k + MR) - SPFCa(k)) \quad (21)$$

ES 2 307 383 B1

El denominador de la ecuación (18) es la consigna de caudal de la fuente del módulo IM, que puede obtenerse sustrayendo a la consigna de caudal del módulo SM, $SPM(k + MR) - SPFCa(k)$, la consigna de caudal $SPFSi(k)$ de la fuente de SiO_2 , operación realizada por el diferenciador 36b. En consecuencia, a partir de la ecuación (18), la consigna de caudal $SPCFAl(k)$ de la fuente de Al_2O_3 puede calcularse dividiendo la señal de control avanzado $PFCIM(k)$ por 100, operación realizada por el divisor 34 c, y multiplicando el resultado por la consigna del caudal del módulo IM, operación realizada por el multiplicador 35c. Es decir:

$$SPFAI(k) = (PFCIM(k) / 100) (SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k)) \quad (22)$$

Finalmente, para calcular la consigna de caudal $SPFFe(k)$ de la fuente de Fe_2O_3 , bastará con sustraer a la consigna de caudal de la fuente del módulo de IM, $SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k)$, la consigna de caudal $SPFAI(k)$ de la fuente de Al_2O_3 , operación realizada por el diferenciador 36 c. Es decir:

$$SPFFe(k) = SPM(k + MR) - SPFCa(k) - SPFSi(k) - SPFAI(k) \quad (23)$$

Lo que concluye el cálculo de las consignas de los caudales de las fuentes de los compuestos.

Para ilustrar el modo de funcionamiento del sistema y método de la presente invención habiendo seleccionado una fuente conductora, descrito previamente en la operación (g), basta con considerar en este ejemplo del proceso de mezcla que la fuente de CaO fuera la fuente conductora. En este caso a partir de las ecuaciones (16), (17) y (18) y sustituyendo en ellas la consigna de caudal de la fuente de CaO , $SPFCaO(k)$, por su valor medido en el instante k , podríamos fácilmente calcular las correspondientes consignas de caudal de las otras fuentes, $SPFSi(k)$, $SPFAI(k)$, $SPFFe(k)$. De la misma forma podríamos proceder al considerar cualquiera de las otras fuentes como fuente conductora. En este modo de funcionamiento se mantendrán los módulos de calidad en sus consignas, aunque el caudal de la mezcla no estará bajo control automático preciso, es decir, la condición (19) no se considera.

Las operaciones (f_1) y (g_1) que realizan, para este ejemplo ilustrativo, la distribución de las consignas de caudal de las distintas fuentes de los compuestos, entre los correspondientes alimentadores no correctivos y correctivos, y envían las consignas de caudal a los controladores locales 14 de caudal de los alimentadores, se llevan a cabo tal y como se ha descrito previamente en las operaciones (f) y (g).

En el caso de que los módulos elegidos para definir la calidad deseada en la mezcla hubieran sido C_3S , SM y C_3A , el sistema o método de la presente invención se aplicaría de la forma descrita previamente para los módulos de calidad LSF , SM e IM , con las siguientes modificaciones:

En la operación (b₁) las ecuaciones (10) y (12) deberían ser sustituidas por las siguientes:

$$C_3S(k) = 4.071 CaO(k) - (7.602 SiO_2(k) + 6.718 Al_2O_3(k) + 1.43 Fe_2O_3(k) + 2.852 SO_3(k)) \quad (24)$$

$$C_3A(k) = 2.65 Al_2O_3(k) - 1.692 Fe_2O_3(k) \quad (25)$$

En la operación (c₁) las ecuaciones (13) y (15) deberían ser sustituidas por las siguientes:

$$PFCC_3S(k) = HSC(C_3SLAZO, "C_3S(k)", "C_3SSP(k)", "PFCC_3SR(k-1)") \quad (26)$$

$$PFCC_3A(k) = HSC(C_3ALAZO, "C_3A(k)", "C_3ASP(k)", "PFCC_3AR(k-1)") \quad (27)$$

Donde $PFCC_3S(k)$ y $PFCC_3A(k)$ son los % de caudal de las fuentes de CaO y $Al_2O_3(k)$ en las de los módulos C_3S y C_3A , respectivamente, es decir, las señales de control avanzado producidas en el instante k por los lazos de control avanzado para los módulos C_3S y C_3A . El resto de los argumentos que utiliza la herramienta software de control avanzado en las ecuaciones (26) y (27) tienen un significado equivalente al definido en (13) y (15) para los módulos LSF e IM .

Por último en la operación (e₁) las ecuaciones (16) y (18) deben ser sustituidas por las siguientes:

$$PFCC_3S(k) = 100 SPFCa(k) / (SPFCa(k) + SPFSi(k) + SPFAI(k) + SPFFe(k)) \quad (28)$$

