

## **TESIS DOCTORAL**

DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSION DE ENSAYO PARA  
IMPULSOS TIPO RAYO CON OSCILACIONES SUPERPUESTAS EN ESPACIOS DE  
AIRE SOMETIDOS A CAMPOS ELÉCTRICOS NO HOMOGÉNEOS

**D. ANTONIO VALLADOLID ALONSO**

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTADA EN EL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE CONTROL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

DIRECTOR DE LA TESIS:

Dr. RAFAEL GUIRADO TORRES

CODIRECTOR DE LA TESIS:

Dr. FERNANDO GARNACHO VECINO

MADRID, 2015



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE CONTROL  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

TÍTULO DE LA TESIS:

DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSION DE ENSAYO  
PARA IMPULSOS TIPO RAYO CON OSCILACIONES SUPERPUESTAS  
EN ESPACIOS DE AIRE SOMETIDOS A CAMPOS ELÉCTRICOS NO  
HOMOGÉNEOS

AUTOR:

D. ANTONIO VALLADOLID ALONSO  
INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR DE LA TESIS:

Dr. RAFAEL GUIRADO TORRES

CODIRECTOR DE LA TESIS:

Dr. FERNANDO GARNACHO VECINO

MADRID – 2015



*A Concha, Pablo, Carlos y Yurena*



## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar quisiera expresar mi agradecimiento a los directores de esta tesis, Dr. Rafael Guirado Torres y Dr. Fernando Garnacho Vecino por su esfuerzo y dedicación en la dirección de la misma y por su constante estímulo, motivación y comprensión. También por brindarme la oportunidad de realizar esta tesis y el tiempo que han dedicado durante su elaboración.

Gracias de forma especial al Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE) de la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII), por haber permitido la utilización de los medios técnicos, sin los que no hubiera sido posible la ejecución de los ensayos experimentales incluidos en esta tesis y especialmente a Abderrahim Khamlichi por su dedicación y disponibilidad durante la realización de los mismos.

No quiero olvidar a los profesores y amigos del departamento de Ingeniería eléctrica, Electrónica y de Control de la UNED por la ayuda y asesoramiento durante el largo proceso del doctorado.

Finalmente gracias a mis padres, que aunque no lo puedan ver ahora, fueron los precursores y animadores para este objetivo. Y gracias a mi familia: Concha, Pablo, Carlos y Yurena, porque sois mi estímulo y soporte. Prometo resarciros de todo el tiempo familiar que no os he dedicado a causa de esta tesis.



## RESUMEN

---

Para la verificación del correcto diseño de las instalaciones de alta tensión, en cuanto a la correcta coordinación del aislamiento, es necesario realizar ensayos que evidencien que un determinado componente es capaz de soportar el conjunto de sollicitaciones dieléctricas representativas de las tensiones y sobretensiones en servicio. Los ensayos para comprobar que se satisfacen los niveles de tensión soportada se realizan en laboratorios de alta tensión utilizando técnicas de ensayo que garantizan la reproducibilidad de los mismos. Pequeñas diferencias en los niveles de tensión soportada pueden obligar a cambios de diseño o fabricación, y por tanto pueden tener repercusiones económicas muy importantes. Por otra parte, si distintos materiales instalados en la misma red eléctrica se han ensayado siguiendo criterios diferentes, se puede poner en peligro la propia coordinación de aislamiento de toda la red.

Cuando se someten los materiales a los ensayos con impulsos de frente rápido tipo rayo pueden aparecer sobreoscilaciones en el impulsos que es necesario evaluar para calcular la tensión de ensayo y por lo tanto la tensión soportada. Esta evaluación está contemplada en las normas de las técnicas de ensayo mediante la utilización de la función de tensión de ensayo mediante una variación gradual en función exclusivamente de la frecuencia. No obstante, existen algunos parámetros adicionales que se deben tener en consideración cuando se aplica la función de la tensión de ensayo definida en las nuevas ediciones de las normas:

- Los parámetros que definen la configuración eléctrica: el medio dieléctrico, distancia entre los electrodos y uniformidad del campo eléctrico.
- Los parámetros del impulso tipo rayo: la polaridad del impulso, la tensión máxima  $U_e$ , el amortiguamiento de la oscilación, la frecuencia de las oscilaciones o la amplitud de la sobreoscilación.

- Las condiciones atmosféricas durante el ensayo: la temperatura, la presión y la humedad del aire cuya influencia en los impulsos con oscilaciones no está suficientemente demostrada.

En este trabajo de Tesis doctoral se realiza el análisis de los diferentes métodos y procedimientos para la generación y posterior evaluación de los impulsos tipo rayo, de las instalaciones de generación de impulsos utilizadas que permiten generar a demanda diferentes impulsos con parámetros diferentes que permitan flexibilidad en los ensayos experimentales. Asimismo, junto con el estudio y determinación de la influencia que sobre la tensión disruptiva en los aislamientos pueden tener aspectos como la configuración del campo eléctrico, del comportamiento dieléctrico de la descarga u otros factores ambientales o atmosféricos, se describen y analizan los métodos estadísticos para el tratamiento de los resultados de los ensayos con impulsos tipo rayo y de su aplicación con la nueva función de tensión de ensayo introducida por las nuevas ediciones de las normas de técnicas de ensayo en alta tensión.

Se propone un procedimiento fiable y sistemático para la determinación del valor de la función de la tensión de ensayo, tanto en situaciones de campo homogéneo como de campo no homogéneo, aplicando métodos de evaluación diferentes y considerando la aplicabilidad de las correcciones atmosféricas para el caso de los impulsos oscilantes. La determinación de la función de la tensión de ensayo se realiza mediante la estimación de la función de probabilidad de todos los niveles de tensión que resulta mucho más robusto que su cálculo a partir de un solo nivel de probabilidad (típicamente del 10% de probabilidad o tensión soportada).

En aplicación de este procedimiento a varias configuraciones de campo, se llega a la demostración mediante los resultados de ensayo experimentales, que los valores de la función de tensión de ensayo en determinadas condiciones o configuraciones (campos no homogéneos y distancias de aire grandes, por encima de 0,15 m), no coinciden con los obtenidos por aplicación de las formulas contenidas en las normas de aplicación IEC 60060-1 e IEEE Std 4. Las diferencias pueden llegar a ser tales que el valor realmente soportado a impulsos tipo rayo lisos podría resultar hasta un 8,6 % inferior al valor obtenido al aplicar el valor indicado por la norma, si la distancia libre hubiera sido igual o superior a 2 m y la frecuencia de la oscilación fuese de unos 180 kHz.

Adicionalmente es necesario realizar una selección de las configuraciones de ensayo adecuadas para la obtención de resultados experimentales que corroboren los valores reales de la función de tensión de ensayo (*k factor*) y que puedan tener en cuenta otros parámetros de influencia en su determinación como es el factor de separación que relaciona la uniformidad del campo eléctrico y que mediante ensayos con impulsos tipo manobra permita conocer el valor del factor de separación. Finalmente se propone una formula generalizada para la función de tensión de ensayo para configuraciones de campo no homogéneo y distancias de aire grandes, en la que se tengan en cuenta, además de la frecuencia de la oscilación,  $f$ , la distancia de aire,  $d$  y el factor de separación,  $K$ .



## SUMMARY

---

For verification of the correct design of high voltage installations, in relative to the correct insulation coordination, is necessary perform tests to demonstrate that a particular component is capable of withstand the representative dielectric stresses and surges representatives for service. Tests to check withstand voltage levels are satisfied are performed in high-voltage laboratories using testing techniques to ensure reproducibility. Small differences in withstand voltage levels may force changes in design or manufacture, and therefore can have major economic impacts. Moreover, if different materials installed in the same electrical network have been tested according to different criteria, it can endanger own insulation coordination of the entire network.

When testing materials with fast front lighting impulses may appear in the pulse to be evaluated oscillations that must be evaluated to calculate the test voltage or withstand voltage. This evaluation is provided in the international standards for test requirements, by the use of test voltage function, through a gradual change based on the frequency. However, there are some additional parameters to be taken into account when the function of the test voltage defined in new editions of the standards applied:

- The parameters that define the electrical configuration: the dielectric medium, the distance between the electrodes and the uniformity of the electric field.
- The parameters of lightning impulse: the polarity of the impulse, the maximum voltage  $U_e$ , the damping of the oscillation, the oscillation frequency or amplitude of the overshoot.
- The atmospheric conditions during the test: the temperature, absolute pressure and humidity whose influence on the impulses with oscillations is not sufficiently demonstrated.

In this doctoral thesis, the analysis of different methods and procedures for the generation and subsequent evaluation of the lightning impulses, for the installations used for generating lightning impulses on demand that can generate different pulses with different parameters for experimental testing, are studied. Also, together with the study and determination of the influence on the breakdown voltage in the insulation may have, issues such as configuration of the electric field, the dielectric behaviour of the discharge or other environmental or atmospheric conditions, are described, analysing the statistical methods for processing of test results with lightning impulse and its application of the new test voltage function introduced by the new editions of the standards of high voltage test techniques.

Reliable and systematic procedure for determining the value of the test voltage function, in case of non-homogeneous or homogeneous field, applying different evaluation methods and considering the applicability of the atmospheric corrections in case intends the oscillating pulses, is proposed. Determining the test voltage function is performed by estimating the probability function for all voltage levels that is much more robust than its calculation from a single level of probability (typically 10% probability or withstand voltage).

By the application of this procedure to several electric field configurations, it is demonstrated by the experimental testing results, that the values of the test voltage function in certain conditions or configurations (not homogeneous fields and large distances of air (above 0.15 m), do not match with those obtained by applying the formulas contained in the existing standards IEC 60060-1 and IEEE Std 4. The differences may be such that the value actually withstand for smooth lightning impulses could be up to 8.6% less than the indicated value by applying the standard value, if the air distance is more than 2 m and the frequency of the oscillation was about 180 kHz.

Additionally it is necessary to make a selection of the right configurations to obtain experimental results that corroborate the actual values of the test voltage function (*k factor*) and that can be taken into account other influence parameters for its determination, as the air gap factor, which is related with the electric field uniformity which can be calculated by switching-impulse voltage tests. Finally, a generalized formula for the test voltage function for non-homogeneous field configurations and large distances in air, which takes into account, besides the oscillation frequency  $f$ , the distance of air  $d$  and air gap factor  $K$ , is proposed.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	i
RESUMEN .....	iii
SUMMARY .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xix
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xxi
1 INTRODUCCIÓN, PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA TESIS .....	3
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	7
2 LAS SOLICITACIONES DIELECTRICAS EN LOS AISLAMIENTOS Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA VERIFICACIÓN.....	11
2.1 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN SOPORTADA Y DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA DE LOS MEDIOS AISLANTES - PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LA TENSIÓN DISRUPTIVA.....	13
2.1.1 INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DEL AISLAMIENTO DEL OBJETO EN ENSAYO .....	17
2.1.2 INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO DIELECTRICO DE DIFERENTES MEDIOS AISLANTES.....	23
2.1.3 INFLUENCIA DE OTROS FACTORES QUE AFECTAN A LA TENSIÓN DE DESCARGA DISRUPTIVA EN EL AISLAMIENTO DE AIRE.....	37
2.2 MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN DE LOS IMPULSOS TIPO RAYO EN LABORATORIO. ....	40
2.3 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA .....	49
2.3.1 DISTRIBUCIÓN de PROBABILIDAD DE WEIBULL .....	49
2.3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS .....	54

2.3.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS ESTADÍSTICOS {4}.....	56
2.4	MÉTODO NORMATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO PARA IMPULSOS TIPO RAYO CON OSCILACIONES SUPERPUESTAS.....	61
2.4.1	INTRODUCCIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO, K-FACTOR.....	61
2.4.2	TENSIÓN DE ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO Y FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO .....	67
2.4.3	PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE LOS IMPULSOS DE TENSIÓN.....	71
3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO.....	77
3.1	MONTAJES PARA EL ENSAYO EXPERIMENTAL (INSTALACIÓN 1G E INSTALACIÓN 2 G).....	78
3.1.1	DISPOSICIÓN DE ENSAYO UTILIZANDO DOS GENERADORES DE IMPULSOS SINCRONIZADOS (INSTALACIÓN 2G) .....	78
3.1.2	DISPOSICIÓN DE ENSAYO UTILIZANDO UN GENERADOR MARX MODIFICADO (INSTALACIÓN 1G) .....	88
3.1.3	DETERMINACIÓN DE LA CURVA BASE.....	90
3.2	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO .....	92
3.2.1	DETERMINACIÓN DE UN VALOR $K_{HIJ}$ DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO MEDIANTE EL ENSAYO DE $U_{HIJ}(50\%)$ PARA EL CASO DE CAMPOS NO HOMOGÉNEOS .....	95
3.2.2	DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO, MEDIANTE EL ENSAYO DE $U_{50\%}$ PARA EL CASO DE CAMPOS HOMOGÉNEOS O CUASI-HOMOGÉNEOS:.....	100
3.2.3	EXTENSIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE PROBABILIDAD DEL 50% A LA DEL NIVEL DEL 10% .....	104
3.3	ENSAYOS EXPERIMENTALES EN APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO.....	108
3.4	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES CON UNA CONFIGURACIÓN DE ENSAYO CON CAMPO HOMOGÉNEO (ESFERA- ESFERA) Y DIFERENTES DISTANCIAS DE AIRE .....	115

3.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA UNA CONFIGURACIÓN DE ENSAYO DE CAMPO NO HOMOGÉNEO (PUNTA-PLANO) Y DIFERENTES DISTANCIAS DE AIRE.....	121
4 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA GRANDES DISTANCIAS DE AIRE CON CAMPOS NO HOMOGÉNEOS .....	125
4.1 CONFIGURACIONES DE ENSAYO DE CAMPO NO HOMOGÉNEO CON DISTANCIAS LIBRES EN AIRE COMPRENDIDAS ENTRE 0,15 m Y 3,0 m.....	126
4.1.1 CONFIGURACIÓN PUNTA-PLANO ( $K \sim 0,9 \div 1$ ).....	127
4.1.2 CONFIGURACIÓN PUNTA-ESFERA ( $K \sim 1$ ).....	129
4.1.3 CONFIGURACIÓN ESFERA-ESTRUCTURA ( $K=1,18$ ).....	131
4.1.4 CONFIGURACIÓN CONDUCTOR-ESTRUCTURA ( $K=1,42$ ).....	134
4.1.5 CONFIGURACIÓN DE ANILLOS Y PLANO DE TIERRA ( $K \sim 1,32$ ) .....	136
4.2 NUEVA RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DISRUPTIVA PARA IMPULSOS TIPO RAYO NORMALIZADOS 1,2/50 Y LA DISTANCIA LIBRE EN AIRE .....	138
4.3 PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO .....	144
4.3.1 PARÁMETROS SENSIBLES A LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO ...	144
4.3.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE INSTALACIÓN DE GENERACIÓN UTILIZADA.....	147
4.3.3 INFLUENCIA DE LA AMPLITUD RELATIVA $\beta'$ Y DEL AMORTIGUAMIENTO $\delta$ DE LA SOBRETENSIÓN .....	151
4.3.4 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA LIBRE EN AIRE .....	154
4.3.5 INFLUENCIA DE LA HOMOGENEIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO .....	157
4.4 REVISIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO. ....	160
4.4.1 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA DIFERENTES DISTANCIAS LIBRES EN AIRE CON FACTOR DE SEPARACIÓN $K \sim 1$ .....	161
4.4.2 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO SATURADA $k_s(f)$ PARA DIFERENTES FACTORES DE SEPARACIÓN $K$ .....	168
4.5 GENERALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO .....	174
5 CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	185
5.1 CONCLUSIONES .....	185
5.2 APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS.....	189
5.3 SUGERENCIAS PARA FUTUROS DESARROLLOS.....	191

BIBLIOGRAFÍA ..... 193

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1-1 – Función de la tensión de ensayo definida en las nuevas ediciones de la norma IEC 60060-1 y de la IEEE Std 4, para representar la respuesta de los aislamientos a impulsos con oscilaciones superpuestas (sobretensión)
- Figura 2-1 – Tiempos de retardo hasta la descarga disruptiva
- Figura 2-2 - Tiempo de retardo para el aire para cuatro separaciones entre electrodos
- Figura 2-3 - Tiempo de retardo formativo para el N<sub>2</sub> y SF<sub>6</sub> a 1 bar y en presencia de campo cuasi homogéneo.
- Figura 2-4 – Curvas tensión duración (V-t), para impulsos tipo rayo.
- Figura 2-5 - Área disruptiva A, por encima del valor  $U_s$  dada por la ecuación (2.13)
- Figura 2-6 - El criterio de igualdad de áreas y las curvas (V-t).
- Figura 2-7 - Circuito equivalente de un generador de impulsos de una sola etapa
- Figura 2-8 – Circuito simplificado equivalente del generador para considerar su inductancia.
- Figura 2-9 - Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable representado en escala lineal
- Figura 2-10 - Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable representado en escala gaussiana
- Figura 2-11 - Ejemplo de un ensayo con el método de niveles múltiples para la determinación de una tensión del 50 % estimada del 100 kV
- Figura 2-12 – Ejemplo de un ensayo utilizando el método de subidas y bajadas para la determinación de las tensiones de descarga del 10 % y del 90 %.
- Figura 2-13 – Función “efectiva” de la tensión de ensayo, según anteriores ediciones de las normas IEC 60060-1
- Figura 2-14 - Reglas de evaluación de impulsos tipo rayo con oscilaciones o sobretensión, según la antigua norma IEC 60060-1.

- Figura 2-15 – Valores experimentales obtenidos para los impulsos con oscilaciones superpuestas en la zona de transición y función de la tensión de ensayo  $k$  factor considerada en la actual norma IEC-EN 60060-1
- Figura 2-16 – Curva base y registrada que muestran la sobretensión y la curva residual
- Figura 2-17 – Curva de tensión de ensayo (suma de la curva base y la curva residual filtrada)
- Figura 2-18 – Curvas de la tensión de ensayo y curva registrada
- Figura 3-1 – Montaje de ensayo consistente en dos generadores de impulsos sincronizados
- Figura 3-2 – Esquema general del generador de impulsos lisos
- Figura 3-3 – Esquema general del generador de las oscilaciones y sobretensiones
- Figura 3-4 – (página anterior) Retardos escogidos según las frecuencias de oscilación de 0,2 MHz, 0,5 MHz y 0,8 MHz
- Figura 3-5 – Esquema básico del sistema de medida y control del montaje de 2 generadores (Instalación 2G)
- Figura 3-6 – Generador tipo Marx modificado para generar impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas
- Figura 3-7 – Distribución de Weibull  $p_b(U_t)$ , ajustada a los resultados experimentales con el conjunto de ensayos de impulso pleno liso
- Figura 3-8 - Distribuciones de probabilidad  $p(U_{bhij})$  y  $p(U_{ehij})$  del conjunto de impulsos oscilantes
- Figura 3-9 – Distribuciones de probabilidad  $p_b(U_t)$  y  $p_a(U_t)$  con correcciones por condiciones atmosféricas y su distribución de probabilidad media  $p(U_t)$
- Figura 3-10 – Función de probabilidad  $p(k)$  para un valor experimental de la función de tensión de ensayo,  $k$  factor, ajustada para cada diferente nivel de probabilidad de descarga 1 % y diferencia entre 1 % = 10% y 1 % = 50% .
- Figura 3-11 – Forma de onda del impulso oscilante aplicado a una configuración de campo no homogéneo (punta-plano) para una

separación de aire de 0,5 m,  $U_e = 250$  kV, amplitud de oscilación  $\beta=10\%$  y amortiguamiento  $\delta=10\%$ .

Figura 3-12 – Forma de onda del impulso oscilante aplicado a la configuración indicada en la Figura 3-11 y que provoca descarga disruptiva.

Figura 3-13 – Funciones de probabilidad de los impulsos lisos plenos aplicados antes y después de la aplicación del impulsos oscilante en las condiciones atmosféricas correspondientes a cada conjunto de ensayos.

Figura 3-14 – Funciones de probabilidad mostradas en la Figura 3-13, habiendo realizado las correcciones a las condiciones atmosféricas de referencia.

Figura 3-15 – Distribuciones de probabilidad de la tensión máxima  $U_e$  y de la tensión de la curva base  $U_b$  obtenidas por la aplicación de impulsos oscilantes junto con la distribución de probabilidad de la tensión de ensayo  $U_t$ .

Figura 3-16 – Función de probabilidad de la función de tensión de ensayo  $k(f)$  obtenida a partir de las funciones de probabilidad  $U_t$ ,  $U_e$  y  $U_b$  por aplicación de la ecuación (3.5), para una frecuencia y amplitud de sobreoscilación de 250 kHz, y 12%, respectivamente.

Figura 3-17 – Configuración de ensayo de campo homogéneo formado por dos electrodos esféricos de 1 m de diámetro

Figura 3-18 a) – Forma de onda correspondiente al ensayo con impulso liso cortado en la cola, para la configuración de campo homogéneo para una distancia de aire de 20 cm entre esferas de 1 m de diámetro

Figura 4-1 – Configuración de ensayo formada por una barra terminada en punta cónica y un plano ( $K \sim 0,9 \div 1$ ) y con distancias libres en aire de 0,5 m; 0,91 m; 1,92 m y 2,5 m.

Figura 4-2 – Configuración de ensayo formada por una varilla y una esfera ( $K \sim 1$ ), con una separación de 0,15 m

Figura 4-3 - Configuración de ensayo formada por una esfera y cilindro-plano,  $K=1,18$ , con distancia de separación libre en aire de  $d=1,5$  m.

Figura 4-4 - Configuración de ensayo formada por una conductor horizontal y cilindro-plano,  $K=1,42$ , con distancia de separación libre en aire de  $d=1,5$  m.

- Figura 4-5 – Configuración de ensayo formada por dos electrodos toroidales y el plano de tierra, con distancia libre en aire de  $d = 3$  m {48}.
- Figura 4-6 – Representación del factor  $K_{ff}$  según las ecuaciones (4.4) y (4.6) en función del factor de separación  $K$ . También se muestran (punto rojo), los valores experimentales y calculados del factor  $K$  obtenidos.
- Figura 4-7 – Expresión gráfica de los parámetros  $U_e$ ,  $U_b$ ,  $\beta'$  y  $\delta$  de un impulso tipo rayo con oscilaciones superpuestas, según se define en las últimas ediciones de las normas IEC 60060-1 y IEEE Std 4
- Figura 4-8 – Formas de onda de impulsos oscilantes aplicados según la disposición de ensayo de 1G o 2G para distancias de 0,5 m y 0,86 m.
- Figura 4-9 – Formas de onda de la tensión de impulso tipo rayo aplicada con diferentes valores de frecuencia de oscilación y amplitud relativa de sobretensión.
- Figura 4-10 – Formas de onda de los impulsos tipo rayo en los que se ha producido descarga disruptiva aplicados a diferentes distancias libres de aire para la configuración de campo no homogéneo punta-plano ( $K \sim 1$ ).
- Figura 4-11 – Formas de onda de los impulsos tipo rayo en los que se ha producido descarga disruptiva para la frecuencia de la sobretensión de 175 kHz: a) configuración de ensayo  $K=1,18$  y b) configuración de ensayo  $K=1,42$ .
- Figura 4-12 – Valores de la función de tensión de ensayo de la Tabla 4-8 en función de la frecuencia para diferentes distancias libres en aire con un factor de separación  $K \sim 1$ ; en línea discontinua la curva  $k(f)$  establecida en la norma IEC 60060-1:2010.
- Figura 4-13 – Familia de curvas de la función de tensión de ensayo  $k$  factor para diferentes distancias de aire  $d \leq 0,15$  m;  $d = 0,5$  m;  $d = 1$  m;  $d = 2$  m y  $d = 2,5$  m con factor de separación  $K \sim 1$ .
- Figura 4-14 – Diferencias entre los valores de la función de tensión de ensayo en función de la frecuencia aplicando las curvas determinadas experimentalmente para diferentes distancias de aire y los valores de la función de tensión de ensayo calculados por la fórmula establecida por las normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4.

Figura 4-15 – Valores de la función de tensión de ensayo saturada superior, recogidos de la Tabla 4-8, para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ , y la curva *k factor* (línea discontinua), establecida por la norma IEC 60060-1.

Figura 4-16 - Familia de curvas de la función de tensión de ensayo  $k(f)$  para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ , y la curva *k factor*, establecida por la norma IEC 60060-1.

Figura 4-17 – Diferencias entre los valores de la función de tensión de ensayo en función de la frecuencia de la sobretensión aplicando las curvas de la función de tensión de ensayo saturadas superiores  $k_s(f)$  y los valores de la función de tensión de ensayo de la norma  $k(f)$ , para diferentes valores de factor de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

Figura 4-18 – Representación del desplazamiento de las curvas de la función de tensión de ensayo tomada de la referencia {16} cuando las configuraciones ensayadas varían de las consideradas en las normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4.

Figura 4-19 –Ajuste de la ecuación (4.14) asociada al parámetro  $c_s$  que se deriva de la Figura 4-13 para diferentes distancias libre de aire

Figura 4-20 - Ajuste de la ecuación (4.15) asociada al parámetro  $c_s^*$  que se deriva de la Figura 4-16 para los diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

Figura 4-21 a) – Familia de curvas para diferentes distancias de aire en presencia de campos fuertemente no homogéneos  $K = 1$  y  $K = 1,2$



## ÍNDICE DE TABLAS

---

- Tabla 2-1 - Valores de tensión soportada a frecuencia industrial e impulsos tipo rayo para la Gama I, del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29} y de la norma IEC 60071-1 {20}
- Tabla 2-2 - Valores de tensión soportada a impulsos tipo maniobra e impulsos tipo rayo para la Gama II, incluida en la norma IEC 60071-1 {20}.
- Tabla 2-3 - Valores de tensión soportada a impulsos tipo rayo y a impulsos tipo maniobra para el Grupo C, del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29}
- Tabla 2-4 – Valores típicos del factor de separación  $K$ , para diferentes configuraciones de campo eléctrico reales, presentes en las instalaciones de alta tensión
- Tabla 2-5 – Cálculo de las constantes de tiempo para un generador de impulsos comercial.
- Tabla 2-6 – Número de descargas aplicadas por cada grupo de ensayos y probabilidades de descarga en los ensayos de subidas y bajadas
- Tabla 3-1 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para la configuración de distancias de aire con campo homogéneo esfera-esfera
- Tabla 3-2 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para la configuración de campo no homogéneo (punta-plano) y diferentes distancias de aire que implican diferentes valores de la tensión de ensayo
- Tabla 4-1 – Valores del factor de separación para impulsos tipo rayo de polaridad positiva teóricos y obtenidos experimentalmente
- Tabla 4-2 – Tabla comparativa de los factores  $K_{ff} +$  calculados por las dos expresiones (4.4) y (4.6), junto con los errores respecto al valor calculado por los ensayos experimentales
- Tabla 4-3 – Valores del factor de separación calculados a partir de la nueva fórmula (4.6) y ponderando los cálculos de los resultados experimentales realizados con las expresiones (4.4) y (4.6).

- Tabla 4-4 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo, *k factor*, para la configuración mostrada en la Figura 4-1 correspondiente a la configuración punta-plano, descrita en el apartado 4.1.1.
- Tabla 4-5 – Valores medios de las funciones de tensión de ensayo asociados a diferentes amplitudes de sobretensión relativa  $\beta'$  y amortiguamientos de la oscilación  $\delta$  y correspondientes a la configuración de ensayo punta-plano, descrita en 4.1.1
- Tabla 4-6 - Valores de la función de tensión de ensayo para campos no homogéneos (factor de separación  $K \sim 1$ ): a) P.E.: datos recogidos del proyecto europeo {2}, b) Configuración punta-esfera con valores recogidos en el apartado 4.1.2 y c) Configuración punta-plano con valores recogidos en el apartado 4.1.1.
- Tabla 4-7 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para campos eléctricos no homogéneos con factores de separación  $K \sim 1$ ,  $K = 1,18$ ;  $K = 1,42$  y  $K = 1,32$  correspondiente a las configuraciones de ensayo de los apartados 4.1.1, 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5.
- Tabla 4-8 – Tabla resumen de los resultados de ensayo para campos no homogéneos con factor de separación  $K \sim 1$ .
- Tabla 4-9 – Expresiones de la función de tensión de ensayo ajustadas a los valores experimentales obtenidos para diferentes distancias de aire con  $K \sim 1$ .
- Tabla 4-10 - Expresión de la función de tensión de ensayo que se ajustan a los valores experimentales obtenidos para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

---

Fotografía 4-1 – Montaje de ensayo experimental para la configuración punta-esfera, correspondiente a la Instalación 2G.

Fotografía 4-2 - Configuración de ensayo formada por una esfera y cilindro-plano,  $K=1,18$ , con distancia de separación entre electrodos,  $d= 1,5$  m.

Fotografía 4-3 – Configuración de ensayo formada por un conductor y cilindro-plano,  $K= 1,42$ , con distancia de separación libre en aire,  $d=1,5$  m.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN, PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

---

### **1 INTRODUCCIÓN, PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS**

#### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Durante los últimos años, el aumento de las tensiones de servicio en las líneas de transmisión de energía eléctrica ha requerido un enorme desarrollo en las técnicas de alta tensión mediante la introducción de nuevas tecnologías y materiales aislantes, el cálculo preciso de los campos eléctricos presentes así como el conocimiento del fenómeno dieléctrico junto con el proceso de la descarga disruptiva bajo la influencia de los campos eléctricos. No obstante la ingeniería de la alta tensión tiene cierto componente empírico basado en experimentos, verificaciones y ensayos de las hipótesis, simulaciones y cálculos realizados.

Para la verificación del correcto diseño de las instalaciones eléctricas de alta tensión, en cuanto a la correcta coordinación del aislamiento se refiere, es necesario realizar ensayos y verificaciones que evidencien que

un determinado componente de la instalación es capaz de soportar, en régimen permanente de utilización y en régimen transitorio, el conjunto de solicitaciones dieléctricas que sean representativas de las tensiones y sobretensiones en servicio.

Las solicitaciones de tensión que pueden aparecer en las redes o instalaciones de alta tensión están clasificadas por diferentes parámetros como la duración y la forma de la sobretensión y el efecto sobre el aislamiento. La configuración del campo eléctrico entre las partes en tensión y otras partes en tensión o estructuras próximas puestas a potencial de tierra influye en que una determinada sobretensión sea o no soportada, para una misma distancia de separación entre partes a distinto potencial.

Las causas de dichas solicitaciones son las siguientes:

- Tensiones permanentes, normalmente de frecuencia industrial de la red, consecuencia de la explotación de la red en condiciones normales de funcionamiento.
- Sobretensiones temporales, originadas por faltas, pérdidas de carga y maniobras de interruptores y/o seccionadores que pueden desencadenar condiciones de resonancia o ferorresonancia.
- Sobretensiones transitorias de frente lento, originadas por faltas, maniobras o descargas de rayo sobre los conductores de las líneas aéreas alejadas del equipo a proteger ubicado en la subestación.
- Sobretensiones de frente rápido, originadas por maniobras, descargas directas de rayo o faltas.
- Otras sobretensiones combinadas, que son una combinación de todas las anteriores.

Las normas de coordinación de aislamiento, elaboradas por la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission – IEC) dentro de la serie IEC 60071, especifican los procedimientos de selección de las tensiones soportadas asignadas al aislamiento (fase-fase, fase-tierra) y a los materiales de las instalaciones. Dichas tensiones soportadas se deben asociar a los valores de tensión más elevada del material, sin que éstas tengan que ver con la seguridad de las personas.

En general, todos los tipos de sobretensión pueden encontrarse en las dos gamas de tensión normalizadas (I y II). Sin embargo, la experiencia demuestra que ciertos tipos de sobretensión tienen mayor importancia en una gama que en otra. De hecho, para materiales de tensión más elevada menor o igual de 245 kV (Gama I), el conjunto de valores normalizados que definen el nivel de aislamiento son las tensiones soportadas a frecuencia industrial y a impulsos tipo rayo, mientras que para materiales de más de 245 kV (Gama II), son las tensiones soportadas a impulsos tipo maniobra y tipo rayo las que lo definen. Por lo tanto, cualquier material independientemente de su nivel de tensión debe ser capaz de soportar una tensión normalizada con forma de onda tipo rayo.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

Los ensayos para comprobar que los aislamientos y los equipos de alta tensión satisfacen los niveles de tensión soportada se realizan en laboratorios de alta tensión utilizando técnicas de ensayo comunes y normalizadas, que garantizan la reproducibilidad de los mismos en otros laboratorios de ensayo que utilicen diferentes procedimientos o tengan condiciones distintas. Para conseguir este objetivo es necesario que las normas que tratan la ejecución de los ensayos, definan perfectamente como evaluar los resultados obtenidos en el laboratorio.

Para los niveles de tensión encuadrados dentro de la Gama I de niveles de aislamiento, se puede generalizar que el valor de cresta de la tensión soportada a impulsos tipo rayo es superior a la correspondiente a frecuencia industrial, por lo que la tensión soportada a los impulsos tipo rayo es el parámetro más característico para evaluar la coordinación de aislamiento en las instalaciones de alta tensión, condicionando por lo tanto los resultados de los ensayos. Si el valor de la tensión soportada calculada por los ensayos, cuando en los impulsos aplicados existen oscilaciones superpuestas y se aplican los procedimientos de cálculo normalizados {18} y {24}, resulta inferior al valor real correspondiente a una determinada configuración de ensayo, puede llegarse a que dicha tensión soportada sea inferior al valor real correspondiente a dicha

configuración por lo que una aparamenta o material en concreto puede ser aceptada con un valor de aislamiento inferior al que le debería corresponder.

Pequeñas diferencias en los niveles de tensión soportada, pueden obligar a cambios de diseño o fabricación de los materiales y por ende de las instalaciones, pudiendo por lo tanto, tener repercusiones económicas muy importantes. Por otra parte, si distintos materiales instalados en la misma red eléctrica se han ensayado siguiendo criterios diferentes, se puede poner en peligro la propia coordinación de aislamiento de toda la red y en definitiva la fiabilidad de las mismas.

Cuando los instrumentos de medida más evolucionados permiten una mejor definición de las ondas de tensión aplicadas a los aislamientos, se ponen de manifiesto varios problemas asociados a su evaluación {7} y por medio de estudios realizados entre los principales laboratorios de ensayo europeos, se provocó la modificación de los procedimientos para la evaluación de las sobretensiones de frente rápido (tipo rayo) que presentaban oscilaciones. Las nuevas ediciones de la norma IEC 60060-1 de 2010 {18}, así como de la IEEE Std 4 de 2013 {24}, introdujeron la función de la tensión de ensayo, *k factor*, que permitía variar la elección del valor de tensión de ensayo a utilizar de una forma gradual y dependiente de la frecuencia de la oscilación (según se muestra gráficamente en la Figura 1-1), en lugar de lo que se realizaba anteriormente que consistía en considerar o no las oscilaciones existentes en el impulso con oscilaciones por el simple hecho de tener una frecuencia de oscilación mayor o menor de un valor “mágico” de 0,5 MHz.

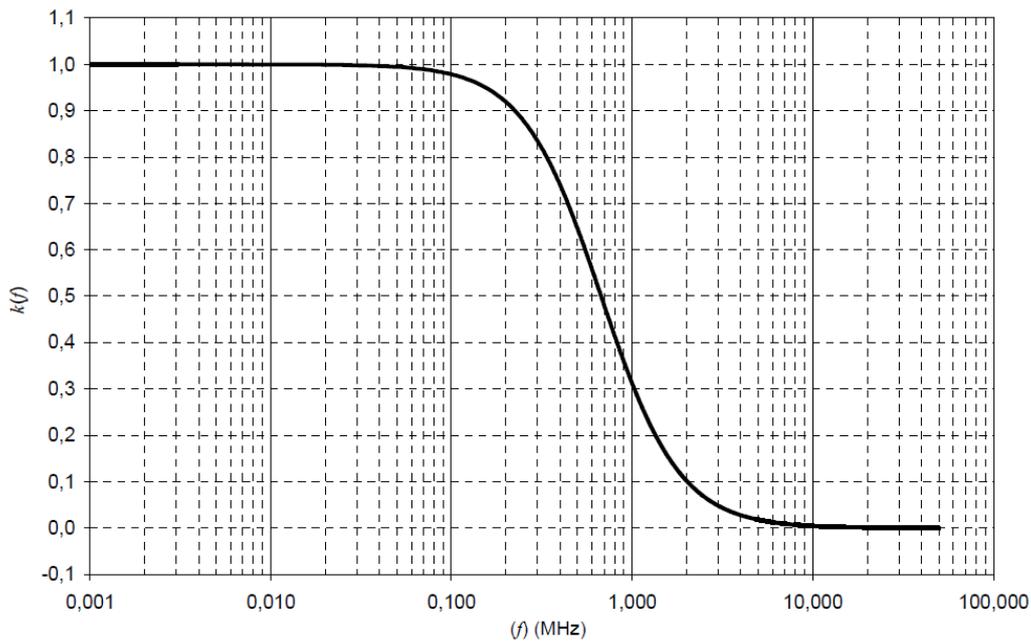


Figura 1-1 – Función de la tensión de ensayo definida en las nuevas ediciones de la norma IEC 60060-1 y de la IEEE Std 4, para representar la respuesta de los aislamientos a impulsos con oscilaciones superpuestas (sobretensión)

No obstante, existen muchos parámetros adicionales que se deben tener en consideración cuando se aplica la función de la tensión de ensayo definida en las nuevas ediciones de las normas.

Entre los principales se encuentran:

- a) Los parámetros que definen la configuración eléctrica: el medio dieléctrico, la distancia libre de aire entre los electrodos y uniformidad del campo eléctrico.
- b) Los parámetros del impulso tipo rayo: la polaridad del impulso, la tensión máxima  $U_e$ , el amortiguamiento de la oscilación, la frecuencia de las oscilaciones o la amplitud de la sobreoscilación.
- c) Las condiciones atmosféricas durante el ensayo: la temperatura, la presión y la humedad del aire, cuya influencia en los impulsos con oscilaciones no está suficientemente demostrada en los factores definidos actualmente.

Con objeto de conocer y poder evaluar la influencia de estos y otros parámetros en el valor normalizado de la función de la tensión de ensayo, se inició el presente trabajo de investigación y posterior tesis doctoral, que se ha desarrollado como continuación a los trabajos previos que, durante el periodo de 1997 hasta 2000, condujeron a la propuesta de modificación de la norma IEC 60060-1 y que partió del grupo de trabajo WG33 de la CIGRÉ en colaboración con el TC 42 de IEC, los cuales fueron abordados en la tesis doctoral “Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión”, presentada y defendida por P. Simón Comín en 2004 {44} y de la que la presente tesis parte como uno de los trabajos sugeridos.

Adicionalmente, la influencia del factor de separación  $K$  (conocido en la literatura en inglés como “air gap factor”) y que es un parámetro que define la uniformidad u homogeneidad del campo eléctrico presente en una configuración de aislamiento de aire, no ha sido suficientemente analizada en los estudios experimentales con diferentes tipos de aislamiento (SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, Aceite, papel impregnado, aire) debido a que resulta mucho más condicionante en el caso de aislamientos realizados con grandes separaciones de aire, necesarios para los niveles de la tensión más elevados de la apartamenta. En este caso los valores de las tensiones soportadas tanto a impulsos rápidos (tipo rayo) como impulsos lentos (tipo maniobra) pueden estimarse o calcularse en función de la distancia de separación, del factor de separación y de la configuración de los electrodos así como, de la desviación típica del fenómeno de la descarga disruptiva en una determinada configuración.

El trabajo experimental considerado en la presente tesis, ha tenido un desarrollo temporal comprendido entre 2008 y 2014 y ha sido presentado tanto en el grupo de trabajo D1-WG36 de la CIGRÉ, así como en dos publicaciones en IEEE Transactions on Power Delivery, en 2013 y 2014.

### 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo de investigación incluido en la presente tesis doctoral se ha dividido en tres fases principales que están detalladas en los tres capítulos centrales del trabajo:

La primera fase que es claramente descriptiva, corresponde con el Capítulo 2 y se ha realizado como un estudio bibliográfico y de introducción sobre la generación, medida y tratamiento de los impulsos de tensión tipo rayo, sobre los comportamientos de los aislamientos y de los mecanismos dieléctricos y de la descarga, describiendo los parámetros que pueden influenciar la tensión disruptiva en los aislamientos autorregenerables consistentes en grandes distancias libres de aire.

Los principales aspectos considerados durante esta fase, han sido los siguientes:

- Análisis de los diferentes métodos y procedimientos para la generación y posterior evaluación de los impulsos tipo rayo junto con los parámetros de influencia sobre la tensión disruptiva en los aislamientos.
- Descripción de los cálculos de la rigidez dieléctrica de las distancias en el aire a partir de datos experimentales.
- Análisis de los métodos estadísticos para el tratamiento de los resultados de los ensayos y de su aplicación con la nueva función de tensión de ensayo introducida por las nuevas ediciones de las normas de técnicas de ensayo en alta tensión.

La segunda fase ya más experimental, se incluye en el Capítulo 3 y se ha realizado para elaborar la propuesta de procedimiento para la determinación de la función de la tensión de ensayo para distancias de aire, siendo los principales hitos los siguientes:

- Descripción y análisis de los montajes de ensayo (instalaciones de generación de impulsos) con los que se pueda generar a demanda, los impulsos de tensión que permitan obtener resultados reproducibles en diferentes configuraciones de ensayo. Consecuentemente, se determinará el valor de la función de la tensión de ensayo en diferentes situaciones.
- Elaboración de un procedimiento para la determinación del valor de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, tanto en situaciones de campo homogéneo como de campo no homogéneo.
- Realización de ensayos experimentales de aplicación del procedimiento descrito aplicando los métodos normalizados y estadísticos, en configuraciones de ensayo de campo homogéneo y campo no homogéneo.

En la tercera y última fase, correspondiente al Capítulo 4, se ha comprobado que el planteamiento normativo de la función de la tensión de ensayo no es el adecuado para grandes distancias de aire y cuando se consideran configuraciones en las que el campo eléctrico es no-homogéneo, procediéndose a determinar una estimación y propuesta, basada en resultados experimentales, de la función de tensión de ensayo para los impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas, en espacios de aire sometidos a campos no homogéneos. En particular, los hitos principales han sido:

- Selección de las configuraciones de ensayo adecuadas para la obtención de resultados experimentales que pudieran demostrar los valores reales de la función de tensión de ensayo, *k factor*.
- Determinación experimental del factor de separación  $K$  mediante el ensayo con impulsos tipo maniobra y su comprobación, en las configuraciones ensayadas, de su relación con el factor correspondiente a impulsos rápidos.
- Generalización de la función de tensión de ensayo para las configuraciones seleccionadas y análisis de su dependencia de la distancia de aire y del factor de separación.

Finalmente, el Capítulo 5 incluye las conclusiones del trabajo en forma de propuesta de un procedimiento estructurado para determinar la función de la tensión de ensayo basado en funciones de probabilidad de descarga, así como una generalización de la función de la tensión de ensayo, enumerando las principales aportaciones de la tesis y sugerencias sobre futuros trabajos.



## CAPÍTULO 2

# LAS SOLICITACIONES DIELECTRICAS EN LOS AISLAMIENTOS Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA VERIFICACIÓN

---

### **2 LAS SOLICITACIONES DIELECTRICAS EN LOS AISLAMIENTOS Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA VERIFICACIÓN**

En España, el Reglamento de Instalaciones de alta tensión {29} y el Reglamento de líneas de alta tensión {30} establecen, para la coordinación de aislamiento de la aparamenta, normas de obligado cumplimiento para determinar los criterios de diseño de instalaciones y en particular definen los valores de tensiones de ensayo que deben soportar los diferentes aislamientos. Cuando se trata de aislamientos externos en el aire a presión atmosférica, se establecen de forma alternativa a los valores de las tensiones de ensayo, distancias libres de separación en el aire.

Para verificar el adecuado diseño de la aparamenta utilizada en las líneas y las instalaciones de alta tensión, es necesario realizar ensayos que evidencien que los aislamientos soportan las solicitaciones de tensión representativas de las condiciones de servicio.

Las solicitaciones de tensión que pueden aparecer en las redes o instalaciones de alta tensión están clasificadas por diferentes parámetros como la duración y la forma de la sobretensión y el efecto sobre el aislamiento. La configuración del campo eléctrico entre las partes en tensión y otras partes en tensión o estructuras próximas puestas a potencial de tierra influye en que una determinada sobretensión sea o no soportada, para una misma distancia de separación entre partes a distinto potencial.

Las causas de dichas solicitaciones son las siguientes:

- Tensiones permanentes (a frecuencia industrial), originadas por la explotación de la red en condiciones normales de funcionamiento.
- Sobretensiones temporales, originadas por faltas, pérdidas de carga y maniobras de interruptores y/o seccionadores que pueden desencadenar condiciones de resonancia o ferresonancia.
- Sobretensiones transitorias de frente lento, originadas por faltas, maniobras o descargas de rayo sobre los conductores de las líneas aéreas alejadas del equipo a proteger ubicado en la subestación.
- Sobretensiones de frente rápido, originadas por maniobras, descargas directas de rayo o faltas.
- Otras sobretensiones combinadas que son una combinación de todas las anteriores.