$$PFCC_3A(k) = 100 SPCFAI(k) / (SPCFAI(k) + SPCFFe(k)) \quad (29)$$

ES 2 307 383 B1

Ejemplo experimental

El método de la presente invención se han utilizado para controlar una simulación de un proceso de mezcla típico representada en la Figura 5, que muestra la actuación de ruidos de proceso y de medida sobre el proceso de mezcla simulado, así como también indica la ocurrencia de cambios en la composición de los alimentadores. La Figura 6 representa el proceso de mezcla considerado. El material del alimentador 37 es una caliza, y como tal, suministrador de CaO, conteniendo un 56.1% de CaO, un 5.7% de SiO₂, un 0.83% de Al₂O₃ y un 0.31% de Fe₂O₃. En este proceso de mezcla el alimentador 37 es la fuente de CaO. El material del alimentador 38 es una arena, y como tal, suministrador de SiO₂, conteniendo un 5.2% de CaO, un 76.8% de SiO₂, un 1.5% de Al₂O₃ y un 2.1% de Fe₂O₃. En este proceso de mezcla el alimentador 38 es la fuente de SiO₂. El material del alimentador 39 es una marga y es suministrador de Al₂O₃, conteniendo un 7.2% de CaO, un 47.5% de SiO₂, un 23.6% de Al₂O₃ y un 4.9% de Fe₂O₃. Por último, el material del alimentador 40 es una pirita, como tal suministrador de Fe₂O₃, y constituye la fuente de Fe₂O₃, conteniendo un 3.2% de CaO, un 18.1% de SiO₂, un 3.5% de Al₂O₃ y un 41.7% de Fe₂O₃. La fuente de LSF esta constituida por todos los alimentadores, la fuente de SM esta constituida por los alimentadores 38 a 40 y la fuente de IM por los alimentadores 39 a 40.

La herramienta software utilizada para ejecutar esta simulación ha sido MATLAB® (de Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts) incluyendo la simulación del proceso de mezcla previamente descrito y la aplicación al mismo del sistema o método de la presente invención de acuerdo con las operaciones (a₁) a (g₁). Para la ejecución de los lazos de control avanzado en la operación (c₁) se han utilizado controladores adaptativos predictivos expertos tal como los descritos en la solicitud de patente internacional previamente mencionada PCT/IB00/01368 publicada el 4 de enero de 2001 por la WIPO. Cada ejecución del programa de MATLAB representa un instante de control.

El método de la presente invención se ha utilizado para controlar los módulos de calidad de LSF, SM e IM durante un experimento de 300 minutos de duración. Los detalles concretos de la simulación del proceso y de la aplicación del método de esta invención se describen a continuación.

1 - Caudal total de la mezcla: Se ha supuesto igual a 100 toneladas/hora.

2 - Periodo de control y periodo de análisis: Se ha supuesto el periodo de control igual al periodo de análisis. Por tanto, a partir de los caudales aplicados a las fuentes, que son entradas en el proceso simulado con MATLAB, se ha calculado un nuevo análisis de la composición de la mezcla al final de cada periodo de análisis. El sistema o método de la presente invención ha utilizado este nuevo análisis de la composición de la mezcla para calcular, e inmediatamente aplicar al proceso simulado, las nuevas consignas de caudal para las diferentes fuentes. Se ha supuesto que el periodo de análisis es de 1 minuto, que es un valor típico para un analizador en línea.

3 - Límites absolutos e incrementales: Los valores de los límites absolutos inferior y superior aplicados a las señales de control avanzado de los lazos de control avanzados han sido de 0 y 100, respectivamente, ya que éstas señales son porcentuales. Los límites incrementales se han fijado igual a 5.

4 - Ruidos de proceso: Se han añadido ruidos gaussianos a las consignas de caudal generadas por el sistema o método de la presente invención, antes de ser aplicadas al proceso de mezcla simulado. Las desviaciones estándar de estos ruidos para las fuentes de calcio, silicio, aluminio y hierro han sido, en porcentaje del caudal total, de 1.75, 0.1, 0.6 y 0.1, respectivamente. Este alto valor del nivel de ruido de proceso representa en la simulación del proceso los errores de control de los controladores de caudal locales de las diferentes fuentes.

5 - Ruidos de medida: Se han añadido ruidos gaussianos a la composición real de la mezcla calculada en el proceso de simulación. Las desviaciones estándar de estos ruidos que se añaden al porcentaje real en la mezcla de los óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro han sido 0.5, 0.41, 0.38 y 0.06, respectivamente. Este alto valor del nivel de ruido de medida representa en la simulación del proceso los errores de medida del analizador en línea.

6 - Variación aleatoria de las composiciones de los alimentadores: A partir de las composiciones iniciales de los alimentadores, mostradas en la Figura 6, los contenidos de cada uno de los óxidos se han hecho evolucionar según un "paseo aleatorio" generado mediante la integración de ruidos gaussianos. Las desviaciones estándar de estos ruidos son iguales al uno por ciento de los correspondientes valores iniciales.

7 - Cambios discontinuos de composición: Además de la variación aleatoria de las composiciones ya citada en el punto previo, en el ejemplo experimental se han simulado significativos cambios discontinuos de composición en los alimentadores. Así, el contenido en CaO del alimentador de caliza, alimentador 37, se ha cambiado discontinuamente de 58.97 a 46.10 en el instante 70, el contenido de SiO₂ en el alimentador 38 se ha variado de 76.71 a 66.82 en el instante 110 y el contenido de Al₂O₃ en el alimentador 39 se ha cambiado de 24.83 a 13.61 en el instante 150.

8 - Cambios de consigna: Se han aplicado cambios de consigna para los diferentes módulos de calidad. Así, la consigna del módulo de calidad de LSF es inicialmente 94 y se cambia a 102 en el instante 200. De la misma forma, la consigna de SM se ha cambiado de 2.6 a 2.9 en el instante 230, y la consigna de IM pasa de 1.8 a 2.0 en el instante 260.