## **2.1 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN SOPORTADA Y DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA DE LOS MEDIOS AISLANTES - PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LA TENSIÓN DISRUPTIVA**

En la práctica las sobretensiones de frente rápido son normalmente causadas por caída directa del rayo sobre los conductores de fase, por cebado inverso o por acoplamiento inducido al descargar el rayo a tierra en las proximidades a las líneas. Las ondas tipo rayo inducidas, generalmente producen sobretensiones inferiores a 400 kV en la línea aérea y por consiguiente solo deben tenerse en cuenta en los sistemas eléctricos de la gama inferior de tensión (gama I), es decir, hasta una tensión más elevada del material de 245 kV. Debido a la elevada soportabilidad del aislamiento, los cebados inversos son menos probables en gama II que en gama I y son raros en sistemas de 500 kV y superiores {21}.

En esta gama de tensión (gama I), las sobretensiones que deben soportar los equipos y materiales de alta tensión se han normalizado mediante la tensión soportada a frecuencia industrial y la tensión soportada a impulsos tipo rayo, mientras que para la gama superior de tensión más elevada del material (gama II, superior a 245 kV), se han normalizado por la tensión soportada a impulsos tipo rayo y la tensión soportada a impulsos tipo maniobra.

La Tabla 2-1, incluida en la ITC-RAT-12 del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29} y que es prácticamente igual a la tabla correspondiente a los valores de tensión soportada a frecuencia industrial e impulsos tipo rayo para la Gama I de la norma IEC 60071-1 {20}, muestra los niveles de aislamiento nominales para los materiales, incluyendo también las distancias de aislamiento mínimas en aire entre fases y entre fase y tierra, generalizados para cualquier tipo de configuración de campo eléctrico, que serán los valores a tener en cuenta en el estudio de los aislamientos de aire de esta tesis.

TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (Um) (kV eficaces)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV eficaces)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO RAYO (kV de cresta)	Distancia mínima de aislamiento en aire fase a tierra y entre fases (mm)
52	95	250	480
72,5	140	325	630
123	185	450	900
	230	550	1100
145	185	450	900
	230	550	1100
	275	650	1300
170	230	550	1100
	275	650	1300
	325	750	1500
245	325	750	1500
	360	850	1700
	395	950	1900
	460	1050	2100

Tabla 2-1 - Valores de tensión soportada a frecuencia industrial e impulsos tipo rayo para la Gama I, del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29} y de la norma IEC 60071-1 {20}

Asimismo, cuando la tensión más elevada del material es superior o igual a 420 kV, se definen los niveles de aislamiento de gama II y se normalizan los valores de tensión soportada a impulsos tipo rayo (frente rápido) e impulsos tipo maniobra (frente lento) que los equipos y materiales deben soportar y que caracterizan los distintos tipos de sobretensiones que aparecen para este nivel de tensión.

Es posible demostrar a través de la relación que liga la tensión soportada a frecuencia industrial o a impulso tipo rayo con la distancia mínima de aislamiento en el aire, que es la tensión soportada a impulsos tipo rayo la que condiciona el valor de esta distancia mínima {14}.

La Tabla 2-2, tomada de la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-1 {20}, establece los valores de tensión soportada a impulsos tipo rayo (de frente rápido) y a impulsos tipo maniobra (frente lento) para las diferentes tensiones más elevadas del material de alta tensión por encima de 300 kV, que se encuadran en la gama II.

**LAS SOLICITACIONES DIELECTRICAS EN LOS AISLAMIENTOS Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA VERIFICACIÓN**

Tensión más elevada del material $U_m$ kV (valor eficaz)	Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo maniobra			Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo <sup>b</sup> kV (valor de cresta)
	Aislamiento longitudinal <sup>a</sup> kV (valor de cresta)	Fase a tierra kV (valor de cresta)	Fase-fase (relación con el valor de cresta fase-tierra)	
300 <sup>c</sup>	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 050
				1 175
420	850	850	1,60	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 175
				1 300
	950	1050	1,50	1 300
				1 425
550	950	950	1,70	1 175
				1 300
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
800	1 175	1 300	1,70	1 425
				1 675
	1 175	1 425	1,70	1 800
				1 950
1 175 1 300	1 550	1,60	1 950	
			2 100	

Tabla 2-2 - Valores de tensión soportada a impulsos tipo maniobra e impulsos tipo rayo para la Gama II, incluida en la norma IEC 60071-1 {20}.

En el Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29}, la tabla anterior se simplifica (ver Tabla 2-3) considerando exclusivamente las tensiones más elevadas del material de valor 420 kV, que es la única utilizada en España por encima de 245 kV. La tabla contiene también las distancias mínimas de aislamiento en aire, fase a tierra y fase a fase para las configuraciones más comúnmente utilizadas.

TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (Um) kV (eficaces)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A IMPULSOS TIPO RAYO  1,2/50 μs kV (valor de cresta)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO MANIOBRA  Fase a tierra 250/2500μs kV (valor de cresta)	Distancia mínima de aislamiento en aire fase a tierra (mm)		TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO MANIOBRA  Entre fases 250/2500 μs kV (valor de cresta)	Distancia mínima de aislamiento en aire entre fases (mm)	
			Conductor/ estructura (mm) (*)	Punta/ estructura (mm) (*)		Conductor/ conductor (paralelos) (mm) (*)	Punta/ conductor (mm) (*)
420	1050	850	1900	2400	1360	2900	3400
	1175		2200				
	1175	950	2200	2900	1425	3100	3600
	1300		2400				
	1300 1425	1050	2600	3400	1575	3600	4200

(\*) Las configuraciones "punta-estructura" y "punta-conductor" son las más desfavorables que normalmente puede encontrarse; las configuraciones "conductor-estructura" y "conductor-conductor (paralelos) cubren un amplio campo de configuraciones normales y resultan menos desfavorables que las anteriores.

Tabla 2-3 - Valores de tensión soportada a impulsos tipo rayo y a impulsos tipo maniobra para el Grupo C, del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión {29}

En este sentido y a la vista de la Tabla 2-3 anterior se puede comprobar que para cualquier distancia de aislamiento en el aire fase-tierra y para una configuración del campo eléctrico (configuraciones conductor-estructura, punta-estructura), la tensión soportada a impulsos tipo maniobra (de duración hasta el valor mitad de 2500 μs) es siempre inferior a la tensión soportada para impulsos tipo rayo (de duración aproximada hasta el valor mitad de 50 μs).

Además, también es posible demostrar a través de la relación que liga la tensión soportada con la distancia de aislamiento en el aire, que para cada combinación de valores reglamentarios de tensión tipo rayo y tipo maniobra, el valor de la tensión soportada a impulso tipo maniobra exige una mayor distancia de aislamiento libre en aire {14}.

### 2.1.1 INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DEL AISLAMIENTO DEL OBJETO EN ENSAYO

La tensión soportada por un medio dieléctrico con una configuración de campo eléctrico no uniforme (no homogéneo) depende tanto del valor de cresta de la tensión aplicada como de su duración.

Las tensiones soportadas ( $U_w$ ) a impulsos tipo rayo (1,2/50  $\mu$ s) y a impulsos tipo maniobra (250/2500  $\mu$ s) especificadas en las tablas de coordinación de aislamiento de la norma IEC 60071-1 y de los Reglamentos de alta tensión presentadas anteriormente (Tabla 2-1 a Tabla 2-3), se pueden calcular en función de la distancia en el aire  $d$ , del factor de separación  $K$  y de la desviación típica  $s$  de la función de probabilidad de la descarga disruptiva, considerada gaussiana, a través de diferentes expresiones experimentales y que se justifican a continuación. El factor de separación  $K$ , depende de la homogeneidad del campo eléctrico.

El comportamiento del aislamiento de aire bajo solicitaciones de frente lento (tipo maniobra), presenta una tensión soportada significativamente más baja que frente a solicitaciones de frente rápido (tipo rayo) de la misma polaridad.

Como resultado de los numerosos ensayos de impulsos tipo maniobra [Anexo G de la IEC 60071-2] {21}, se pone de manifiesto que la tensión soportada para una misma distancia de aislamiento  $d$ , depende de la configuración de campo eléctrico (características geométricas de la distancia y configuración de los electrodos) siendo entre todas las ensayadas, la configuración punta-estructura, también denominada "punta-plano", la que soporta una menor tensión ya que representa una configuración de campo eléctrico marcadamente no homogéneo. Esta configuración se denota por sus siglas en inglés "RP" (rod-plane)

Para distancias en el aire de hasta 25 m (gama de tensiones más elevadas de material de 420 kV o más), la tensión soportada a impulso de

---

frente lento, tipo maniobra (250/2500), para una configuración punta-plano, viene dada por la expresión:

$$U_{50RP}(250/2500) = 500 \cdot d^{0,6} \quad (2.1)$$

En lo relativo a las solicitaciones de frente rápido, tipo rayo (1,2/50), la tensión soportada por los aislamientos de aire ante los impulsos de polaridad negativa, para una configuración de campo no uniforme (punta-plano) es mucho mayor que con polaridad positiva. La explicación de este comportamiento se realiza porque, aunque la descarga se inicia en el electrodo con campo eléctrico más intenso, es decir, en la punta, existe una distorsión del campo eléctrico por el efecto de la carga espacial, y esta distorsión es distinta según la polaridad aplicada al impulso. La carga espacial que resulta de la posición relativa de los electrones y de los iones positivos es distinta según la polaridad debido a la diferente movilidad de iones y electrones, de forma que el campo eléctrico en la zona de propagación del arco se refuerza cuando la punta hace de ánodo (para un impulso de polaridad positiva), pero disminuye cuando la punta hace de cátodo (para un impulso de polaridad negativa). Además, cuando se representa la tensión soportada en función de la distancia en el aire, resulta ser no lineal para polaridad negativa, mientras que para polaridad positiva, sí que resulta lineal. Consecuentemente, los impulsos de polaridad positiva son más críticos en la evaluación de la soportabilidad de los aislamientos.

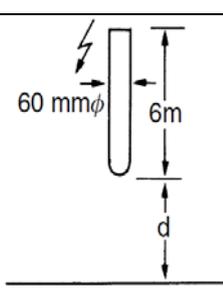
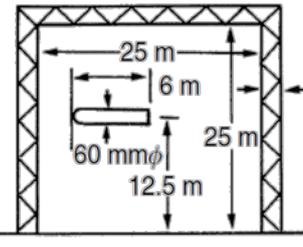
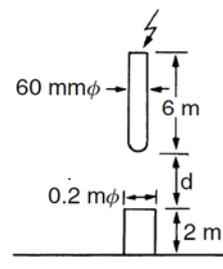
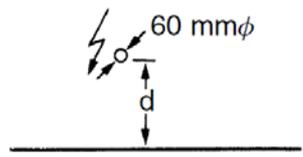
Los datos experimentales para tensión soportada en polaridad positiva, dados en el Anexo G de {20} y que están basados en los trabajos {5} y {6}, se aproximan por la expresión:

$$U_{50RP}(1,2/50) = 530 \cdot d \quad (2.2)$$

Cuanto más homogéneo es el campo eléctrico mayor es la tensión soportada, de modo que este efecto se caracteriza mediante el factor de separación  $K$ , que depende no solo del campo eléctrico de la

---

configuración sino también del tipo de forma de onda de la sobretensión. Dicho factor de separación que para impulsos tipo maniobra toma el valor de la unidad en la configuración de referencia punta-plano, fue estudiado exhaustivamente en {41}, tomando los valores aproximados indicados en la Tabla 2-4, para diferentes configuraciones geométricas indicadas en las figuras, según se cita en {26}:

Configuración	Factor de separación $K$
	Punta-plano  1
	Punta-estructura  1,08 – 1,06
	Punta – estructura inferior  1,27 – 1,14
	Conductor – plano  1,08 – 1,25

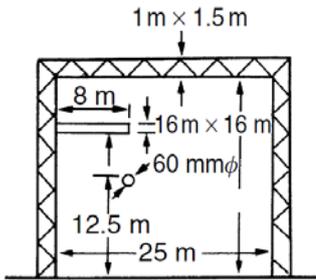
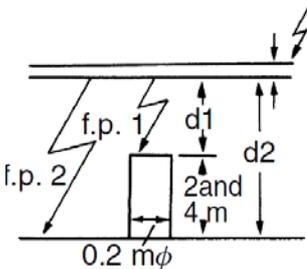
Configuración	Factor de separación $K$
	<p>Conductor-estructura</p> <p>1,68 – 1,54</p>
	<p>Conductor – estructura inferior</p> <p>1,47 – 1,25</p>

Tabla 2-4 – Valores típicos del factor de separación  $K$ , para diferentes configuraciones de campo eléctrico reales, presentes en las instalaciones de alta tensión

De forma general, los factores de separación aplicables a impulsos tipo maniobra no son directamente utilizables para la tensión soportada a impulsos de frente rápido (tipo rayo). No obstante los resultados experimentales han demostrado que para impulsos tipo rayo de polaridad positiva, el gradiente de ruptura para una configuración punta-plano aumenta linealmente con el factor de separación para impulsos de frente lento o tipo maniobra, de polaridad positiva. Por tanto, el factor de separación  $K_{ff}^+$  para impulsos tipo rayo de polaridad positiva se puede expresar en función del factor de separación  $K$  para impulsos de frente lento tipo maniobra, por la siguiente expresión:

$$K_{ff}^+ = 0,74 + 0,26 K \quad (2.3)$$

Esta expresión que está basada en resultados experimentales, también está en discusión pues los valores del factor de separación para impulsos

tipo rayo que se han obtenido en la presente tesis, hacen sospechar que aunque la variación sigue siendo lineal, los coeficientes de la recta para distancias de aire con factores de separación mayores que la unidad no se ajustan completamente a los expresados. En el capítulo 4 se mostrarán y discutirán los valores obtenidos y la estimación de la relación lineal obtenida.

Para otras configuraciones de ensayo diferentes a la de punta-plano, la expresión de la tensión del 50% de probabilidad de descarga  $U_{50}$ , viene dada, en función del factor de separación  $K$ , por las ecuaciones siguientes:

$$U_{50}(250/2500) = K \cdot U_{50RP}(250/2500) \quad (2.4)$$

para impulsos tipo maniobra, y

$$U_{50}(1,2/50) = K_{ff}^+ \cdot U_{50RP}(1,2/50) \quad (2.5)$$

para impulsos tipo rayo.

Por otro lado, para tensiones de descarga de 50 % en tensiones fase-fase, la desviación típica de la distribución de probabilidad gaussiana varía típicamente, entre 0,02 y 0,06, mientras que para tensiones de descarga 50% entre fase-fase toma un valor típico de 0,055.

Para los aislamientos autorregenerables, el valor de la tensión soportada  $U_w$  corresponde con la tensión del 10% de probabilidad de descarga y al considerar una distribución de probabilidad Gaussiana, el valor de tensión soportada 10%, viene expresado en función de la tensión del 50 %, por:

$$U_w = U_{10} = U_{50} - 1,3 \cdot s \quad (2.6)$$

siendo  $s$ , la desviación típica de la función de probabilidad de la descarga disruptiva.

Es decir, operando las ecuaciones anteriores, para impulsos tipo rayo:

$$U_{10}(1,2/50) = (1 - 1,3 \cdot s) \cdot (0,74 + 0,26 K) \cdot 530 \cdot d \quad (2.7)$$

Y para impulsos tipo maniobra:

$$U_{10}(250/2500) = (1 - 1,3 \cdot s) \cdot K \cdot 500 \cdot d^{0,6} \quad (2.8)$$

En consecuencia, cuando se utiliza como aislamiento el aire a presión atmosférica, los valores dados en las normas de coordinación de aislamiento IEC 60071-1 {20}, evidencian que, para cualquier nivel de tensión, cuanto mayor sea el valor de cresta de la tensión soportada mayor será la distancia libre en aire exigida en caso de no poderse efectuar el ensayo de tensión soportada a impulsos en un equipo o instalación.

Si se utilizan las formulas anteriores para determinar la distancia mínima de separación y se compara con las distancias mínimas dadas en las tablas de valores de tensión soportada (Tabla 2-1) para gama I de la norma de coordinación de aislamiento IEC 60071-1 o para Grupo B del Reglamento de instalaciones eléctricas de alta tensión, se observa que corresponden con las distancias calculadas para la tensión soportada a los impulsos tipo rayo, y no con las distancias correspondientes a la tensión soportada a frecuencia industrial. Esto quiere decir que, en los ensayos de tensión soportada de las instalaciones eléctricas, de materiales de alta tensión, hasta 245 kV de tensión más elevada del material, el parámetro crítico será la tensión soportada a impulsos tipo rayo, por lo que resulta de gran importancia para una adecuada coordinación de aislamiento, determinar de una manera exacta la tensión

de ensayo a la que se somete la aparamenta, tratando de conseguir, independientemente de la forma de onda, la misma severidad de ensayo.

### 2.1.2 INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO DIELECTRICO DE DIFERENTES MEDIOS AISLANTES

En este apartado se expone la influencia de la forma de onda de los impulsos tipo rayo en la tensión disruptiva de distintos medios aislantes que están basados en diferentes estudios y publicaciones realizados sobre el comportamiento de la descarga. La búsqueda bibliográfica se ha limitado al análisis del impulso de tensión cuando está deformado por oscilaciones o sobretensiones superpuestas, o bien cuando se exceden las tolerancias normativas especificadas para el tiempo de frente,  $T_1$ , y para el tiempo de cola  $T_2$ .

Se presentan de forma resumida, el conjunto de métodos propuestos en la bibliografía para evaluar el comportamiento dieléctrico de distintos medios aislantes frente a impulsos normalizados o no normalizados. Dichos métodos se agruparán en dos grupos: los métodos teóricos que analizan la física del arco, la evaluación del tiempo de retardo y la integración del efecto disruptivo y los métodos experimentales que obtiene correlaciones directas empíricas.

Los métodos teóricos han sido ampliamente estudiados para el aire y en menor medida para otros aislamientos como los gases (hexafluoruro de azufre, SF<sub>6</sub>) o el aceite. Los métodos experimentales se van a enfocar hacia el comportamiento de aislamientos autorregenerables como es el aire y que será objeto de esta tesis.

#### 2.1.2.1 Métodos teóricos

##### a) Método de la física del arco

En la bibliografía analizada {39}, {40} y {46}, se realiza un estudio detallado del proceso de ruptura de los gases, y evalúan el tiempo hasta

la descarga disruptiva,  $t_d$ , para una forma de onda determinada, como la suma de los tiempos necesarios para que se desarrollen los fenómenos físicos hasta la formación del arco.

Estos tiempos, que dependen de la forma de onda aplicada, son:

- tiempo hasta la aparición del efecto corona,  $T_i$ ,
- tiempo para la propagación de los caminos precursores del arco "streamer",  $T_s$ , y
- tiempo para la propagación del canal conductor "leader",  $T_l$ .

Por consiguiente, se puede expresar matemáticamente el tiempo total hasta que aparece la descarga, por la siguiente expresión:

$$t_d = T_i + T_s + T_l \quad (2.9)$$

El efecto corona tiene su inicio cuando la tensión,  $u(t)$ , alcanza un valor determinado  $U_i$ , que depende de la geometría del espacio de aire, de la distancia entre los electrodos entre los que se aplica el impulso y de la variación temporal de la tensión  $u(t)$ , que viene dada por la pendiente de dicha variación. Para un campo eléctrico no homogéneo,  $T_i$  es muy pequeño, ya que la tensión de inicio del efecto corona aparece a un nivel bastante menor que la tensión disruptiva para dicha configuración. Teniendo en cuenta que los impulsos tipo rayo tienen una fuerte pendiente inicial (tiempo hasta el valor de cresta del orden de 1,2  $\mu$ s), este efecto corona también se ve favorecido.

El tiempo de desarrollo del "streamer",  $T_s$ , comienza cuando termina  $T_i$ , es decir, cuando comienza la descarga del efecto corona. Su duración se puede evaluar asumiendo que su valor es inversamente proporcional a la relación entre el valor medio del campo eléctrico para la tensión aplicada de valor de cresta  $U$ , y el valor medio del campo eléctrico para una tensión de descarga disruptiva del 50%. Esto significa que el mayor valor de

tiempo de desarrollo del “streamer” ( $T_s$ ) se obtiene con una tensión aplicada igual a  $U_{50\%}$ , pero por el contrario, disminuirá con tensiones aplicadas de valor de cresta superior.

No obstante, como  $T_s$  es solamente una parte pequeña del tiempo total  $t_d$ , en muchos modelos se admite que la fase de desarrollo del “streamer”  $T_s$  termina en el instante en que valor medio del campo eléctrico alcanza el valor fijo  $E_0$ .

La fase del “leader” se inicia cuando la punta más avanzada del “streamer” llega hasta el electrodo negativo o de tierra. Su duración es el tiempo necesario para que el canal conductor cruce la distancia entre los electrodos. Para estimar la velocidad de propagación del “leader” se emplean distintos modelos, siendo uno de los más empleados el indicado en la expresión (2.10) según se indica por *PIGINI et al.* en {39}.

$$v(t) = 170 \cdot d \cdot e^{\left(0,0015 \frac{u(t)}{d}\right)} \left(\frac{u(t)}{x} - E_0\right) \quad (2.10)$$

donde:

- $v(t)$  velocidad de propagación del “leader” en m/s.
- $u(t)$  forma de onda de la tensión en kV, para el instante de tiempo  $t$ .
- $d$  separación entre electrodos en metros.
- $l$  longitud del “streamer” en metros para el instante de tiempo  $t$ .
- $x = d - l$  longitud no puentada por el “streamer” en metros.
- $E_0$  valor medio del campo eléctrico del 50% de probabilidad de descarga en kV/m.

La descarga disruptiva sólo se iniciará cuando  $u(t)$  alcance un valor de tensión,  $U_s$ , denominado tensión de ruptura estática. Según la ecuación (2.10), se debe cumplir que  $U_s = E_0 \cdot d$ , ya que para el instante inicial  $v = 0$  y  $x = d$ . En general, para que el canal progrese, se debe cumplir también que  $u(t) > E_0 \cdot x$ , ya que en caso contrario la velocidad de propagación sería negativa.

En la práctica es muy difícil conocer la multitud de parámetros adicionales de los que depende cada uno de estos tiempos, incluso en algunos estudios recopilatorios presentan cierta diferencia en la evaluación de los mismos, como es el caso de la “Guía para la evaluación de la rigidez dieléctrica de los aislamientos externos”, elaborada por el CIGRE {6}. Por otra parte,  $u(t)$  debe ser la tensión real aplicada al espacio entre electrodos no puentado por el “leader”, que no corresponde a la tensión externa real aplicada, ya que hay que tener en cuenta la caída de tensión en el “leader” durante su propagación. Todo ello hace que los métodos físicos de análisis del fenómeno sean más apropiados para la investigación de la física del arco, que para su utilización en los laboratorios de alta tensión durante la ejecución de los ensayos dieléctricos.

#### b) Método del tiempo de retardo

La física del arco pone de manifiesto que la forma de onda aplicada  $u(t)$  afecta al valor de cresta de la tensión disruptiva y que  $u(t)$  debe superar un cierto valor  $U_s$  para que se propague el “leader”. En caso contrario no se produce la descarga.