ES 2 307 383 B1

Los resultados obtenidos en el experimento de control simulado que se acaba de describir se muestran en la Figura 7, en donde se puede observar la evolución de los módulos de calidad de LSF, SM e IM, así como la evolución de sus consignas. Las ordenadas de la Figura 7 representan los instantes de control (de 0 a 300) y las abscisas (de 0 a 11) el valor de los módulos de calidad. Los valores del módulo de LSF, línea 41, así como su consigna, línea 42, han sido divididos por 10 con el objeto de que los tres módulos puedan ser representados en la misma figura y con la misma escala. El módulo de SM es la línea 43 y su consigna la línea 44. El módulo de IM es la línea 45 y su consigna la línea 46. La Figura 8 muestra la evolución de las consignas de caudal generadas por el sistema y método de la presente invención para cada una de las fuentes durante los 300 instantes de control del experimento. En este caso, las abscisas (de 0 a 80) son valores de caudal en TPH. La línea 47 representa las consignas de caudal para la fuente de CaO; la línea 48 las de la fuente de SiO₂; la línea 49 las consignas de caudal para la fuente de Al₂O₃ y la línea 50 las de la fuente de Fe₂O₃. Por último, la Figura 9 muestra las variaciones aleatorias y discontinuas de los porcentajes de los compuestos en sus respectivas fuentes durante el ejemplo experimental. En este caso, las abscisas (de 10 a 80) indican valores porcentuales. Así, la línea 51 muestra la evolución del porcentaje de CaO en la fuente de CaO, la línea 52 se corresponde a la evolución del porcentaje de SiO₂ en la fuente de SiO₂, la línea 53 es la evolución del porcentaje de Al₂O₃ en la fuente de Al₂O₃ y la línea 54 representa la evolución del porcentaje de Fe₂O₃ en la fuente de Fe₂O₃. Es en esta Figura 9 donde se pueden observar claramente los cambios discontinuos de composición descritos anteriormente.

A pesar de los valores elevados de ruidos de proceso y de medida mostrados en la Figura 5, de los cambios aleatorios y discontinuos en las composiciones de las fuentes, mostrados en la Figura 9, y de la naturaleza fuertemente interactiva del proceso de mezcla, se ha alcanzado un control preciso y robusto de los módulos de calidad de LSF, SM e IM en la mezcla, como se puede observar en las Figura 7. Un análisis más detallado de las Figuras 7, 8 y 9 muestra que:

1 - En el instante 70, el descenso discontinuo en el porcentaje de CaO en la fuente de CaO (de 58.97 a 46.10), mostrado en la Figura 9, es compensado mediante un incremento del caudal de la fuente de CaO y una bajada simultánea en los caudales de las fuentes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, como se observa en la Figura 8. De esta forma, un cambio de composición discontinuo tan significativo como el considerado únicamente causa una desviación mínima en la evolución del módulo de LSF respecto a su consigna. Se puede observar en la Figura 7 que el módulo de LSF retorna a su valor estable de consigna en menos de 10 periodos de control, siendo su desviación máxima menor que 4 unidades.

2 - En el instante 150, la bajada discontinua en el porcentaje de Al₂O₃ en la fuente de Al₂O₃ (de 24.83 a 13.60), mostrado en la Figura 9, provoca un aumento instantáneo en el módulo de SM y una bajada instantánea en el módulo de IM. Como se ve en la Figura 7, ambos vuelven a sus valores estables de consigna en menos de 25 periodos de control para el SM, y 15 para el IM. La mayor desviación en el valor de SM está por debajo de 0.4 y para el valor de IM es menor que 0.2. Esta compensación eficaz frente a un cambio de composición tan significativo se ha conseguido aumentando el caudal de la fuente de Al₂O₃ y disminuyendo a la vez los caudales de las fuentes de SiO₂ y Fe₂O₃, como muestra la Figura 8.

3 - El cambio discontinuo en el porcentaje de SiO₂ en la fuente de SiO₂ (de 76.71 a 66.82), mostrado en la Figura 9 en el instante de control 110, es compensado con facilidad por el método de la presente invención, de forma que su efecto apenas se nota en la evolución de los módulos de LSF, SM e IM.

Cuantitativamente, las desviaciones estándar del LSF, SM e IM, calculadas en el intervalo de los 200 primeros instantes de control en los cuales las consignas permanecen constantes, resultan ser 0.69, 0.074 y 0.035, respectivamente. Por otro lado, las medias para el LSF, SM e IM en el mismo intervalo son de 94.00, 2.62 y 1.79, valores que difieren de las correspondientes consignas en menos de 0.01, 0.03 y 0.01, respectivamente.

Además, y como se muestra en la Figura 7, cuando ocurre un cambio de consigna en uno de los módulos de calidad, los otros dos no muestran desviaciones significativas respecto a sus consignas, a pesar de la naturaleza fuertemente interactiva del proceso. Las consignas de caudal de las fuentes se modifican apropiadamente por el sistema o método de la presente invención para compensar esta interacción a la vez que se conduce al módulo de calidad correspondiente hacia su consigna.

Otras formulaciones, aplicaciones o modificaciones de la presente invención pueden ocurrirseles a los conocedores de esta área tecnológica a partir de la presente exposición. Por lo que el alcance de la invención queda únicamente limitado por las reivindicaciones que siguen, que consideran todas aquellas otras formulaciones o modificaciones cuando se contemplan con la descripción previa y los dibujos que la acompañan.

ES 2 307 383 B1

REIVINDICACIONES

1. Un método de control avanzado para la mezcla de materiales para generar las consignas a aplicar a los controladores de caudal de los alimentadores en un proceso de mezcla en una pluralidad de instantes k , con el fin de controlar ciertos módulos de calidad en la composición de la mezcla resultante, dicho método **caracterizado** por agrupar los alimentadores en fuentes de los distintos compuestos que afectan a los módulos de calidad, agrupar dichas fuentes de compuestos en fuentes de los distintos módulos de calidad considerados, y establecer una correspondencia entre dichos compuestos y dichos módulos de calidad, y ejecutar las siguientes operaciones en cada uno de dichos instantes k :

- (a) almacenar las medidas de la composición de la mezcla proporcionadas por un analizador en línea;
- (b) calcular los módulos de calidad de la mezcla a partir de dichas medidas de la composición de la mezcla;
- (c) generar señales de control avanzado para cada uno de los módulos de calidad considerados, utilizando una de las técnicas conocidas de control avanzado capaces de hacer que los módulos de calidad converjan hacia sus consignas,
- (d) calcular las consignas de caudal para dichas fuentes de compuestos a partir de dichas señales de control avanzado; de forma que la consigna de caudal de la fuente de cada elemento sea un porcentaje de la suma de las consignas de caudal de todas las fuentes de compuestos incluidas en la fuente del módulo de calidad correspondiente a dicho elemento, siendo dicho porcentaje igual a la señal de control generada en el paso previo y correspondiente a dicho módulo de calidad;
- (e) distribuir las consignas de caudal para las fuentes de los compuestos entre las consignas de caudal para los alimentadores incluidos en dichas fuentes siguiendo el criterio fijado por el operador del proceso de mezcla, asegurando que la suma de las consignas de caudal para los alimentadores de cada fuente de un compuesto es igual a la consigna de caudal de la fuente en cuestión;
- (f) calcular un retardo para la aplicación de cada una de las consignas de caudal correspondientes a los distintos alimentadores con el fin de unificar los tiempos de retardo del proceso, teniendo en cuenta los tiempos de transporte de material entre los distintos alimentadores y el analizador; y
- (g) aplicar las consignas de caudal correspondientes a cada alimentador, respetando el retardo calculado para cada una de ellas, a los controladores de caudal de cada alimentador en cuestión.

2. El método según la reivindicación 1, **caracterizado** adicionalmente por las siguientes operaciones:

- fijar límites del rango de operación para cada una de las señales de control avanzado para cada uno de los módulos de calidad considerados;
- comparar el valor generado de cada una de las señales de control avanzado para cada uno de los módulos de calidad con el límite fijado para cada una de dichas señales de control avanzado; asimismo comparar el módulo de calidad medido en la mezcla con su valor deseado;
- emitir un diagnóstico de deficiencia en la composición de la fuente de un compuesto correspondiente a un módulo de calidad cuando concurra que una de las citadas señales de control avanzado alcance su límite de operación y que el módulo de calidad medido en la mezcla permanezca desviado de su valor deseado; la emisión se hará a través de la pantalla de interfaz del operador.

3. El método según la reivindicación 2, **caracterizado** adicionalmente por utilizar alimentadores correctivos en una fuente de un compuesto y por asignar consignas de caudal para dichos alimentadores correctivos cuando se produce un diagnóstico de deficiencia en la composición de dicha fuente de compuesto.

4. Uso del método según la reivindicación 1, el utilizado en la producción de cemento y dichos módulos de calidad los utilizados en este tipo de industria, tales como el factor de saturación de cal, el módulo de silicio, el módulo de hierro y otros.