Por lo tanto, para que se inicie la descarga, debe existir al menos un electrón en el espacio de aire existente entre los electrodos. En el caso de tensión continua o alterna 50 Hz, no existe ningún problema para satisfacer esta condición. Sin embargo, con impulsos rápidos o de corta duración del tipo rayo, resulta difícil que exista un primer electrón disponible para iniciar la primera avalancha.

El tiempo que transcurre entre la aplicación de una tensión ( $U_s$ ), suficiente para producir la descarga y la aparición del primer electrón se denomina tiempo de retardo estadístico,  $t_s$ . La aparición de este primer electrón sigue habitualmente una distribución estadística, que explica y justifica la afirmación de que la descarga disruptiva tiene una fuerte naturaleza aleatoria. Después de la aparición de este primer electrón es necesario que transcurra un cierto tiempo de retardo para que se forme el arco y que se denomina tiempo formativo,  $t_f$ .

---

En la Figura 2-1 se representan estos tiempos de retardo, observándose que la descarga sólo se produce una vez transcurrido el tiempo total de retardo; dicho tiempo se divide en dos partes:  $t_r = t_s + t_f$

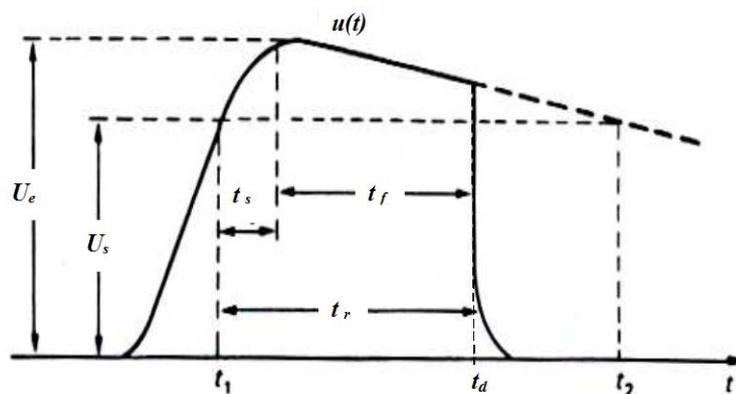


Figura 2-1 – Tiempos de retardo hasta la descarga disruptiva

El tiempo de retardo estadístico,  $t_s$ , depende de manera muy importante de la ionización del medio, es decir, de la irradiación y de la presión del gas existente entre los electrodos. Por ejemplo, según {43}, para el aire sin ionización artificial y a una atmósfera de presión (1,013 bar), su valor medio es del orden de 0,1  $\mu$ s, mientras que a presión mucho menor (1,33 mbar), toma un valor de 10  $\mu$ s. Un aumento artificial de la ionización del medio (por ejemplo, mediante irradiación externa con UV), ayuda a disminuir dicho tiempo de retardo estadístico.

Por otro lado, la separación entre electrodos y la no uniformidad del campo eléctrico hacen aumentar el tiempo de retardo formativo,  $t_f$ , mientras que dicho tiempo disminuirá al aumentar el valor de la sobretensión aplicada, definida como la diferencia entre la tensión de cresta del impulso aplicado y el valor de la tensión disruptiva estática.

$$\Delta U = \frac{U_e - U_s}{U_s} \text{ (p.u.)} \quad (2.11)$$

En la Figura 2-2, tomada de {26}, se representa el valor del tiempo de retardo para el aire a una presión comprendida entre 200 mm Hg (0,266 bar, equivalente aproximadamente al vacío) y 760 mm Hg (1,013 bar, correspondiente al aire a presión atmosférica), manteniendo la misma configuración del campo eléctrico y para cuatro distancias de aire entre electrodos, desde 0,3 cm hasta 1,4 cm.

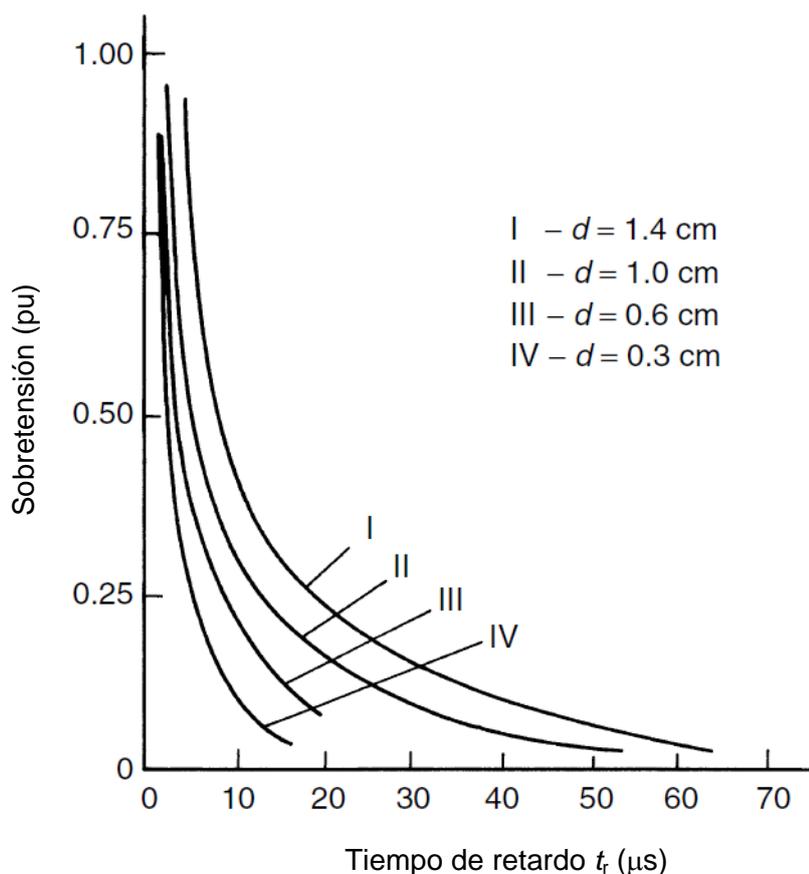


Figura 2-2 - Tiempo de retardo para el aire para cuatro separaciones entre electrodos

En la Figura 2-3, tomada de la referencia {43}, se representan los valores del tiempo de retardo formativo para dos gases dieléctricos con 1 bar de presión y en una configuración de campo eléctrico considerado cuasi homogéneo.

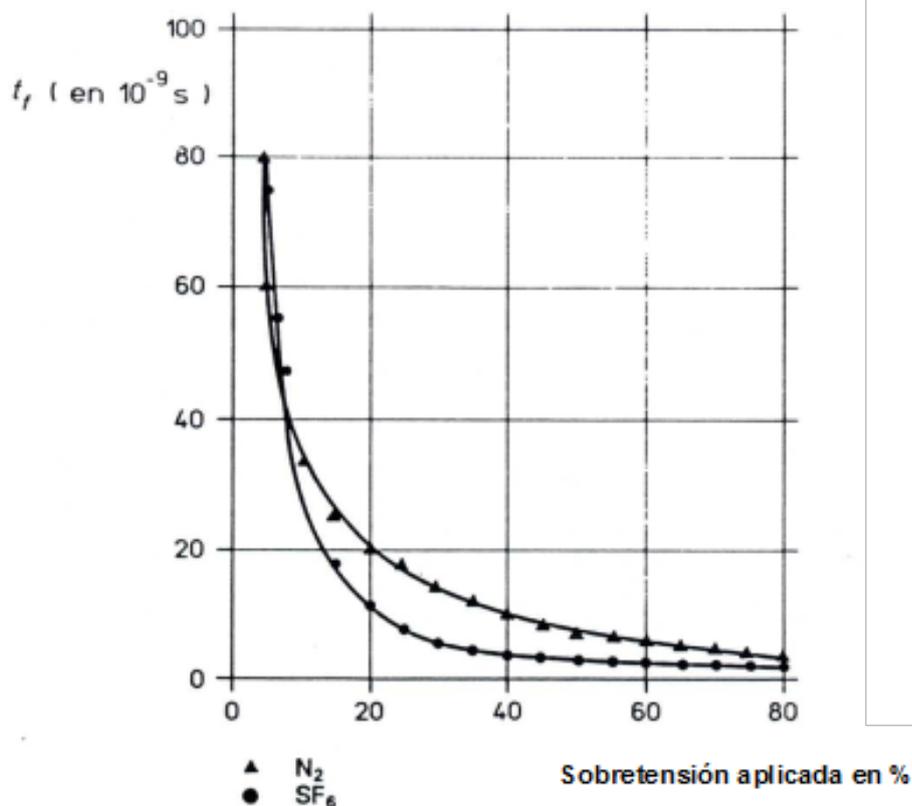


Figura 2-3 - Tiempo de retardo formativo para el  $N_2$  y  $SF_6$  a 1 bar y en presencia de campo cuasi homogéneo.

La teoría del tiempo de retardo se comprueba experimentalmente durante la determinación de las curvas tensión duración ( $V - t$ ). Estas curvas relacionan el valor de cresta del impulso, con el tiempo de cebado,  $t_d$ . Se obtienen aplicando tensiones de distintos niveles, pero con la misma forma de onda prevista y con valores de cresta previstos crecientes a partir de un mínimo aproximado de  $U_{10\%}$ .

En la Figura 2-4 se representa el procedimiento de construcción de las curvas ( $V - t$ ).

Comparando las curvas ( $V - t$ ) con la Figura 2-2 y la Figura 2-3, que representan el tiempo de retardo en función de la sobretensión, se observa una gran similitud entre ambas. La diferencia consiste en que las

curvas ( $V - t$ ) utilizan valores absolutos de tensión y de tiempo, mientras que las curvas de tiempo de retardo representan diferencias tanto en tensión como en tiempo.

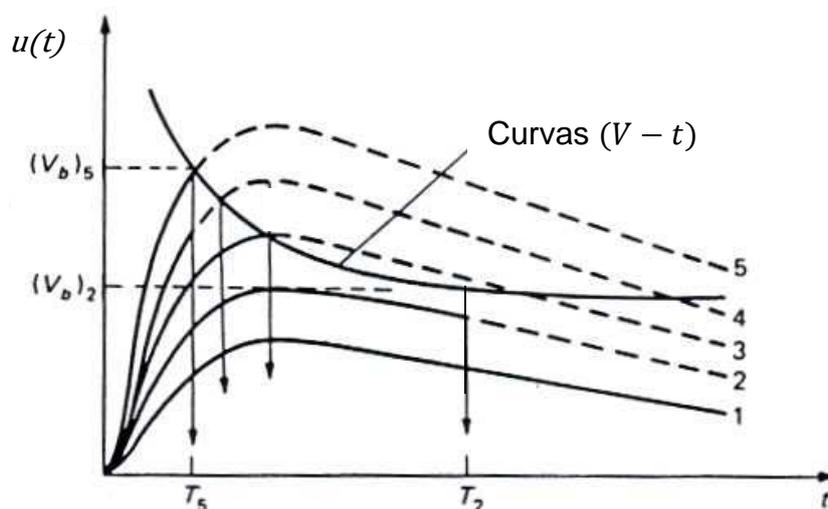


Figura 2-4 – Curvas tensión duración ( $V - t$ ), para impulsos tipo rayo.

c) Método de integración.

Uno de los métodos más utilizados para la evaluación de impulsos tipo rayo normalizados y no normalizados, iniciado por *KIND* {25} y desarrollado con más detalle por *ALSTAD* en {1}, se denomina método de la igualdad de áreas o, generalizando, el método del efecto disruptivo. Este método es aplicable con carácter general, a los medios dieléctricos gaseosos pues es el que mejor considera su comportamiento real. Este método se basa en un principio parecido al método de los tiempos de retardo.

La hipótesis de partida considerada en este método, es que la ruptura dieléctrica sucede cuando la integral denominada efecto disruptivo (DE), expresada por la ecuación (2.12), alcanza un valor fijo determinado, el cual depende de la configuración de campo eléctrico, de la polaridad del impulso aplicado y de la separación entre los electrodos.

$$DE = \int_{t_1}^{t_d} [u(t) - U_s]^n dt \quad (2.12)$$

En el caso de que  $n = 1$ , la integral anterior se transforma en el área del impulso por encima del valor  $U_s$  y se denomina área disruptiva (A).

$$A = \int_{t_1}^{t_d} [u(t) - U_s] dt \quad (2.13)$$

En la Figura 2-5 se representa gráficamente el área disruptiva (A).

El tiempo  $t_1$ , es el instante en que la forma de onda de tensión  $u(t)$  supera por vez primera el valor de la tensión disruptiva estática  $U_s$ . El instante  $t_d$ , representa el instante de ruptura o cebado.

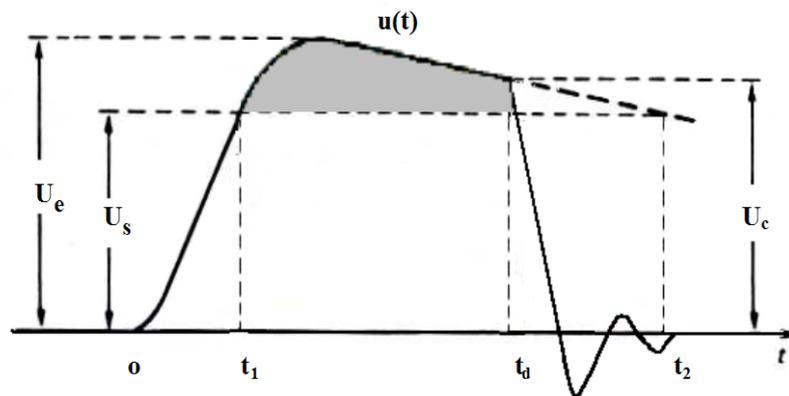


Figura 2-5 - Área disruptiva A, por encima del valor  $U_s$  dada por la ecuación (2.13)

Cuando la integral alcanza el valor del área disruptiva, se produce la descarga dieléctrica. Si la tensión  $u(t)$  no supera el valor de  $U_s$ , el cebado nunca se produciría. En este caso y siguiendo los razonamientos de los

métodos físicos, no se produce la descarga porque no se inicia la fase de propagación del canal conductor, ya que la velocidad del "leader" resultaría negativa aplicando la ecuación (2.10), lo cual quiere decir que el "leader" no avanza y por tanto no se produce la descarga.

Aunque en algún momento  $u(t)$  esté por debajo del nivel de  $U_s$ , el valor acumulado de la integral nunca disminuye, es decir, en la integración no se consideran las áreas negativas o por debajo del valor de  $U_s$ .

Una vez determinado el valor del área disruptiva con una forma de impulso tipo rayo normalizado, para una polaridad, configuración de campo eléctrico y separación entre electrodos dadas, se puede determinar, teóricamente y aplicando el criterio de igualdad de áreas, si otro impulso de forma de onda cualquiera, incluso no normalizada, producirá o no el cebado, así como determinar en su caso, el instante en que se producirá el cebado.

Las principales dificultades para aplicar este método son la necesidad de conocer el valor de  $n$  y de la tensión de ruptura estática para el medio dieléctrico que se está ensayando. En los primeros estudios sobre los métodos de integración se consideraba que  $n = 1$  {25}, pero los estudios más recientes determinan valores de  $n$  distintos de la unidad; por ejemplo, en {1} se determina un valor de  $n = 2,25$ , para aislamiento de aire en las cadenas de aisladores.

La tensión de ruptura estática se define por *KIND* en {25} como la tensión soportada para impulsos lentos o de muy larga duración (tipo maniobra) o para tensiones permanentes, continuas o alternas de frecuencia 50 Hz. En la práctica, su determinación requiere la realización de ensayos adicionales que, al poderse efectuar de diversas formas, conlleva resultados distintos, según el método utilizado en su determinación.

Al igual que se explicó anteriormente la forma de las curvas tensión-duración ( $V-t$ ) utilizando los métodos del tiempo de retardo, también puede explicarse esta forma de las curvas ( $V-t$ ), si se asume que se

---

cumple el criterio de igualdad de áreas. Basta comprobar si las áreas por encima del nivel  $U_s$ , definidas hasta el instante de cebado, son iguales.

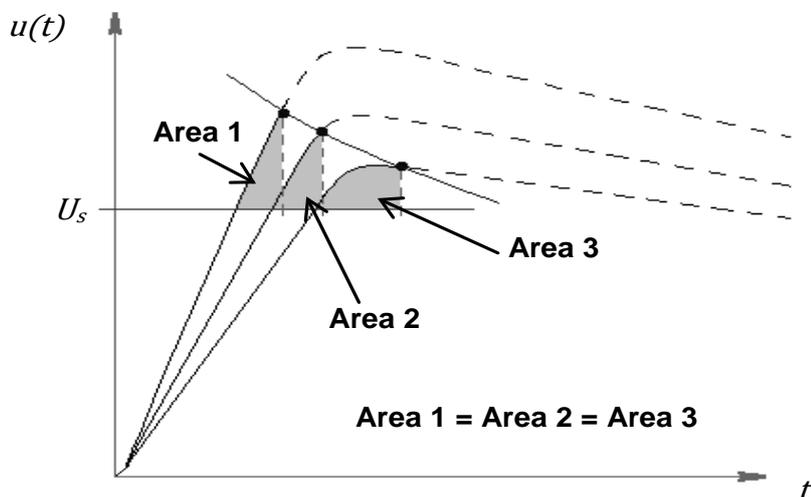


Figura 2-6 - El criterio de igualdad de áreas y las curvas ( $V-t$ ).

#### 2.1.2.2 Métodos experimentales.

Los métodos experimentales se basan en la realización de ensayos dieléctricos en laboratorio sobre distintos medios aislantes, configuraciones de campo eléctrico y polaridades de los impulsos con ondas de distintas formas, planteando a continuación modelos que expliquen los resultados obtenidos. Este método particularizado para aislamiento de aire e impulsos de polaridad positiva, en diferentes configuraciones de campo y con distancias de aire que tengan diferentes tensiones de descarga prevista, será el utilizado en la presente tesis.

Las conclusiones obtenidas en cuanto al comportamiento de los medios dieléctricos gaseosos mediante la utilización de los métodos teóricos descritos, se han basado normalmente en la realización de múltiples ensayos, análisis y finalmente modelización de los resultados experimentales obtenidos.

El comportamiento del gas aislante SF<sub>6</sub> frente a impulsos de frente muy rápido ha sido ampliamente estudiado por un grupo de TOKYO Electric Power Company en {31}, {32}, {33} y {35}, junto con otros investigadores en {42}, {51} y {52}. En la aparamenta aislada con gas (GIS – “Gas insulated switchgear”), ocurre con frecuencia que las maniobras en las subestaciones, producen sobretensiones de frente muy rápido, debido a reflexiones en la propia subestación. Este tipo de impulsos están caracterizados en las normas de coordinación de aislamiento {20}, por un tiempo de frente muy corto (entre 3 ns y 100 ns) en el que existen superpuestas oscilaciones tanto de baja frecuencia (entre 30 kHz y 300 kHz) y de alta frecuencia (entre 0,3 MHz y 100 MHz). No existe, en el cuerpo normativo actual, una forma de onda normalizada única para este tipo de frentes muy rápidos.

Al no existir una forma de onda normalizada, estos estudios sobre el SF<sub>6</sub> utilizan impulsos de frente muy rápido con tiempo de frente variable o simplemente formas de onda senoidales, bien de frecuencia única (entre 1 y 5 MHz) o bien de doble frecuencia (la menor de 1 MHz y la frecuencia mayor de 5 MHz). Todos los estudios utilizan las curvas ( $V-t$ ) como herramienta de comparación y concluyen que, cuanto mayor es la frecuencia principal, mayor es la tensión disruptiva de la curva ( $V-t$ ). Este comportamiento se mantiene en términos relativos del nivel de tensión, para distintas separaciones entre electrodos (por ejemplo entre 5 mm y 15 mm).

En algunos casos existen conclusiones numéricas claras: por ejemplo, para formas de onda senoidales de alta frecuencia (1,3 MHz, 2,7 MHz, y 5,3 MHz), la tensión soportada, evaluada por su valor de cresta, es del orden de un 20% superior a la soportada para impulsos tipo rayo normalizados, {52}.

El estudio {51} calcula curvas ( $V-t$ ) en un rango de tiempos de frente de 20 ns a 10  $\mu$ s, así como los tiempos de retardo estadístico y formativo, para formas de onda cuadradas de frente muy rápido (20 ns) y con impulsos oscilantes de muy alta frecuencia (30 MHz). Las conclusiones

---

indican que las curvas ( $V-t$ ) para ambas formas de onda, son muy similares, ya que la tensión de cresta es la que determina el tiempo de cebado, sin que llegue a cumplirse, para estas frecuencias tan elevadas, el criterio de igualdad de áreas. Sin embargo, las tensiones soportadas para estas dos formas de onda, evaluadas por su valor de cresta, son superiores en todos los casos a las soportadas con impulsos tipo rayo normalizados, por lo que no son relevantes en cuanto a los criterios de tensión soportada.

En el estudio {33} se analiza la tensión soportada por una celda de ensayos asilada con SF<sub>6</sub>, al aplicar impulsos de frente rápido normalizados (tipo rayo y tensiones senoidales de frecuencias comprendidas entre 0,6 MHz y 2,5 MHz). La conclusión obtenida es que los valores de cresta de las tensiones soportadas para impulsos tipo rayo oscilantes, son siempre superiores a los obtenidos para impulsos tipo rayo normalizados, en concreto, cuanto mayor es la frecuencia de oscilación, mayor es la diferencia y ésta puede llegar hasta 1,42 pu.

Hay estudios realizados con otras mezclas de gases, típicamente SF<sub>6</sub> y N<sub>2</sub>, con diferentes proporciones y presiones de trabajo, utilizando ondas senoidales de frecuencia elevada (10 MHz y 2,5 MHz) superpuestas en los que se concluye que la tensión soportada para una frecuencia de 10 MHz es superior que para frecuencias de 2,5 MHz. Se evidencia también la disminución de la tensión de ruptura al disminuir la proporción de SF<sub>6</sub> {42}.

Casi todos los estudios publicados sobre el SF<sub>6</sub>, se han desarrollado para oscilaciones de alta frecuencia (en general mayores o mucho mayores de 1 MHz), no existiendo apenas información sobre el comportamiento de los aislantes en el entorno de frecuencias de 1 MHz o inferiores, que es la frecuencia de transición del factor de la tensión de ensayo *k factor*, establecida normativamente.

Para otros dieléctricos, como el papel-aceite utilizado en la fabricación de transformadores de potencia, existen algunos trabajos sobre la variación de la tensión disruptiva al variar el tiempo de frente de un impulso entre

---

10 ns hasta 250 ns, {45}. Los resultados difieren completamente de las formas de las curvas de tensión-duración, incluso a veces se obtienen curvas en forma de "U". Este comportamiento pone en duda algunos de los valores numéricos obtenidos, posiblemente debido a la elevada incertidumbre de los ensayos, que no se detallan en el estudio.

También existen otros estudios {34} sobre el comportamiento dieléctrico de transformadores con aislamiento aceite cuando se ensayan con impulsos senoidales de frecuencias entre 400 kHz y 1 MHz. La conclusión básica es que la tensión de ruptura con ondas senoidales es siempre superior que la obtenida con impulsos normalizados tipo rayo. También se comprueba que, manteniendo constante el amortiguamiento de la onda senoidal, la tensión de aparición de descargas parciales y la tensión disruptiva aumentan cuando aumenta la frecuencia de la oscilación. Igualmente, se observa que, si se mantiene fija la frecuencia, la tensión disruptiva y la de aparición de las descargas parciales, crecen a medida que la senoidal está más amortiguada. En resumen, los comportamientos indican que la tensión de ruptura disminuye cuando aumenta la duración de la tensión aplicada, tal y como muestran la forma de las curvas tensión-duración.

En {44}, se trató el efecto en la tensión de ruptura de las oscilaciones de distintas frecuencia (entre 100 kHz y varios MHz) superpuestas a los impulsos tipo rayo. El estudio se llevó a cabo en el seno de una investigación, realizada por 5 Institutos (KEMA, Schering Institute, la Universidad de Graz, UK National Grid Company y LCOE). En el estudio se analizó el efecto de las oscilaciones de frecuencia y de amplitud variable superpuestas al impulso tipo rayo pleno para 5 tipos de aislamientos (dieléctricos), {2} y {13}. Se determinó la probabilidad de descarga disruptiva mediante un impulso tipo rayo pleno liso cuya forma de onda era similar a la suma de dos formas de onda con función exponencial (doble exponencial). También se determinó la probabilidad de descarga disruptiva para el mismo impulso tipo rayo pero con oscilaciones superpuestas de frecuencia y amplitud variables, encontrándose el valor de la tensión a impulso tipo rayo pleno liso equivalente.

Como conclusión a estos trabajos, las normas IEC 60060-1 {18} y la norma Std. IEEE 4 {24} modificaron el método de evaluación de los impulsos de tensión tipo rayo con oscilaciones superpuestas en la cresta tal y como se describe en el apartado 2.4.

Como conclusión de todos los estudios anteriores se muestran una serie de tendencias comunes para todos los dieléctricos:

- A mayor duración del impulso, menor es la tensión soportada y viceversa.
- Tanto para los aislamientos de gases como para otros dieléctricos como el aceite, al evaluar la tensión de ruptura por el valor de cresta de la onda registrada, se obtiene un valor inferior para ensayos con impulsos tipo rayo normalizados que con impulsos senoidales (o aproximadamente senoidales) de alta frecuencia.

### 2.1.3 INFLUENCIA DE OTROS FACTORES QUE AFECTAN A LA TENSIÓN DE DESCARGA DISRUPTIVA EN EL AISLAMIENTO DE AIRE

Adicionalmente a los factores descritos anteriormente que afectan a la tensión disruptiva en los medios aislantes, existen otros factores que para el aislamiento de aire resultan de especial importancia y que también se deben conocer y controlar, de forma que durante los ensayos se pueda conocer cómo evoluciona la tensión disruptiva al variar alguno de los parámetros considerados a priori como característicos.

Los otros factores que se pueden considerar relevantes en la tensión disruptiva del aire a presión atmosférica, son los siguientes:

#### Condiciones atmosféricas o ambientales.

Las condiciones atmosféricas influyen en la rigidez dieléctrica de los medios aislantes de manera muy significativa en el caso de ensayos sobre aislamientos de aire, siendo la temperatura, la humedad y la presión los principales parámetros a tener en cuenta. Con objeto de poder comparar resultados de ensayos, estas condiciones se deben mantener constantes durante la ejecución de los mismos o bien realizar conversiones de forma que, mediante la aplicación de los factores de corrección, una tensión de descarga disruptiva medida en unas condiciones de ensayo dadas, se convierta al valor que se hubiera obtenido en condiciones atmosféricas de referencia contempladas en las normas de ensayo. Esta corrección se realiza mediante un factor que es el producto del factor de densidad relativa del aire y del factor de la humedad, que a su vez depende también del tipo de tensión de ensayo. No obstante, no se conoce bien la validez de estos factores de corrección en el caso de que los impulsos de tensión presenten oscilaciones superpuestas por lo que la aplicabilidad de este factor deberá considerarse cuidadosamente en el caso de impulsos tipo rayo en los que se basarán los ensayos experimentales desarrollados en esta tesis.

Las condiciones de referencia definidas en la norma de técnicas de ensayo en alta tensión son:

- Temperatura: 20°C,
- humedad absoluta: 11g/m<sup>3</sup> y
- presión absoluta: 1013 mbar.

La tensión de descarga disruptiva para una separación determinada de los electrodos en el aire aumenta cuando aumentan la densidad relativa del aire o su humedad absoluta. No obstante, si la humedad supera el 80%, la tensión disruptiva se convierte en irregular, especialmente si se produce la descarga a lo largo de un aislador. La densidad relativa del aire aumenta al aumentar la presión atmosférica y disminuye al aumentar la temperatura.

En este sentido en el método de ensayo experimental desarrollado en el capítulo 3, la influencia de las condiciones se ha considerado expresamente y el método propuesto realiza dicha transformación a las

---

condiciones atmosféricas de referencia mencionadas anteriormente exclusivamente cuando los impulsos aplicados son lisos.

#### Tiempo transcurrido entre impulsos de tensión.

La aplicación sucesiva de impulsos sobre un mismo espacio de aire, provoca una cierta ionización del medio y hace que si el tiempo transcurrido entre impulsos es corto, la descarga disruptiva se vea favorecida. Si el tiempo existente entre la aplicación de impulsos sucesivos es superior a 10 segundos, se considera que la ionización ya no influye en el valor de la tensión disruptiva.

#### Presencia de polvo u otras partículas sólidas

Es inevitable que en un área de ensayos (laboratorio) con aire a presión atmosférica, exista presencia de algo de polvo u otras partículas sólidas en suspensión. Una capa de polvo depositada sobre los dos electrodos, no afecta de forma significativa a la tensión disruptiva. Sin embargo, el polvo en movimiento origina partículas cargadas entre los electrodos y puede afectar de forma apreciable la tensión disruptiva, especialmente en configuraciones de campo no homogéneo.

Por lo tanto, manteniendo las magnitudes de influencia constantes y conociendo su valor, es posible estudiar correctamente la variación de la magnitud de salida (la tensión disruptiva de un medio aislante) cuando se varían a voluntad una serie de parámetros de entrada.

## **2.2 MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN DE LOS IMPULSOS TIPO RAYO EN LABORATORIO.**

Las sobretensiones transitorias que se deben tener en cuenta en la evaluación de los aislamientos cuando se realizan los ensayos de equipos de alta tensión, se caracterizan por sus amplitudes, su forma y su duración. Este es el caso de sobretensiones transitorias de frente rápido asociadas normalmente a los rayos, bien sea por caída directa en las fases de las líneas de alta tensión, bien por el cebado inverso o inducidas por la descarga atmosférica en lugares próximos a las líneas aéreas o incluso si éstas se producen en las subestaciones. La severidad de las sobretensiones por la caída directa del rayo en una subestación no será tan elevada al estar fuertemente apantalladas y dependerá fundamentalmente, del apantallamiento frente a las caídas de rayos en las líneas conectadas a la subestación, de la configuración de la subestación (tamaño, y número de líneas conectadas) y del valor instantáneo (en el momento de la descarga) de la tensión de servicio.

Para obtener una adecuada coordinación de aislamiento en las instalaciones eléctricas de alta tensión, tal como se ha explicado anteriormente, es necesario establecer unos valores normalizados de sobretensiones de frente rápido o de tipo rayo que simulen la existencia real en las instalaciones de alta tensión, de este tipo de sobretensiones que pueden afectar a la aparamenta y transformadores de la subestación. Las normas internacionales de coordinación de aislamiento son las que establecen, de manera general, unos valores de prueba de la tensión que son capaces de soportar la aparamenta y justificar la asociación de dichos valores con los valores normalizados correspondientes de la tensión más elevada de la aparamenta de la instalación.

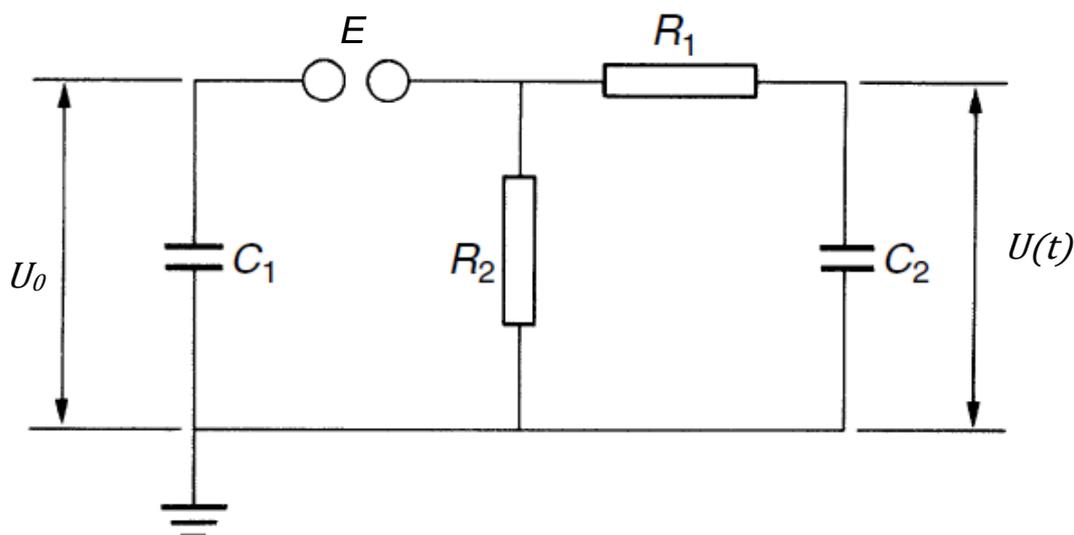
Para la generación en los laboratorios de ensayo de los impulsos de frente rápido o de tipo rayo normalizados, para el ensayo de la aparamenta o transformadores de alta tensión, se utilizan comúnmente generadores de una etapa o etapas múltiples que, mediante la carga y consiguiente descarga de dos condensadores, producen dos ondas exponenciales que conforman una onda unidireccional, bien sea positiva o

negativa respecto de tierra, y que viene caracterizada por el valor de la amplitud máxima (valor de cresta), considerada como la tensión de ensayo si no existen oscilaciones superpuestas en la misma y por dos parámetros temporales:

- tiempo de frente  $T_1$ , y
- tiempo hasta el valor mitad,  $T_2$ ,

Para el caso de impulsos tipo rayo, estos valores normalizados son  $1,2 \mu\text{s}$  para el tiempo de frente y  $50 \mu\text{s}$  para el tiempo hasta el valor mitad.

En la Figura 2-7 se representa el esquema simplificado del generador de impulsos de una sola etapa y que son los que presentan un mejor rendimiento (los multi-etapas denominados tipo Marx son los más utilizados en la práctica).



$E$ : explosor de esferas.

$C_1$ : condensador principal o de descarga.

$R_1$ : resistencia de frente.

$C_2$ : condensador de frente o de la carga en ensayo.

$R_2$ : resistencia de descarga del generador de impulsos.

Figura 2-7 - Circuito equivalente de un generador de impulsos de una sola etapa

La forma de generar el impulso consiste en cargar el condensador  $C_1$  mediante una fuente de corriente continua de alta tensión y una vez alcanzado el valor de la tensión objetivo  $U_0$  (tensión de cresta dividida por el rendimiento del generador), se desconecta de la fuente. El impulso se generará cuando el explosor de esferas  $E$  se cebe, actuando éste como interruptor.

El condensador  $C_1$  cargado a una tensión  $U_0$ , será descargado contra condensador  $C_2$ , inicialmente descargado, a través de la resistencia de frente  $R_1$ . Para ello se ceban los explosores, que actúan como un interruptor provocando una súbita carga del condensador,  $C_2$ , debido al bajo valor óhmico de la resistencia de frente,  $R_1$ . La resistencia  $R_2$  es la que determinará el transitorio más lento de descarga subsiguiente de ambos condensadores  $C_2$  y  $C_1$ .

Si el cebado del explosor (considerado como el cierre del interruptor) se supone instantáneo y se ignoran los efectos de parásitos de capacidades de acoplamiento e inductancias de las resistencias y de las conexiones, este circuito generará un impulso cuya evolución temporal corresponde a una onda doble exponencial, como la indicada en la expresión (2.14) siguiente.

$$U(t) = A \left( e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1} \right) \quad (2.14)$$

La determinación de las constantes de la ecuación (2.14) en función de los valores de los elementos del circuito de la Figura 2-7 se puede encontrar en la literatura técnica [26], obteniéndose las expresiones siguientes:

$$A = \frac{U_0}{R_1 C_2} \cdot \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (2.15)$$

$$\tau_1 = \frac{2}{a + \sqrt{a^2 - 4b}} \quad (2.16)$$

$$\tau_2 = \frac{2}{a - \sqrt{a^2 - 4b}} \quad (2.17)$$

$$a = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \quad (2.18)$$

$$b = \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (2.19)$$

Es importante señalar que durante el ensayo, el objeto que se va a ensayar se conecta en paralelo con el condensador de frente  $C_2$  del generador de ensayo. Por lo tanto, la capacidad efectiva de  $C_2$  corresponde a la suma de las capacidades del propio condensador del generador, más la propia del objeto que se está ensayando.

Para poder determinar el comportamiento de un generador en particular y considerar el impulso realmente aplicado sobre el objeto a ensayar, conviene considerar el circuito-equivalente más detallado que tiene en cuenta otros parámetros existentes en los montajes reales de ensayo y que configurarán definitivamente la forma de onda del impulso. Éstos son: la inductancia propia de las resistencias y de los condensadores, la de las conexiones eléctricas, y del retorno por tierra, las capacidades parásitas entre los diferentes elementos del generador y entre éstos y las paredes y el entorno, así como el efecto de los explosores de esferas en la forma de onda generada, tal y como se consideran en {28} y {49}.

La gran variedad de objetos a ensayar en un laboratorio de alta tensión, hace que se deban considerar valores muy variables de capacidad

eléctrica, afectando al valor efectivo de la capacidad  $C_2$ , por lo que deberían poderse variar los valores de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  del generador dentro de un cierto rango de valores, para poder ajustar los parámetros de forma de onda del impulso y que vienen dados por el tiempo de frente  $T_1$  y el tiempo de cola o hasta valor mitad  $T_2$ , de formas que permanezcan dentro de unas tolerancias dadas respecto a los valores normalizados de  $1,2 \mu\text{s}$  y  $50 \mu\text{s}$ , respectivamente. Por ello, en la norma internacional IEC 60060-1 {18} de las técnicas de ensayo en alta tensión, se establecen unas tolerancias para los diferentes parámetros que definen el impulso tipo rayo que son del  $\pm 30\%$  para el tiempo de frente  $T_1$  y del  $\pm 20\%$  para el tiempo de cola  $T_2$ .

Igualmente, la tensión de cresta se verá afectada también por los valores de las resistencias y condensadores del circuito, por lo que la norma citada considera una tolerancia del  $\pm 3\%$  entre el valor de la tensión de ensayo, medida durante el ensayo y el valor de la tensión de ensayo especificada por las normas de la aparatamenta que se está ensayando.

Teniendo en cuenta los valores de resistencias y condensadores utilizados en la práctica para la construcción de los generadores, se deduce que el tiempo de frente del impulso,  $T_1$ , está determinado principalmente por el valor de la constante de tiempo:  $\tau_1 \cong R_1 \cdot C_2$ , que define la carga de  $C_2$ , a través de  $R_1$ .

El razonamiento anterior es una aproximación válida ya que para conseguir un buen rendimiento de los generadores (o relación entre la tensión de cresta del impulso generado y la tensión de carga  $U_0$ ), se debe cumplir que  $C_1 \gg C_2$ , y por otra parte, para conseguir las formas de ondas tipo rayo, se debe cumplir también que  $R_1 \ll R_2$ . Con estas condiciones se deduce que:  $a^2 \gg 4b$ , y también,  $a \cong 1 / (R_1 \cdot C_2)$ . Por tanto  $\tau_1 \cong 1/a \cong R_1 \cdot C_2$ .

El tiempo hasta el valor mitad del impulso,  $T_2$ , está determinado por otra constante de tiempo,  $\tau_2 \cong R_2 \cdot (C_1 + C_2)$  que define la descarga de los condensadores  $C_1$  y  $C_2$  en paralelo, a través de la resistencia de cola  $R_2$ , o

simplificando todavía más, si se cumple que  $C_1 \gg C_2$ , se tiene que:  
 $\tau_2 \cong R_2 \cdot C_1$ .

Para ilustrar la validez de las aproximaciones anteriores se calculan las constantes de tiempo ( $\tau_1 ; \tau_2$ ) para un generador comercial de una etapa y de 100 kV de tensión de carga, en el que  $C_1 = 6000$  pF,  $C_2 = 1200$  pF,  $R_1 = 400 \Omega$ , y  $R_2 = 9500 \Omega$ .

$\tau_1$ ( $\mu\text{s}$ )	Método de cálculo	$\tau_2$ ( $\mu\text{s}$ )	Método de cálculo
0,40	Según (2.16)	68,48	Según (2.17)
0,48	$\tau_1 = R_1 \cdot C_2$	68,40	$\tau_2 = R_2 \cdot (C_1 + C_2)$

Tabla 2-5 – Cálculo de las constantes de tiempo para un generador de impulsos comercial.

En algunas ocasiones, cuando el divisor utilizado para las medidas es capacitivo, se emplea el condensador de la rama de alta tensión del divisor, como condensador de frente  $C_2$ . Aunque esta práctica es muy común, ya que permite abaratar la construcción del generador, está prohibida expresamente por la norma IEC 60060-2 {19} para evitar errores de medida que harían inválido el ensayo. En concreto, esta norma establece que el sistema de medida debe conectarse directamente a los terminales del objeto en ensayo, y que nunca debe conectarse entre la fuente de tensión y el objeto en ensayo, así se evita el error de medida debido, entre otras causas, a la caída de tensión en el conductor que une el generador con el objeto bajo ensayo.

Por otra parte, en el circuito equivalente del generador cabe el considerar la inductancia propia de sus distintos elementos, más la del cable de conexión de la salida de alta tensión del generador al objeto en ensayo, la del propio objeto de ensayo y la del retorno por tierra.

Esta inductancia  $L$ , junto con la capacidad  $C_2$ , forman un circuito oscilante amortiguado, que puede estar muy poco amortiguado si la resistencia serie  $R_1$ , es excesivamente baja. También influye  $R_2$ , pero como es de valor muy elevado, afecta poco a la frecuencia de las oscilaciones. En consecuencia, la frecuencia de la oscilación del circuito serie R-L-C equivalente de la Figura 2-8, vendrá dada por la expresión (2.20).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2.20)$$

donde

$L$ : inductancia serie total del circuito.

$R$ : resistencia serie total del circuito, aproximadamente igual a  $R_1$ .

$C$ : equivalente serie de  $C_1$  y  $C_2$ :  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

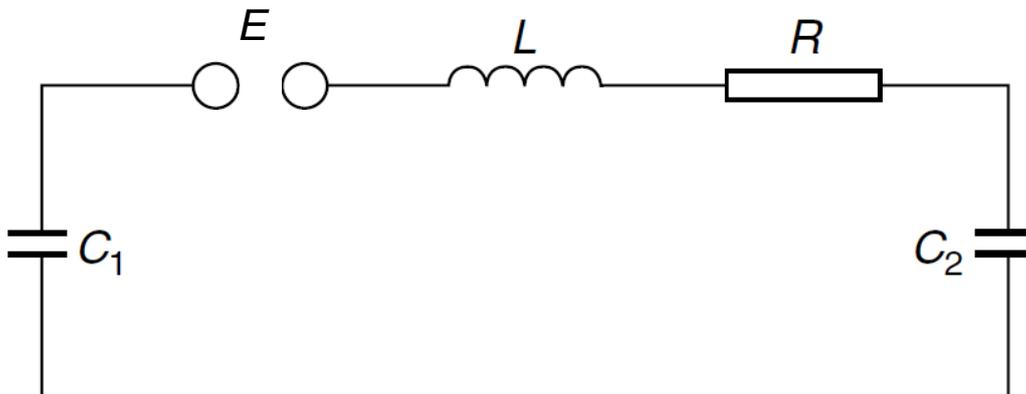


Figura 2-8 – Circuito simplificado equivalente del generador para considerar su inductancia.

Para evitar estas oscilaciones en la forma de onda del impulso generado, la resistencia debería ser, como mínimo, igual a la que garantiza un amortiguamiento crítico, o lo que es lo mismo, el valor de resistencia que hace cero la frecuencia en la ecuación (2.20).

$$R_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.21)$$

Al ser en la práctica el valor de  $C_2$  mucho más pequeño que el de  $C_1$ , el valor de  $C$  se aproxima al valor de  $C_2$ , por lo tanto el valor de  $R_c$  depende fundamentalmente de la raíz cuadrada del cociente de los valores de  $L$  y de  $C_2$ .

El valor de la resistencia  $R_1$  queda restringido entre dos criterios antagónicos ya que por una parte, debe ser pequeño para lograr los tiempos de frente normalizados del impulso tipo rayo (1,2/50) y por otra parte, debe ser superior a la resistencia crítica de amortiguamiento. La única solución es disminuir la resistencia  $R_c$ , actuando sobre el valor de la inductancia  $L$ , tratando de minimizarla. Para ello se construyen resistencias especiales de baja inductancia y se separan las etapas del generador en tramos paralelos o en zigzag, de forma que la corriente circule en direcciones opuestas por cada etapa del generador. No obstante, estas soluciones reducen sólo la inductancia del generador, que habitualmente no supera el 15% de la inductancia de bucle total y, por lo tanto, tienen una influencia limitada en la reducción del valor global de  $L$ .

Recordando que  $T_1$ , está determinado principalmente por el valor de la constante de tiempo:  $\tau_1 \cong R_1 \cdot C_2$ , es fácil de entender que la posibilidad de amortiguar las oscilaciones, cuando no es posible eliminarlas por completo, está limitada por el máximo valor de  $R_1$ , que sea compatible con el máximo tiempo de frente normalizado  $T_1 = 1,56 \mu s$ . Este valor máximo de tiempo de frente corresponde al valor de referencia  $1,2 \mu s$ , más la tolerancia normativa del 30% ( $0,36 \mu s$ ).