ES 2 307 383 B1

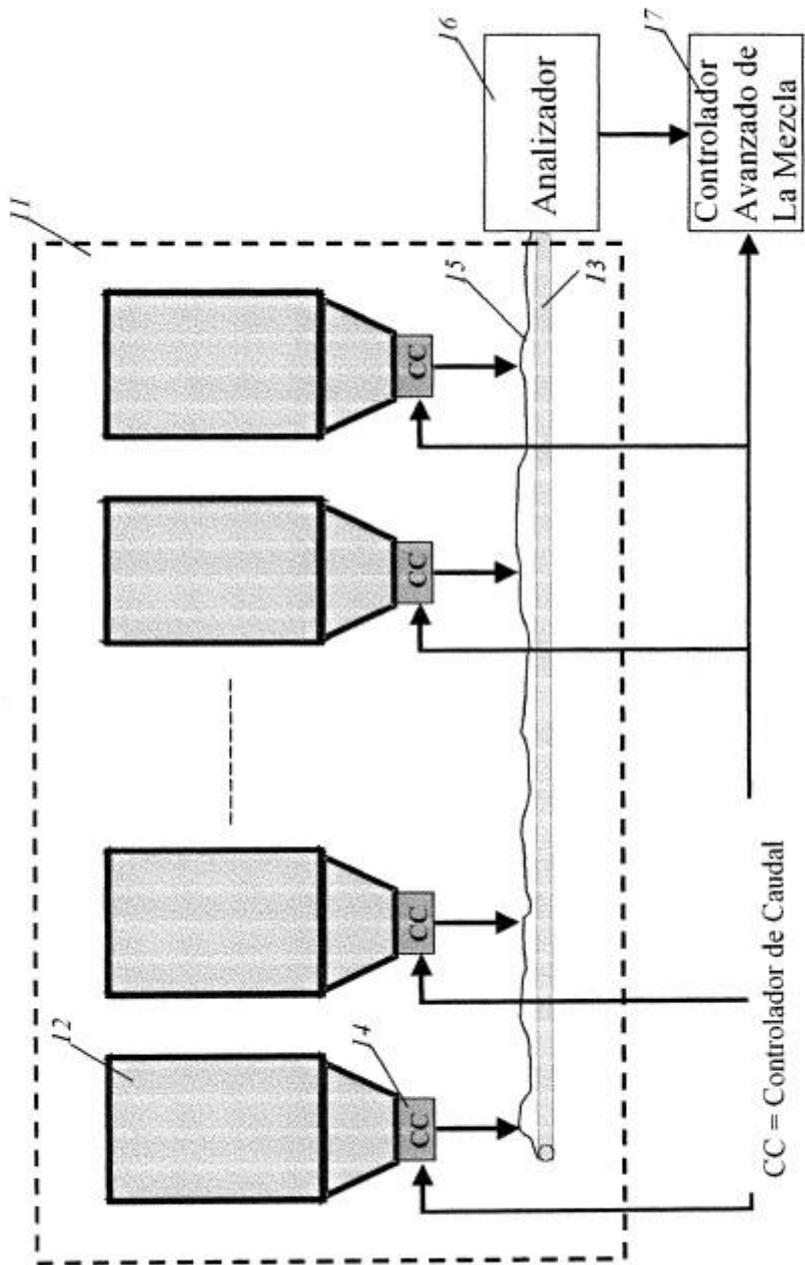


Fig. 1

ES 2 307 383 B1

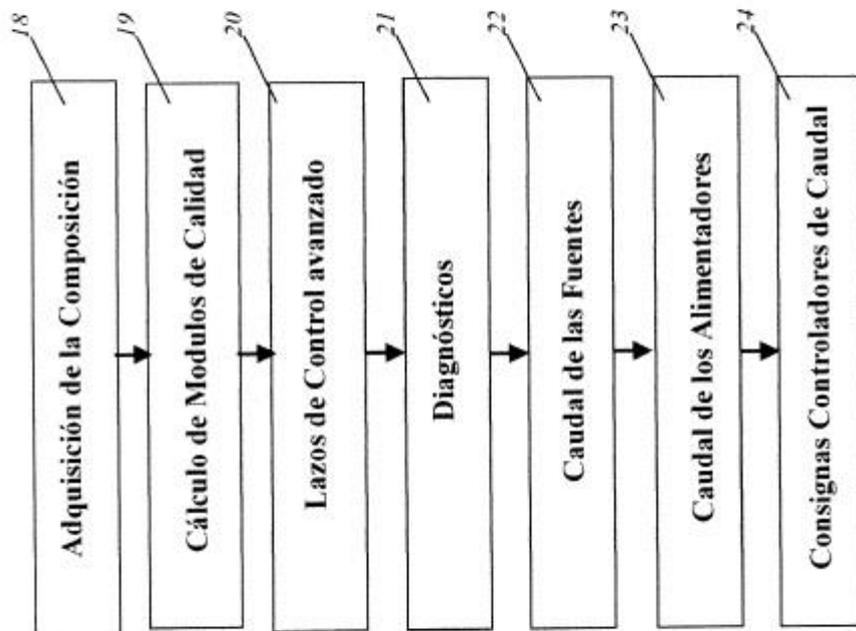