En efecto, si se quiere mantener fijo el valor de  $T_1$  cuando aumenta la capacidad del objeto a ensayar y por lo tanto  $C_2$ , es necesario que  $R_1$  disminuya en el mismo porcentaje. Sin embargo este nuevo valor de resistencia de frente,  $R_1'$ , puede no ser suficiente para garantizar el amortiguamiento crítico ( $R_1' < R_c$ ), ya que aunque el incremento de  $C_2$

---

provoca una cierta disminución del valor de la resistencia que consigue el amortiguamiento crítico según la expresión (2.21), el nuevo valor de la resistencia de frente  $R_1'$ , puede resultar más pequeño que  $R_c'$ . En consecuencia, el impulso generado tendrá inevitablemente oscilaciones superpuestas, que justifican uno de los motivos de la presente tesis al ser necesario tenerlas en cuenta cuando se usan generadores de ensayo comunes para diferentes equipos a ensayar.

Durante los ensayos de objetos con gran capacidad, como es el caso de transformadores de gran potencia, cables de cierta longitud, generadores, motores, pasatapas, o cabinas con aislamiento integral en SF6 (GIS), los generadores no son capaces de conseguir ondas sin oscilaciones superpuestas, y que tengan un tiempo de frente inferior a  $1,56 \mu s$  e incluso en muchos casos, la amplitud de las oscilaciones superpuestas en la cresta, superan el 10 % de la máxima amplitud del impulso. Consecuentemente, el impulso de tensión podría llegar a ser no normalizado.

Algunos fabricantes de generadores limitan incluso la capacidad del objeto a ensayar compatible con un impulso normalizado (por ejemplo, 12 nF para un generador de 200 kV y dos etapas). Valores típicos de las capacidades de objetos a ensayar se pueden encontrar en {26}.

Para tratar de resolver estos inconvenientes, fabricantes de generadores de alta tensión han propuesto algunas soluciones {50} para compensar la inductancia en serie del circuito mediante redes  $R-L-C$ . No obstante, la aplicación de estas redes es complicada debido al gran margen posible de variación de los parámetros del circuito equivalente (de  $C_2$ , y sobre todo de  $L$ ) en función del objeto a ensayar, y también debido al coste que supone la modificación del generador de ensayos mediante estas redes.

Estos problemas han impedido su aplicación generalizada en los laboratorios de alta tensión y conducen a la necesidad de buscar una correspondencia entre la solicitud provocada en el aislamiento por el impulso con sobretensiones superpuestas, con respecto al impulso de tensión normalizado 1,2/50 y sin oscilaciones. Esta equivalencia es

---

tratada de forma general para todos los tipos de aislamientos, en la última revisión de las normas IEC 60060-1 {18} y Std IEEE-4 {24} y se mejora notablemente para las distancias de aislamiento en el aire, mediante los trabajos de la presente tesis.

## 2.3 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA

El fenómeno de la descarga disruptiva en un medio dieléctrico es, como se ha expuesto anteriormente, de carácter fuertemente aleatorio debido a las propias características del proceso físico, a la variación de las magnitudes de influencia e, incluso, a los errores de medida de carácter aleatorio.

Por ello, para cada configuración de ensayo con aislamiento autorregenerable en aire se utilizan tratamientos estadísticos que determinan la probabilidad de que aparezca la descarga disruptiva.

### 2.3.1 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

La gran mayoría de la literatura científica define la probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento como función del valor de cresta de la tensión aplicada,  $p(U)$ . La función de distribución de probabilidad acumulada de Gauss, según la expresión (2.22), representa esta probabilidad.

$$p(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}y^2} dy \quad (2.22)$$

donde

$$x = (U - U_{50})/s$$

$U_{50}$  es la tensión de descarga al 50% de probabilidad ( $p(U_{50}) = 0,5$ )

$s$  es la desviación típica de la función de densidad de probabilidad

La forma de la función  $p(U)$  no se puede verificar experimentalmente para valores de probabilidad de descarga muy pequeños, ya que es físicamente imposible que pueda ocurrir una descarga disruptiva por debajo de un valor mínimo de  $U$ . Por consiguiente, la función anterior debe truncarse para  $(U_0 = U_{50} - 3s)$  o para  $(U_0 = U_{50} - 4s)$ , siendo la probabilidad  $p(U) = 0$  para  $U \leq U_0$ .

La razón principal por la que se adopta la expresión (2.22) es porque se adapta relativamente bien a los resultados obtenidos experimentalmente.

No obstante, la guía de aplicación de coordinación de aislamiento en alta tensión IEC 60071-2 [21], recomienda la utilización de las funciones de probabilidad de Weibull para las descargas disruptivas de un aislamiento autorregenerable como es el aire, debido a que ofrece las siguientes ventajas:

- Los valores de truncamiento de  $U_0$  están matemáticamente incluidos en la expresión de la distribución de Weibull.
- Las funciones son fácilmente evaluables mediante calculadoras simples.
- La función inversa  $U=U(p)$  se puede expresar analíticamente y puede calcularse fácilmente.
- Las expresiones de Weibull modificadas están definidas por los mismos parámetros que caracterizan las dos expresiones de Gauss truncadas ( $U_{50}$ ,  $s$  y  $U_0$ , para  $p(U)$ ).
- La función de probabilidad de descarga disruptiva de varios aislamientos idénticos en paralelo, tienen la misma expresión que para un aislamiento simple y se pueden evaluar fácilmente sus características partiendo de los resultados correspondientes a un aislamiento simple.

A partir de la función de distribución de probabilidad acumulada de Weibull de tres parámetros se pueden expresar las funciones modificadas de Weibull que representan la función de probabilidad de descarga disruptiva de un aislamiento externo bajo impulsos tipo rayo. La expresión

general para la distribución de Weibull de tres parámetros viene dada por la ecuación:

$$p(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U-\phi}{\psi}\right)^\gamma} \quad (2.23)$$

Donde

$\phi$  es el valor de truncamiento

$\psi$  es el parámetro de escala

$\gamma$  es el parámetro de forma

Esta expresión puede ser modificada adecuadamente para la expresión de la probabilidad de descarga disruptiva de un aislamiento con una función truncada de probabilidad de descarga, sustituyendo simplemente el valor de truncamiento  $\phi$  y el factor de escala  $\psi$  por:

$$\phi = U_{50} - N \cdot s \quad (2.24)$$

$$\psi = N \cdot s \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.25)$$

Que conduce a la función de distribución modificada de Weibull:

$$p(U) = 1 - 0,5^{\left(1 + \frac{U-U_{50}}{sN}\right)^\gamma} \quad (2.26)$$

En la cual la constante  $N$ , es el número de desviaciones típicas por debajo de  $U_{50}$  que corresponden a la tensión de truncamiento (aquella en la que  $p(U)=0$ ) y el exponente  $\gamma$  se determina mediante la condición de que ( $p(U_{50}-s)=0,16$ ), que resulta en:

$$\gamma = \frac{\ln \left[ \frac{\ln(1 - 0,16)}{\ln 0,5} \right]}{\ln \left( 1 - \frac{1}{N} \right)} \quad (2.27)$$

Para el aislamiento externo, se asume que la descarga no es posible a un valor de truncamiento dado por 4 veces la desviación típica ( $U_0=U_{50}-4s$ ), de forma que para  $N = 4$ , calculando el exponente  $\gamma$  mediante la ecuación (2.27), se obtiene un valor de  $\gamma = 4,80$ , que se puede aproximar a un valor aproximado de 5, sin que se cometa un error significativo.

En las Figura 2-9 y Figura 2-10, tomadas de la norma IEC 60070-2 {21}, se muestran la distribución modificada de Weibull junto con la función de distribución gaussiana a la que se ajusta y se representan en escala lineal y gaussiana. Puede observarse que la diferencia del valor de la probabilidad de descarga entre ambas funciones de distribución es muy pequeño, haciendo aplicables para la determinación de la función de probabilidad ambas funciones de distribución y dejando la utilización de una o de otra en función de que se ajuste mejor a los resultados obtenidos.

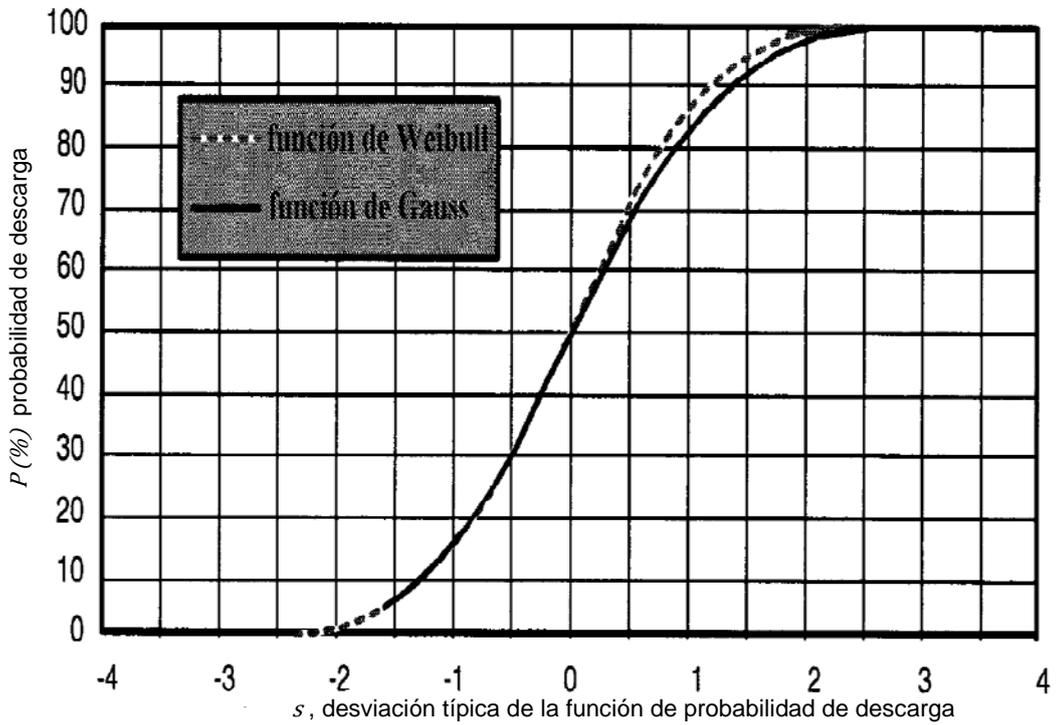


Figura 2-9 - Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable representado en escala lineal

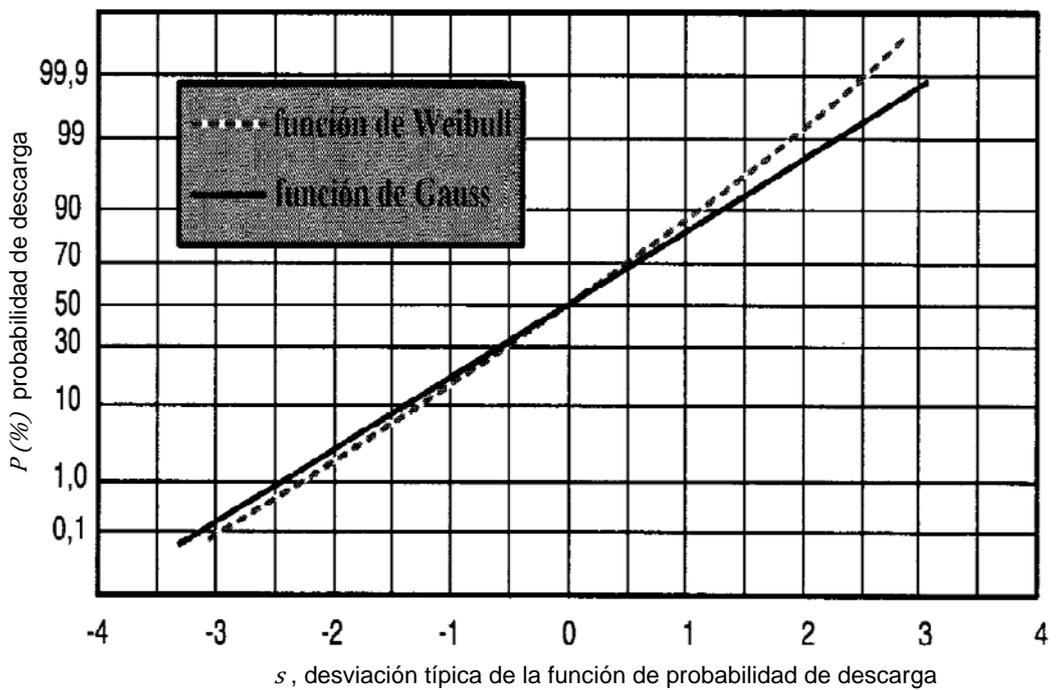


Figura 2-10 - Probabilidad de descarga disruptiva del aislamiento autorregenerable representado en escala gaussiana

### 2.3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

#### Clase 1: Método de los niveles múltiples

El método de los niveles múltiples consiste en la aplicación de ensayos de un determinado valor de tensión constante en diferentes niveles de tensión. En cada uno de estos niveles se obtiene una estimación de la probabilidad de descarga con sus límites de confianza, y la función de probabilidad acumulada considera la probabilidad de descarga disruptiva a todos los niveles de tensión. El método consiste en aplicar, para cada nivel  $m$ , de tensión de ensayo  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), un número determinado de impulsos de tensión ( $n_i$ ) que provocarán un número de descargas disruptivas  $z_i$ , el cual será siempre menor o igual al número de impulsos aplicados. Entre niveles de tensión de ensayo adyacentes existirá una diferencia de tensión de

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2.28)$$

Para que el método sea consistente y conduzca a resultados fiables, los parámetros de ensayo,  $m$ ,  $n$  y  $\Delta U$ , deben ser como mínimo

$$m \geq 5$$

$$n \geq 10$$

$$\Delta U = (0,01 \text{ a } 0,03) U_{50\%}$$

Los resultados de este método serán los  $n_i$  impulsos aplicados y el número de descargas disruptivas observadas,  $z_i$  para cada nivel de tensión  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )

### Clase 2: Método de subidas y bajadas

Este método se utiliza normalmente para determinar el nivel de tensión que tiene una determinada probabilidad de descarga disruptiva. Consiste en aplicar  $m$  grupos de  $n$  impulsos esencialmente iguales, para cada nivel de tensión  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ). Normalmente se utilizan dos procedimientos: el *procedimiento de tensión soportada*, cuyo objeto es encontrar los niveles de tensión que corresponden a descargas disruptivas de baja probabilidad y el *procedimiento de descarga*, que encuentra los niveles de tensión correspondientes a descargas disruptivas de probabilidades altas. En el procedimiento de tensión soportada, es necesario que la tensión vaya elevándose en incrementos fijos  $\Delta U$ , desde un valor inicial si no se ha producido descarga en cada grupo de  $n$  de impulsos de tensión; en caso contrario, si se ha producido la descarga, el nivel de tensión se reduce en la misma cantidad. En el procedimiento de descarga, el nivel de tensión se incrementa en una cantidad  $\Delta U$  si alguno de los impulsos no produce descarga, en caso contrario se reducirán en la misma cantidad.

Cuando en número de impulsos aplicados es de  $n = 1$  los dos procedimientos convergen y en cada nivel de tensión se obtiene el valor  $U_{50\%}$ , tensión que tiene un 50% de probabilidad de producir la descarga disruptiva en dicha configuración de ensayo. Si se utilizan otros valores de número de impulsos aplicados por cada grupo  $n$ , se podrán determinar tensiones de descarga con otros valores de probabilidad de descarga disruptiva. En la Tabla 2-6 se muestran las diferentes probabilidades de descarga en el ensayo de subidas y bajadas.

El resultado de este método serán los  $z_i$  grupos de impulsos aplicados a los diferentes niveles de tensión  $U_i$ . El primer nivel se toma teniendo en cuenta que es aquel al cual al menos se hayan aplicado anteriormente dos grupos de impulsos. El número total de grupos útiles está definido por la siguiente expresión, para cada nivel de tensión  $i = 1, \dots, l$

$$m = \sum_{i=1}^{\ell} z_i \quad (2.29)$$

### Clase 3: Métodos de solicitaciones progresivas

En los ensayos de la clase 3, se aplica  $n$  veces un procedimiento que siempre lleva a una tensión de descarga disruptiva del objeto de ensayo. La tensión de ensayo puede incrementarse de forma continua o escalonadamente hasta que se produce la descarga disruptiva a una tensión  $U_i$  o se mantiene constante en un nivel hasta que se observa una descarga disruptiva en el instante  $t_i$ . Los resultados son los  $n$  valores de tensión  $U_i$  o el tiempo  $t_i$  en el que ha ocurrido la descarga disruptiva (siempre que  $n$  sea  $\geq 10$ ).

Este tipo de ensayos se hacen con tensiones de impulso incrementadas escalonadamente. Los ensayos en los que la tensión de descarga disruptiva se produce en el frente de un impulso, pertenecen a esta clase, por lo que al realizarse el método experimental en aislamiento autorregenerable con campos no homogéneos en el que la descarga disruptiva nunca se produce en el frente, se desestima este método.

#### 2.3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS ESTADÍSTICOS {4}

Al aplicar el método de los niveles múltiples (Clase 1), la frecuencia de descarga  $f_i = d_i/n_i$ , a un determinado nivel de tensión dado  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) se toma como una estimación de la probabilidad de descarga disruptiva al nivel de tensión  $U_i$ ,  $p(U_i)$ . La estimación  $m$  de la  $p(U_i)$  obtenida como resultado del ensayo de clase 1, puede ajustarse hasta una función de probabilidad  $p(U)$ , determinándose sus parámetros  $U_{50}$  y la desviación estándar mediante la expresión  $s = U_{50} - U_{16} = U_{84} - U_{50}$

De forma general, el intervalo de confianza de los parámetros de la función de distribución, tiende a variar de forma inversa a la raíz cuadrada del número  $n_i$  de impulsos de tensión en cada nivel  $U_i$  y de forma inversa con el número de niveles de tensión  $m$ .

Por ejemplo, para  $n_i = 10$  impulsos por nivel y para cinco niveles ( $m = 5$ ), con frecuencia de descarga  $f_i$  distinta de cero o uno, el intervalo de confianza del 95%, sería:

Para  $U_{50}$ :

$$U_{50}^* - 0,72 s^* \leq U_{50} \leq U_{50}^* + 0,72 s^*$$

y para  $s$ :

$$0,4 s^* \leq s \leq 2,0 s^*$$

donde  $U_{50}^*$  y  $s^*$  son las estimaciones de  $U_{50}$  y  $s$  obtenidas por el ajuste de los resultados de ensayo a una función de distribución de probabilidad de descarga,  $p(U)$ .

Al aplicar el método de subidas y bajadas de tensión (Clase 2), se obtiene una estimación de  $U_p$ , que es la tensión a la cual la probabilidad de descarga disruptiva es  $p$ , mediante la siguiente expresión aproximada:

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l \frac{(z_i U_i)}{m} \quad (2.30)$$

donde  $z_i$  es el número de grupos de impulsos que consiste cada uno en  $n$  impulsos de tensión de ensayo de nivel  $U_i$  y  $m$  es el número total de grupos útiles, dado por la expresión (2.29). Cuando para un determinado nivel de tensión, existe un solo grupo, dicho grupo no se considera útil y no se contabiliza en el valor de  $m$ . El valor apropiado de  $n$  viene determinado por las expresiones siguientes, para un nivel de probabilidad deseado de  $p$ . Conviene tener en cuenta que, para evitar errores apreciables, el nivel de tensión mínimo considerado no debe diferir del estimado  $U_p^*$ , en más que el doble del incremento de tensión considerado ( $2\Delta U$ ).

Si se aplica el *procedimiento de tensión soportada* descrito anteriormente, la estimación de  $U_p$  para una probabilidad de descarga  $p$ , viene dado por la expresión:

$$p = 1 - (0,5)^{1/n} \tag{2.31}$$

Mientras que para el *procedimiento de descarga asegurada* viene dado por la siguiente expresión:

$$p = (0,5)^{1/n} \tag{2.32}$$

Los valores de  $p$  para los que puede estimarse  $U_p$  mediante este método de subidas y bajadas de tensión, está limitado por el requisito de que  $n$  debe ser un número entero, de forma que las probabilidades de descarga para este ensayo son los siguientes:

$n$	70	34	14	7	4	3	2	1	
$p$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	<i>Tensión soportada</i>
$p$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,50	<i>Descarga asegurada</i>

Tabla 2-6 – Número de descargas aplicadas por cada grupo de ensayos y probabilidades de descarga en los ensayos de subidas y bajadas

A la vista de la tabla anterior, se puede deducir que el nivel de tensión soportada, que se define en las normas correspondientes a los ensayos de alta tensión correspondiente a la tensión de descarga de probabilidad del 10%, necesitaría un número mínimo de  $n = 7$  impulsos por cada grupo y con un mínimo de 8 grupos útiles. En todos los casos el incremento de tensión entre niveles  $\Delta U$ , debería estar comprendido entre 0,01 y 0,03 del valor estimado de la tensión del 50%

Gráficamente, en la Figura 2-11 se muestra un ejemplo de un ensayo utilizando el método de los niveles múltiples para la determinación de la tensión del 50% estimada de 105 kV, con incrementos de tensión  $\Delta U=1\%$  de  $U_{50\%}=0,01 \cdot 105 \text{ kV} = 1 \text{ kV}$

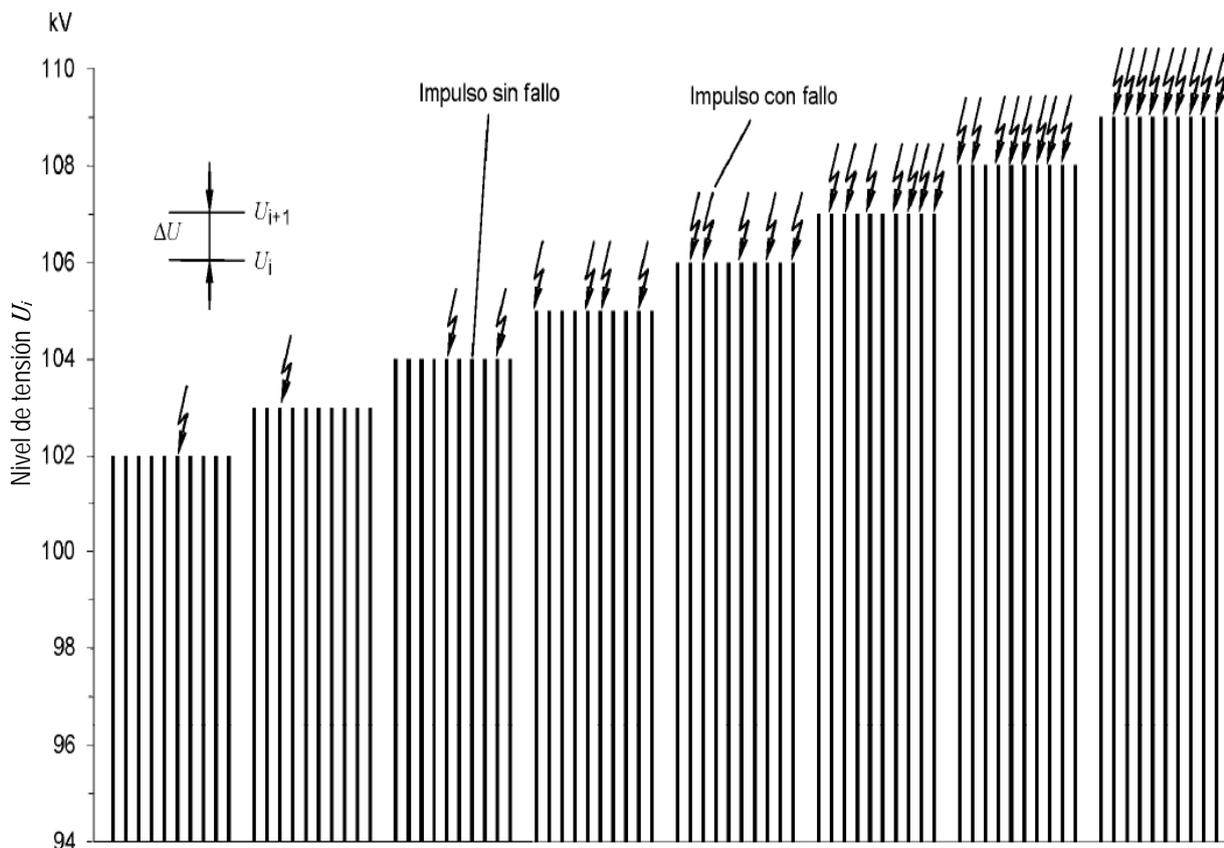


Figura 2-11 - Ejemplo de un ensayo con el método de niveles múltiples para la determinación de una tensión del 50 % estimada del 100 kV

Análogamente, en la Figura 2-12 se muestra ejemplo de un ensayo con el método de subidas y bajadas de tensión, para una tensión de ensayo estimada de 100 kV

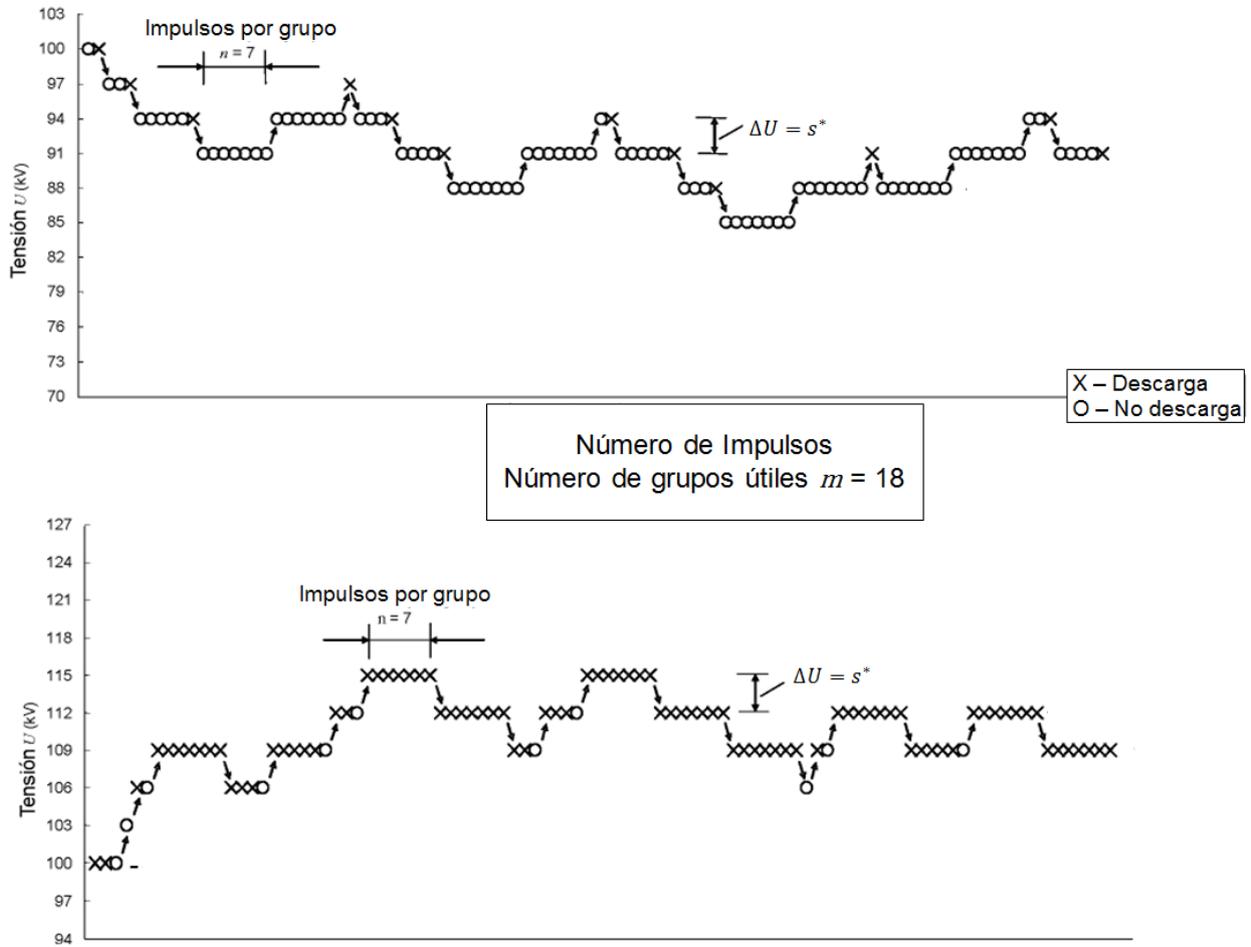


Figura 2-12 – Ejemplo de un ensayo utilizando el método de subidas y bajadas para la determinación de las tensiones de descarga del 10 % y del 90 %.

## 2.4 MÉTODO NORMATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO PARA IMPULSOS TIPO RAYO CON OSCILACIONES SUPERPUESTAS

### 2.4.1 INTRODUCCIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO, $k$ – factor

Durante muchos años las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission) de la serie IEC 60060, sobre las técnicas de ensayo de alta tensión han ido modificándose, introduciendo nuevos conceptos y métodos, con objeto de tener presente en las técnicas de medida, los impulsos de tensión tipo rayo con oscilaciones superpuestas.

En los años ochenta, la mayoría de los laboratorios utilizaban osciloscopios analógicos para registrar los impulsos de tensión. La gran cantidad de tiempo que llevaba interpretarlos, junto con las limitaciones por la baja resolución de los oscilogramas, dieron lugar a unas restricciones prácticas para poder evaluar los parámetros de los impulsos de tensión utilizados en los ensayos y cada uno de los laboratorios en función de sus medios y experiencia, utilizaba su propio medio de evaluación.

La versión anterior de la norma de técnicas de ensayo de alta tensión (IEC 60060-1, edición 1989) clasificaba los impulsos tipo rayo plenos en dos tipos: tensiones a impulso tipo rayo plenos lisos y tensiones a impulsos tipo rayo plenos con oscilaciones amortiguadas superpuestas. En la práctica y según se ha explicado anteriormente, todos o casi todos los impulsos generados en los laboratorios de ensayo presentan ciertas oscilaciones debido a los diferentes objetos a ensayar, de forma que el técnico del laboratorio tenía que realizar un juicio subjetivo para considerar si las oscilaciones eran tales que el impulso debía tratarse o no, como una tensión de impulso tipo rayo con oscilaciones amortiguadas.

Las tensiones a impulso tipo rayo con oscilaciones amortiguadas se analizaban dibujando la curva media entre las oscilaciones y aun así el técnico del laboratorio debía hacer un juicio subjetivo sobre cuál era la

curva “suavizada” o lisa correcta. No obstante, se fijó un límite absoluto, que era la amplitud de la oscilación superpuesta que debía ser inferior del 5% de la amplitud máxima del impulso.

En las ediciones anteriores de la norma IEC 60060-1, se establecía asimismo el concepto de la curva media de acuerdo con reglas gráficas, sin ninguna base matemática. En este sentido, para la definición del valor de cresta y realizando un análisis que depende de la duración o de la frecuencia de la sobretensión, la norma indicaba en su apartado 19.2:

**Valor de cresta (alternativamente valor de cresta virtual)**

*El valor de cresta es normalmente el valor máximo. Con algunos circuitos de ensayo (considerando los generadores y los objetos a ensayar), pueden estar presentes en la cresta del impulso, ciertas oscilaciones o una sobretensión. Si la frecuencia de estas oscilaciones no es menor que 0,5 MHz y la amplitud de las oscilaciones es inferior al 5% del valor de cresta y la duración de la sobretensión no es más de 1  $\mu$ s, debe dibujarse una curva media sobre la onda registrada y, a efectos de la medida, la máxima amplitud de la curva se considera el valor de cresta que define el valor de la tensión de ensayo (ver Figura 2-14)*

Como consecuencia de la definición anterior, existía una transición abrupta, de 1 a cero, en el valor calculado de la tensión de ensayo pero que se admitía como razonable ya que la amplitud de la sobretensión se limitaba al 5%. En la Figura 2-13 se muestra gráficamente el valor de la transición en forma de escalón.

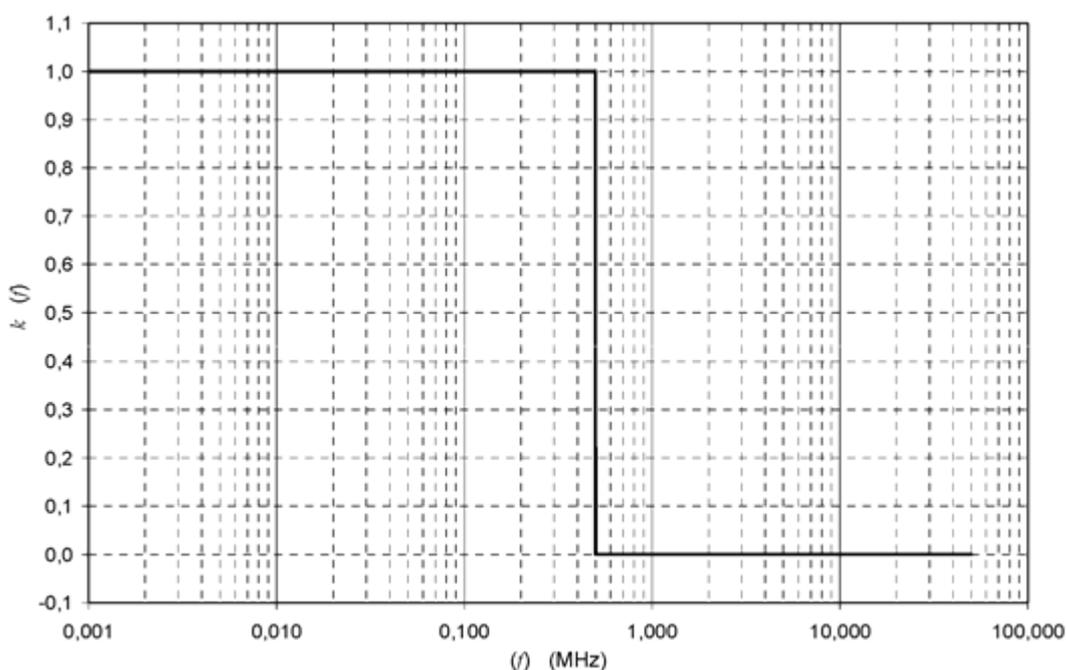


Figura 2-13 – Función “efectiva” de la tensión de ensayo, según anteriores ediciones de las normas IEC 60060-1

Según esta función “efectiva”, cuando existen oscilaciones en la cresta de frecuencia inferior a 0,5 MHz, dichas oscilaciones se deben tener en cuenta para la evaluación del valor de cresta, pero cuando la frecuencia es igual o superior a 0,5 MHz las oscilaciones debían despreciarse, pues se entendía que no tenían influencia en el comportamiento del dieléctrico del aislamiento a ensayar. No obstante, con frecuencias próximas al valor umbral de 0,5 MHz, se encontraban una fuerte discontinuidad en el valor de la tensión de cresta, dependiendo el valor final de la tensión de ensayo, de la precisión en el cálculo de la frecuencia de las oscilaciones próximas a 0,5 MHz.

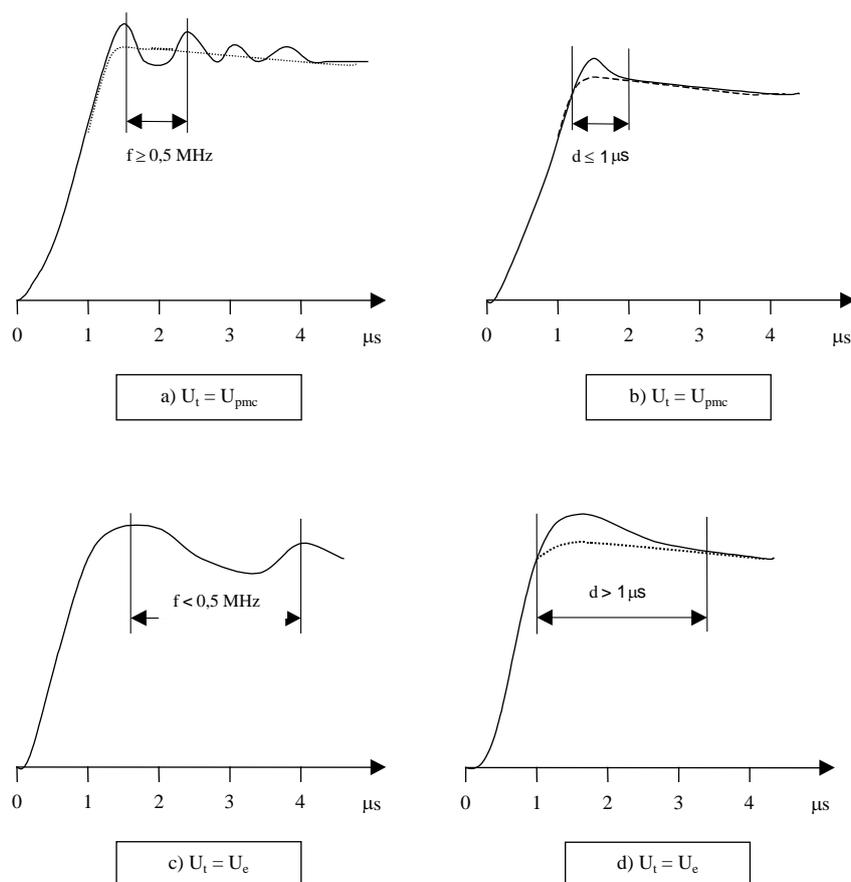


Figura 2-14 - Reglas de evaluación de impulsos tipo rayo con oscilaciones o sobretensión, según la antigua norma IEC 60060-1.

Este método ha causado principalmente tres problemas en la consistencia de las medidas para los ensayos de impulsos tipo rayo, que son los siguientes:

- La transición brusca desde el “valor máximo” al “valor máximo de la curva media” lleva a errores importantes cuando la frecuencia de la sobretensión está cerca de la frecuencia de transición de 0,5 MHz. Esta transición brusca no describe bien el comportamiento de los materiales aislantes y además también resulta difícil determinar con exactitud la frecuencia de la oscilación, si se utilizan métodos menos sofisticados.

- b) La elección de la curva media es subjetiva, por lo que depende mucho del técnico que realiza la medida y registro del impulso, aportando una incertidumbre adicional que resulta significativa en la evaluación de los parámetros de los impulsos tipo rayo plenos con oscilaciones amortiguadas.
- c) No está especificado claramente como determinar si un impulso es liso o tiene oscilaciones superpuestas muy pequeñas.

En los últimos tiempos, provocado por el avance en los sistemas de medida digitales, el uso de digitalizadores se ha convertido en habitual en los laboratorios de ensayo. Los digitalizadores, utilizados con un software de análisis, son capaces de proporcionar una gran precisión, muy superior a la de los osciloscopios analógicos con el posterior análisis gráfico. No obstante su utilización de una forma normalizada, se ha visto entorpecida debido a las imprecisiones en las especificaciones de las anteriores ediciones de las normas de los sistemas de medida.

Los laboratorios y universidades han desarrollado una gran variedad de programas (software de medida) y estos programas deben validarse con un conjunto de ondas matemáticas de parámetros perfectamente definidos o forma de onda de referencia, suministradas por el generador de datos de ensayo (TDG), según la Norma IEC 61083-2 {23}. Las diferencias entre los valores de los parámetros calculados por un programa de software concreto y aquellos dados en la Norma, suponen una componente adicional para la estimación de la incertidumbre.

Para poder solucionar estos problemas, el Grupo de trabajo de CIGRE D1.33 ha venido investigando y realizado trabajos durante las dos últimas décadas y junto con el comité IEC TC 42 MT4, han modificado la norma IEC 60060-1, de forma que en su edición actual de 2010, se ha incluido un método que soluciona en parte los problemas y dificultades existentes y conocidos hasta aquella fecha.

En el periodo de 1997 a 1999 y patrocinada por la Comunidad Europea, se llevó a cabo una investigación, realizada por 5 Institutos de

Investigación sobre los efectos en 5 tipos de aislamientos (dieléctricos), de las oscilaciones de frecuencia y de amplitud variable superpuestas a la tensión de impulso tipo rayo pleno {2}, {13}. Se determinó la probabilidad de descarga disruptiva mediante un impulso tipo rayo pleno liso cuya forma de onda era similar a la suma de dos formas de función exponenciales (doble exponencial) y la probabilidad de descarga disruptiva para el mismo objeto en ensayo para un impulso tipo rayo pero con oscilaciones superpuestas de frecuencia y amplitud variables, encontrándose el valor de la tensión a impulso tipo rayo pleno liso equivalente.

Según este estudio, el efecto de una oscilación superpuesta de frecuencia  $f$  se reduce a un factor  $k(f)$ , es decir, el valor de cresta del impulso equivalente es igual al valor de cresta del impulso liso aplicado más  $k(f)$  veces el valor de cresta de la oscilación y que matemáticamente se expresa en la ecuación (2.33). Los valores de  $k(f)$ , determinados experimentalmente en función de la frecuencia, se muestran en la Figura 2-15.

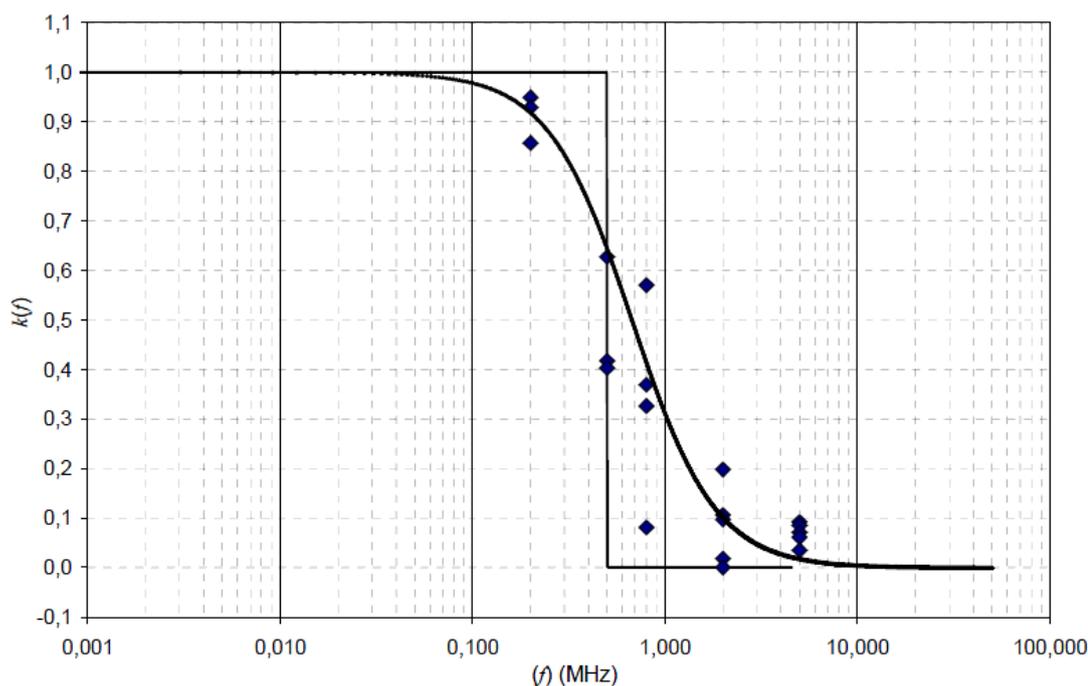


Figura 2-15 – Valores experimentales obtenidos para los impulsos con oscilaciones superpuestas en la zona de transición y función de la tensión de ensayo *k factor* considerada en la actual norma IEC-EN 60060-1

Aunque los datos de los diferentes tipos de aislamiento o dieléctricos eran bastantes dispersos, la conclusión principal fue muy clara. El efecto de las oscilaciones superpuestas depende de la frecuencia. En otras palabras, hay una transición gradual y no brusca con la frecuencia para ponderar la influencia de la sobretensión sobre el esfuerzo dieléctrico.

#### 2.4.2 TENSIÓN DE ENSAYO DE IMPULSO TIPO RAYO Y FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO

Las nuevas ediciones de la norma IEC 60060-1: 2010 {18}, así como de la IEEE Std 4 – 2013 {24}, introdujeron la función de tensión de ensayo, *k factor*, que permite la determinación de la tensión de ensayo sin interpretaciones subjetivas. A tal efecto, define la función de la tensión de ensayo como la función empírica que mejor representa el comportamiento dieléctrico cuando al aislamiento se le aplican impulsos de tensión tipo rayo con oscilaciones superpuestas en la cresta del impulso.

El valor de la tensión de ensayo,  $U_t$ , establece la equivalencia dieléctrica entre el impulso tipo rayo real aplicado al aislamiento con oscilaciones superpuestas y el impulso tipo rayo liso 1,2/50. El impulso liso equivalente proporciona el mismo estrés dieléctrico que el impulso realmente aplicado y es de misma polaridad.

La curva de tensión de ensayo es un "artefacto matemático" y no es la representación física del impulso tipo rayo suave equivalente. No obstante, la "curva de tensión de ensayo" se utiliza, según la nueva edición de la norma, para calcular los parámetros temporales y este método resulta preciso, reproducible y robusto.

Las grandes tolerancias en los parámetros temporales se basan en décadas de experiencia tal y como el proyecto europeo {2} ha corroborado en sus conclusiones, ya que los valores de los parámetros temporales no son muy críticos para determinar la descarga disruptiva. De hecho, las nuevas estimaciones de los parámetros temporales están suficientemente cerca de los valores que podría determinarse mediante la aplicación de los antiguos métodos.