Fig. 2

ES 2 307 383 B1

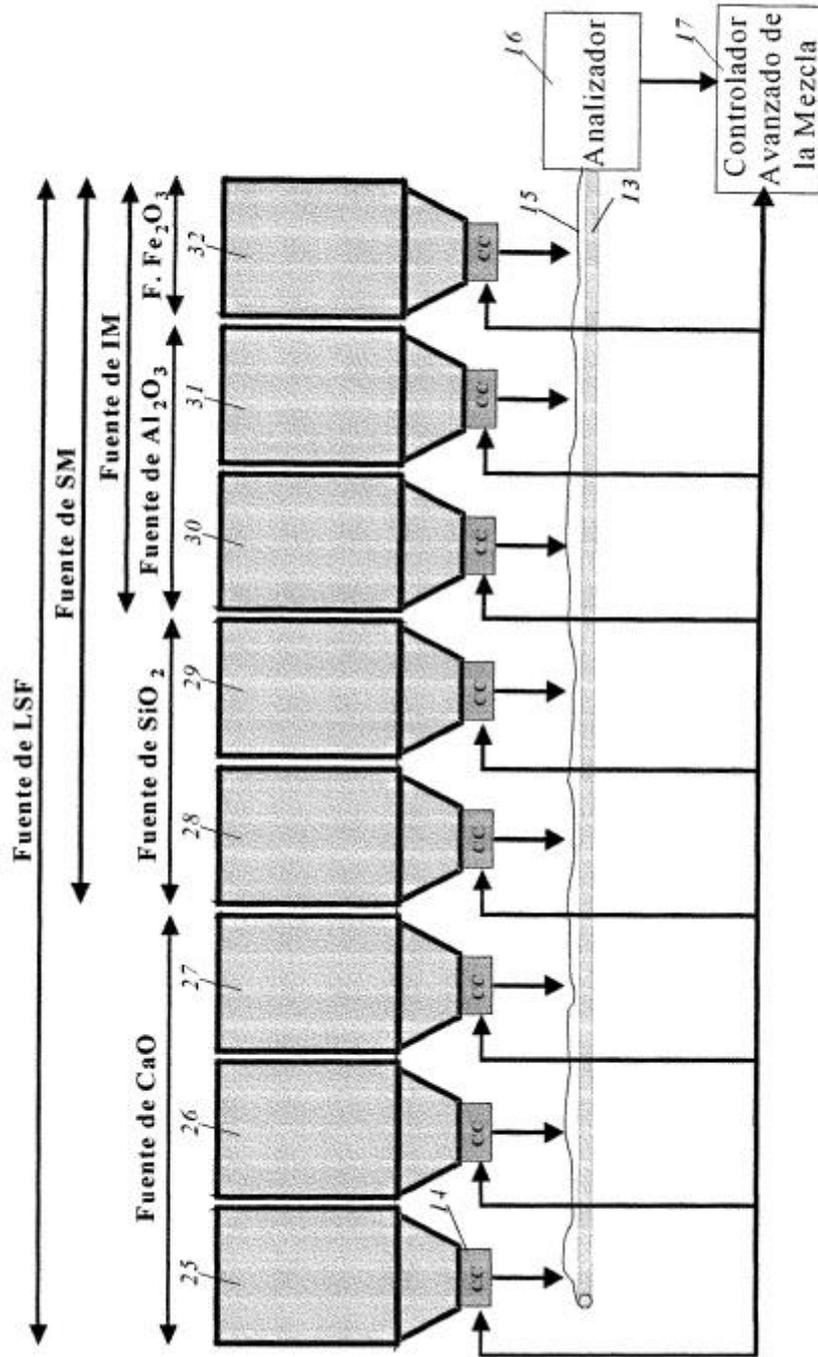


Fig. 3

ES 2 307 383 B1

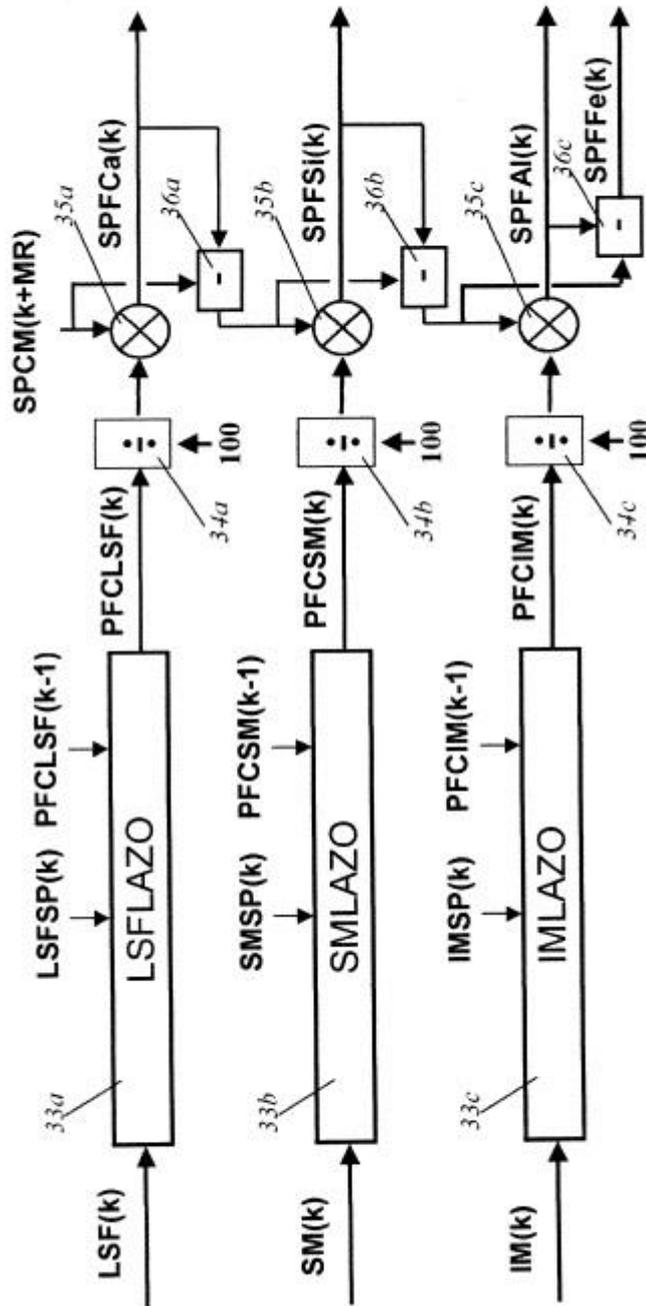


Fig. 4

ES 2 307 383 B1

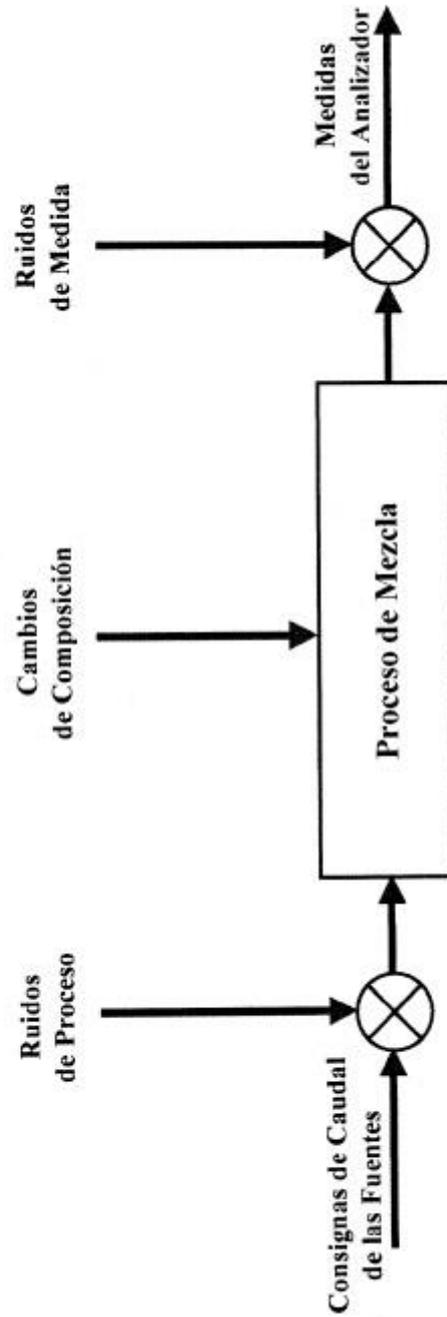
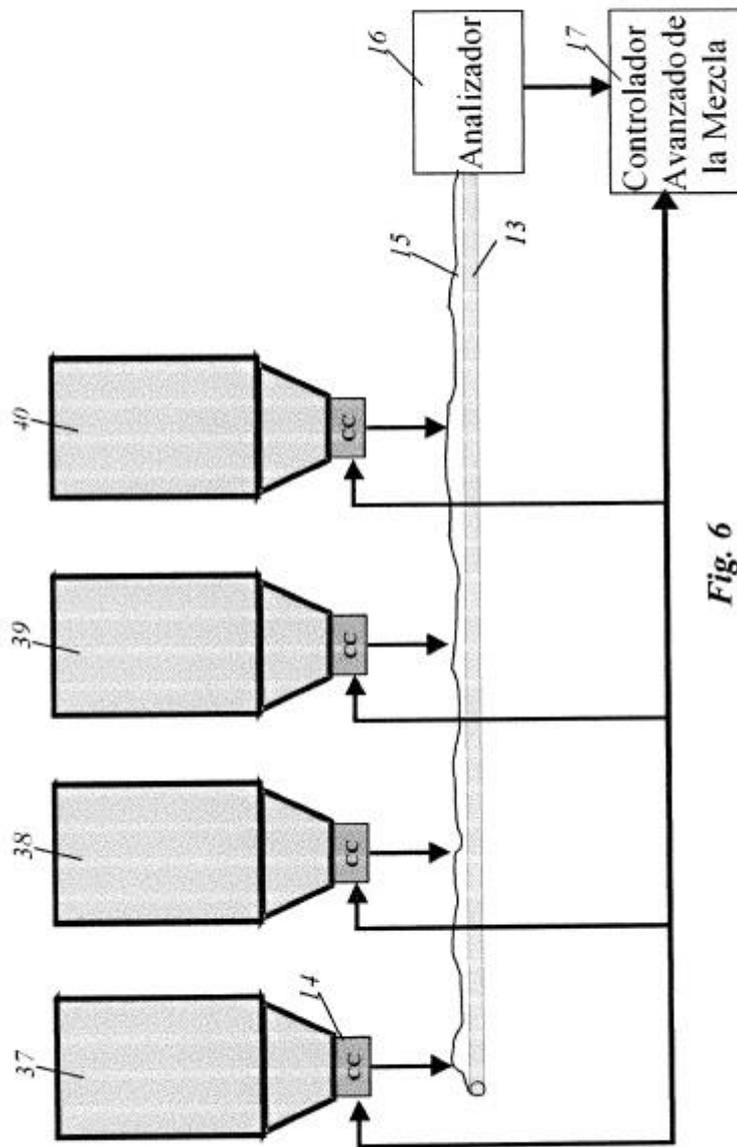


Fig. 5

ES 2 307 383 B1



ES 2 307 383 B1

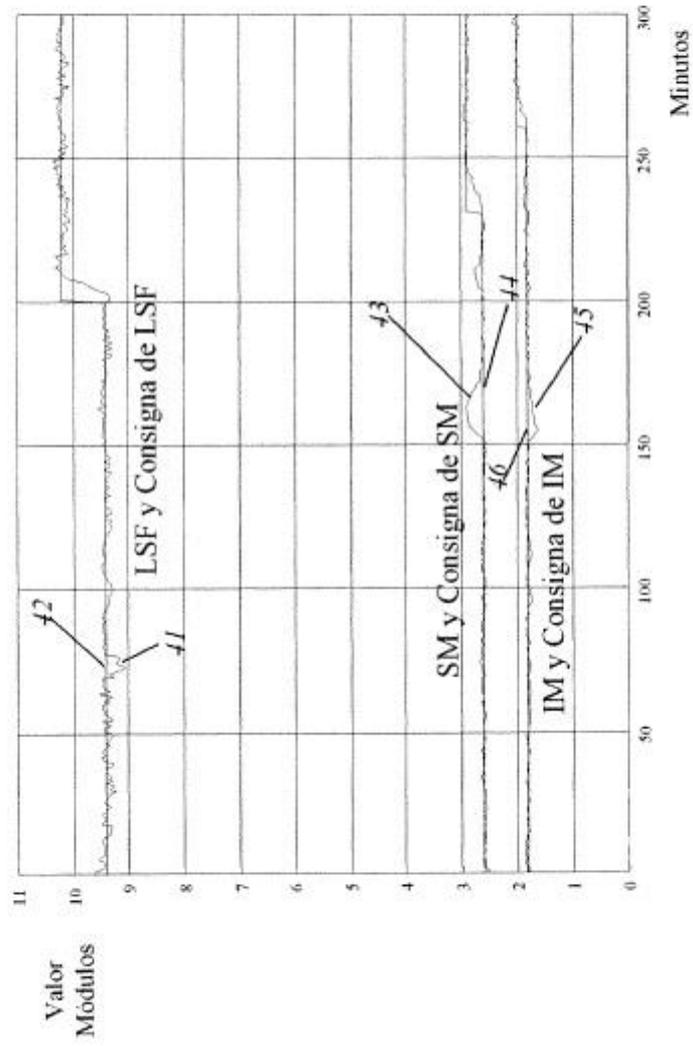


Fig. 7

ES 2 307 383 B1

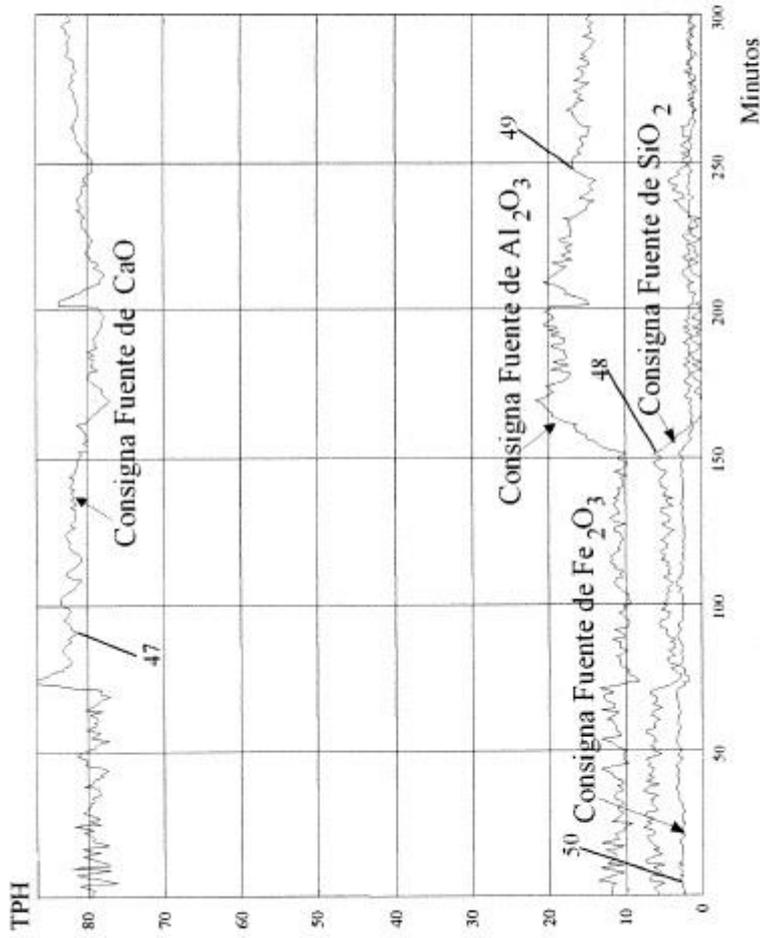


Fig. 8

ES 2 307 383 B1

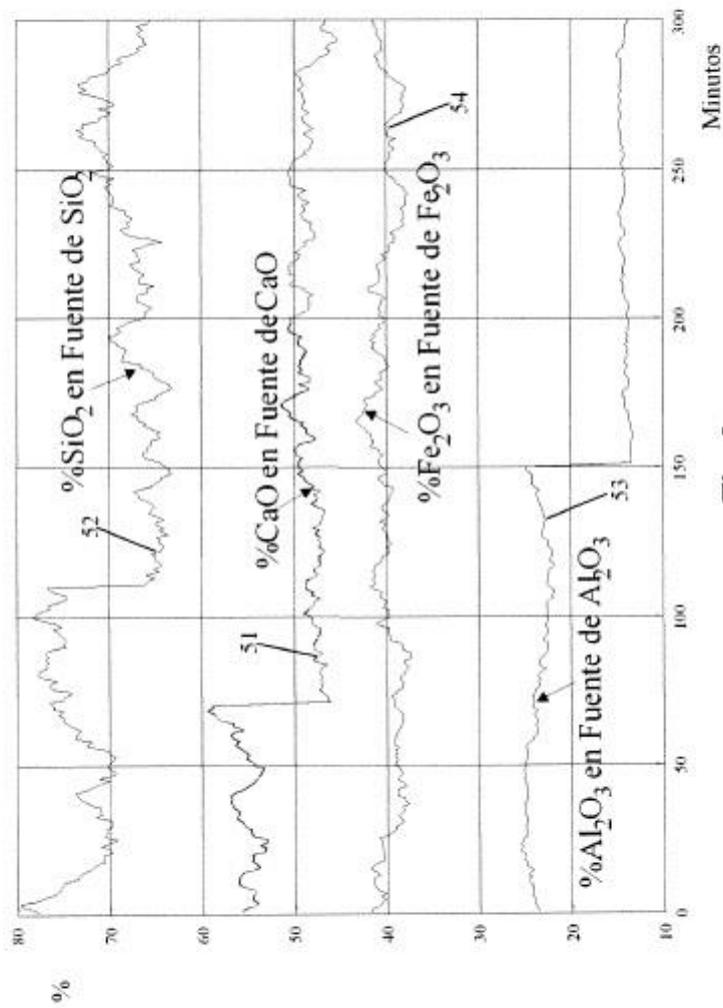


Fig. 9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 307 383

② Nº de solicitud: 200601238

③ Fecha de presentación de la solicitud: 12.05.2006

④ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: G05B 13/00 (2006.01) B01F 13/10 (2006.01)
--

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	WO 0222246 A1 (THERMO GAMMA METRICS; SANCHEZ JUAN M MARTIN) 21.03.2002, todo el documento.	1-4
Y	J. RIESCO, F. MUR, J.M. MARTÍN SÁNCHEZ. "Control avanzado para la mezcla de materiales en la industria del cemento". I Seminario de aplicaciones industriales de control avanzado - SAICA 2005.	1-4
Y	EP 0037579 A2 (MARTIN SANCHEZ JUAN) 14.10.1981, todo el documento.	1-4

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otros de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe 16.10.2008	Examinador B. Tejedor Miralles	Página 1/1
---	--	----------------------