El nuevo procedimiento normativo de cálculo de la tensión de ensayo  $U_t$  equivalente a una tensión normalizada tipo rayo a partir de un impulso con oscilaciones superpuestas de amplitud relativa de sobretensión  $\beta$  y de frecuencia de las oscilaciones  $f$ , requiere determinar la curva base  $U_b$  para poder aplicar la siguiente ecuación empírica, descrita en la norma:

$$U_t = U_b + k(f) \cdot (U_e - U_b) = U_b + k(f) \cdot \beta \quad (2.33)$$

donde

$\beta$  es la amplitud de la sobretensión expresada como

$$\beta = U_e - U_b$$

$U_e$  valor extremo del impulso tipo rayo real

$U_b$  valor extremo de la curva base.

$k(f)$  función de la tensión de ensayo

En el seno de CIGRE y por ende en el TC 42 del IEC, hubo mucha discusión sobre la fórmula más adecuada para el factor  $k(f)$ . No obstante, cuando se descubrió, mediante cálculos {15}, que las frecuencias de transición no tenían una gran influencia en los resultados y debido a que estaban en las zonas extremas de las frecuencias de sobretensión probables, se propuso la fórmula simple recogida en la norma.

La expresión de dicha fórmula es:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2} \quad (2.34)$$

Como los datos originales se obtuvieron a partir de oscilaciones superpuestas a una tensión de impulso tipo rayo plena, se ha utilizado en la norma el método de la curva residual, en el que la función de la tensión de ensayo, *k factor*, se aplica a la diferencia entre la tensión medida y una curva base ajustada.

La norma define la curva residual como la función temporal, diferencia entre la forma de onda registrada y la curva base, según la fórmula:

$$R(t) = U(t) - U_b(t) \quad (2.35)$$

En lo que respecta a la frecuencia de las oscilaciones  $f$ , la define como la frecuencia principal de la curva residual,  $R(t)$ .

Se considera que la elección de la función doble exponencial para la curva base proporciona una buena consistencia para la evaluación del valor de la tensión de ensayo. No obstante, para obtener una consistencia similar en la evaluación de los parámetros temporales, se hace necesario especificar el método de ajuste de esta función (lo que se expondrá en el

---

apartado siguiente), así como definir la función  $k(f)$ , como un filtro digital. Esto permite el cálculo automático y exacto de la ecuación (2.33) sin necesidad de determinar la frecuencia o frecuencias de la sobretensión.

De esta forma, los tres problemas mencionados al principio se han solucionado:

- a) Una función de transición gradual, ha reemplazado la transición brusca anterior, no siendo necesario tampoco determinar de una forma tan precisa, la frecuencia de oscilación de la sobretensión.
- b) La dificultad de elección de la curva media se ha solucionado mediante la introducción de una curva base bien definida y del tipo doble exponencial.
- c) Todas las tensiones a impulso tipo rayo se tratan de la misma manera, independientemente de que pueda considerarse por parte de los técnicos de laboratorio como un impulso liso o con oscilaciones superpuestas.

Utilizando la curva de la función de la tensión de ensayo se eliminará todo el ruido de alta frecuencia e incluso se eliminará la oscilación del frente del impulso, tal como se venía exigiendo por los requisitos de ensayo y evaluación ya que la eliminación de estas perturbaciones se consigue ahora automáticamente cuando se calcula la curva de la tensión de ensayo. Consecuentemente, los resultados de los parámetros del impulso son más consistentes cuando estas perturbaciones están presentes.

También se evita cualquier variación de baja frecuencia en la forma de onda del impulso, es decir, se conserva la forma general del impulso (que puede ser diferente a la de la curva base) ya que la curva base es una curva intermedia para extraer la curva residual (que es la oscilación). Las componentes de baja frecuencia de la curva residual se mantienen, dando una mayor consistencia a los resultados.

Además, para el caso de impulsos lisos, solo se eliminará el ruido de alta frecuencia y podrá aplicarse a todo tipo de impulsos independientemente

---

de donde se produzca la descarga (excepto si se produce en el frente del impulso).

#### 2.4.3 PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE LOS IMPULSOS DE TENSIÓN

El procedimiento descrito a continuación resulta de la implementación de la ecuación (2.32) y se utiliza en las evaluaciones realizadas mediante los programas de software aprobados y conformes a la norma IEC 61083-2, que proporcionan la curva de tensión de ensayo, a partir de la cual se pueden calcular los parámetros del impulso. Es el método normalizado descrito en las normas de técnicas de ensayo {18} y es el que básicamente pero con algunas consideraciones adicionales, se seguirá en los ensayos experimentales utilizados para el desarrollo de la presente tesis.

Los pasos del procedimiento normativo son los siguientes:

Se calcula el nivel base o cero de la curva registrada mediante el promedio de los niveles de tensión de la parte plana del principio del registro, cuando la tensión de entrada es cero.

A continuación, se realizará un adecuado ajuste de cero determinando una curva registrada con desfase compensado  $U_0(t)$ , tras ajustar su origen al valor inicial de cero creciente.

Una vez ajustada inicialmente la curva se halla el valor de cresta o extremo  $U_e$  de la curva registrada corregida  $U_0(t)$ . (Véase Figura 2-16).

Se registrarán todos los valores de tensión de la curva registrada  $U_0(t)$ , que estén comprendidos en el intervalo con la última muestra en el frente de la onda inferior a 0,2 veces el valor de la tensión extrema  $U_e$ , hasta la última muestra que, en la cola de la onda, sea superior a 0,4 veces  $U_e$ . En

este punto y el siguiente, según se describe más adelante y para reducir los errores, se realizará una propuesta que tenga en consideración más valores o muestras de la curva.

Con todos los datos obtenidos en el paso anterior, se ajustará la curva de tensión a la siguiente función denominada doble exponencial:

$$U_b(t) = U \left( e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right) \quad (2.36)$$

Donde:

$U_b(t)$  función de tensión correspondiente a la tensión de base  
 $t$  tiempo

Los cuatro parámetros independientes que hay que hallar mediante el ajuste, son:

- $U$ , amplitud constante
- $\tau_1$ , constante de tiempo 1 de la curva base
- $\tau_2$ , constante de tiempo 2 de la curva base
- $t_d$ , desfase temporal entre el origen de la curva ajustada y el punto de arranque de la curva registrada

La norma IEC-EN 60060-1 Ed 2010 {18}, recomienda para el ajuste de esta curva se utilice el algoritmo Levenberg-Marquardt {27} mediante la aplicación de la función "lsqcurvefit" del programa Matlab [según se especifica en el anexo C de la IEC 60060-1]. Para reducir tiempos de cálculo, se recomienda realizar una hipótesis inicial de los parámetros a ajustar, por ejemplo:

- $U$ : valor extremo de la curva  $U_0(t)$ ;
- $\tau_1 = 70\mu\text{s}$ ;
- $\tau_2 = 0,4 \mu\text{s}$  y
- $t_d$ : origen real o virtual de la curva

Aplicando la ecuación (2.35), se obtendrá la curva residual de la tensión de ensayo, según se muestra en la Figura 2-17 y, mediante la utilización de un filtro digital con una función de transferencia  $H(f)$  o respuesta

---

amplitud/frecuencia igual a la definida por la función de tensión de ensayo  $k(f)$  expresada en la ecuación (2.34), se obtendrá la curva residual filtrada  $R_f(t)$ . Dicho filtro digital es un filtro de respuesta infinita a impulso con fase cero, tal como se desarrolla en la referencia {27}.

Sumando la curva residual filtrada  $R_f(t)$  y la curva base  $U_b(t)$  se obtendrá finalmente la curva de tensión de ensayo,  $U_t(t)$  a partir de la cual se calcularán el valor de la tensión de ensayo  $U_t$  y el resto de los parámetros temporales del impulso (tiempo de frente  $T_1$  y tiempo hasta el valor mitad  $T_2$ ).

Adicionalmente se calculará también el valor de la amplitud relativa de la sobretensión, mediante la expresión siguiente:

$$\beta' = 100 \cdot \frac{(U_e - U_b)}{U_e} \% \quad (2.37)$$

En las Figura 2-16, Figura 2-17 y Figura 2-18 se muestran gráficamente las diferentes fases y cálculos del procedimiento.

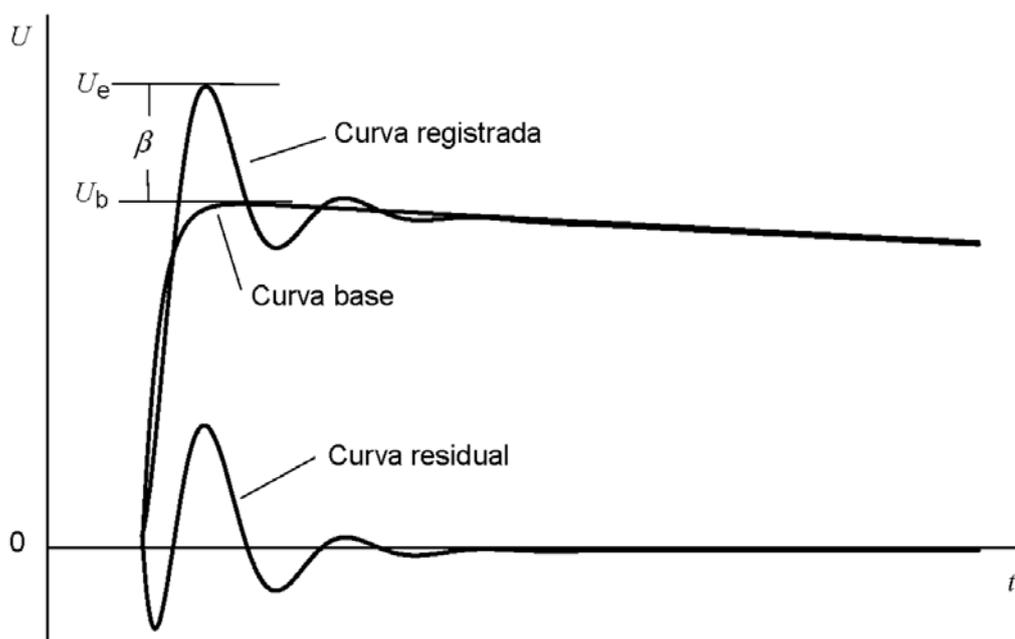


Figura 2-16 – Curva base y registrada que muestran la sobretensión y la curva residual

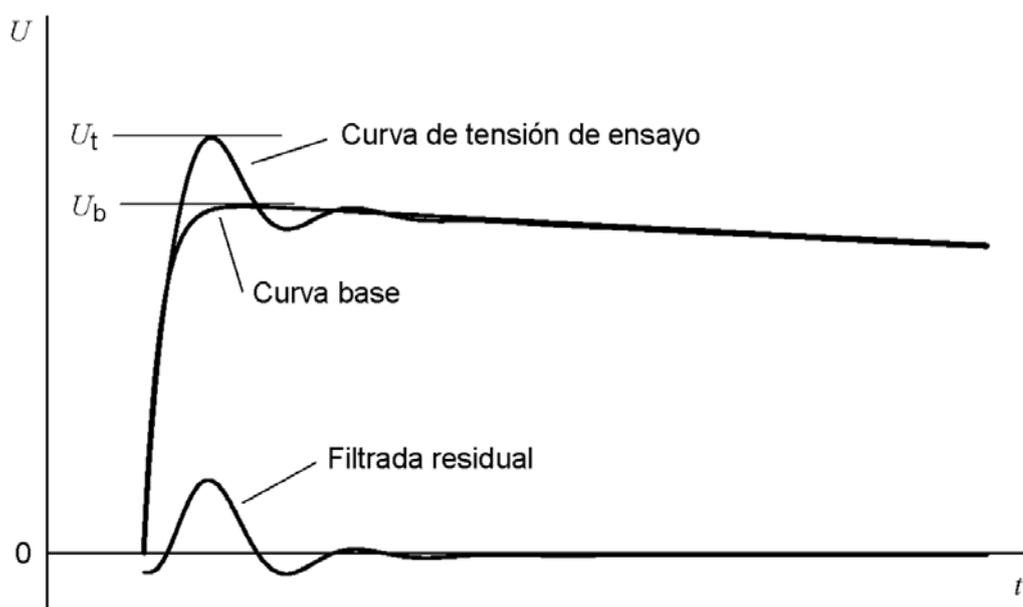


Figura 2-17 – Curva de tensión de ensayo (suma de la curva base y la curva residual filtrada)

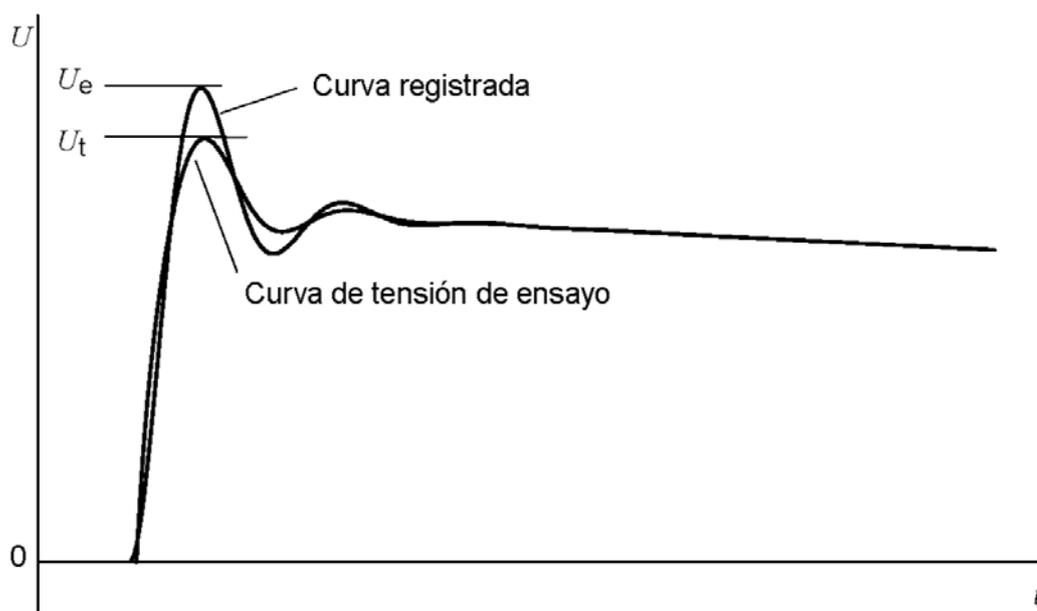


Figura 2-18 – Curvas de la tensión de ensayo y curva registrada

Basándose en este procedimiento normativo general, en el capítulo siguiente se desarrollará un procedimiento que permita realizar los ensayos experimentales conducentes al análisis de las distintas formas de onda de impulsos tipo rayo generados con las que, mediante el análisis de los diferentes parámetros, se puedan calcular las funciones de la tensión de ensayo correspondientes a las diferentes configuraciones de ensayo y campo eléctrico utilizadas.



## Capítulo 3

# Materiales y Métodos - Procedimiento experimental para la determinación de la función de tensión de ensayo

---

### **3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO**

En este capítulo se va a describir el procedimiento experimental de ensayo para la determinación de la función de tensión de ensayo, basándose en el procedimiento general descrito anteriormente completado con algunas modificaciones y mejoras, con objeto de disminuir la incertidumbre de los resultados de los ensayos, de modo que éstos se puedan ajustar y generalizar mediante expresiones matemáticas.

Para comprobar el comportamiento de las diferentes configuraciones de ensayo cuando se aplican impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas se han utilizado dos montajes de ensayo distintos.

### **3.1 MONTAJES PARA EL ENSAYO EXPERIMENTAL (INSTALACIÓN 1G E INSTALACIÓN 2 G)**

A continuación se describen los dos tipos de instalaciones de generación de impulsos oscilantes o montajes de ensayo utilizados para los trabajos de esta tesis.

La primera, que de forma general se denominará a lo largo del texto, como “Instalación 2G”, está formada por dos generadores sincronizados. El primero es un generador de impulsos tipo Marx convencional, como ya se ha descrito en el capítulo 2 anterior, capaz de generar impulsos lisos. El segundo, consiste en un circuito oscilante R-L-C, capaz de generar ondas senoidales amortiguadas de amplitud y frecuencia variable, para que estas ondas se puedan superponer al impulso tipo rayo liso y de manera que se pueda conformar un impulso oscilante con los parámetros deseados.

La segunda instalación que se utilizará en la realización de los experimentos y que a lo largo del texto se denominará como “Instalación 1G”, consta de un único generador también tipo Marx, pero modificado con inductancias serie, para generar impulsos oscilantes que tengan los parámetros deseados.

#### **3.1.1 DISPOSICIÓN DE ENSAYO UTILIZANDO DOS GENERADORES DE IMPULSOS SINCRONIZADOS (INSTALACIÓN 2G)**

##### **3.1.1.1 Sistema generador**

El montaje consta de dos generadores independientes pero sincronizados, cuyo esquema general se presenta en la Figura 3-1.

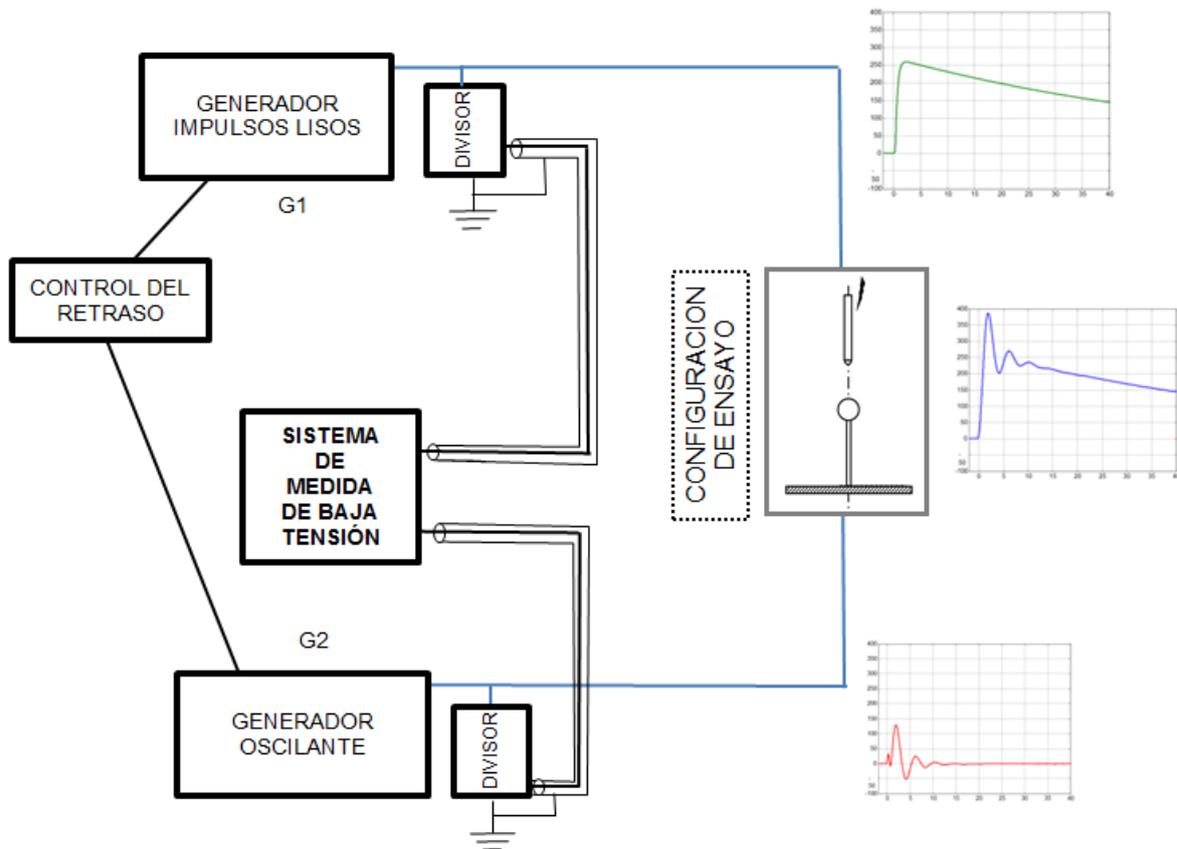


Figura 3-1 – Montaje de ensayo consistente en dos generadores de impulsos sincronizados

Para esta disposición, el generador G1 es el que genera impulsos tipo rayo lisos (1,2/50), que serán los se van a considerar durante todos los ensayos experimentales, como “curva base”.

En la Figura 3-2 se muestra un esquema general básico del generador de impulsos lisos.

Por otro lado, el generador G2, consiste en un circuito oscilante R-L-C, encargado de generar formas de onda senoidales amortiguadas cuyos parámetros:

- amortiguamiento de la oscilación  $\delta_h$ ,
- frecuencia de las oscilaciones  $f_i$ ,

- amplitud relativa de la sobretensión  $\beta'_j$ .

son regulados a voluntad, mediante la adecuada elección de los valores de  $R$ ,  $L$  y  $C$ .

Según la terminología descrita en el procedimiento general para la determinación de los parámetros de los impulsos de tensión, será este generador el que proporcione una onda de salida, igual a la curva residual  $R(t)$ .

En la Figura 3-3 se muestra un esquema general básico del generador oscilante.

La onda oscilante de salida del generador 2 (curva residual), deberá superponerse a la onda de salida del generador 1, en el instante deseado, es decir, en el tiempo en que se alcance la cresta del impulso liso.

Cuando las tensiones de salida de cada generador se aplican a los dos electrodos de la configuración bajo ensayo (célula de ensayo), la diferencia entre ambas tensiones resulta aplicada al espacio de aire sometido a ensayo y de esta forma, se obtiene un impulso oscilante en la configuración que se está ensayando.

Como el objetivo de esta disposición de ensayo es la generación de impulsos tipo rayo oscilantes, que a su vez sean lo más parecidos posible a los que se obtienen cuando se ensayan objetos reales, la posición relativa de las oscilaciones con relación al instante que corresponde con la máxima amplitud del impulso liso, es crítica. Dicha posición relativa respecto al valor máximo, es variable para cada frecuencia de oscilación, lo que obliga a tener un control muy fino de dicho tiempo de retardo. Consecuentemente, se deberá regular de una forma muy estricta tiempo de retardo de disparo entre los dos generadores y mediante el control digital del mismo, se consigue un muy buen control sobre el mismo.

Para mejorar la sincronización del tiempo de retardo del generador G2 (circuito oscilante), respecto del generador G1 (generador de impulsos lisos) y asegurar su repetibilidad, se utiliza una cascada de explosores semiesféricos conectados por resistencias de alto valor ( $R_{dt}$ ) que garantizarán una distribución uniforme de la tensión entre todos los explosores antes de que se produzca el cebado. Las inductancias ( $L$ ) del generador G2 tienen una baja capacidad entre espiras y de éstas a tierra, así como una baja resistencia. Las construcciones utilizadas sobre cilindro de fibra de vidrio, sobre baquelita, o sobre un soporte de resina epoxy, junto con las soluciones adoptadas para cada ensayo se resumen en {10} y {11}.

De forma similar, la construcción de la resistencia  $R$  debe reducir las capacidades e inductancias parásitas; para ello existen tres construcciones que proporcionan buenos resultados: resistencias con “bobinado de Ayrton-Perry” que presentan pequeña inductancia, pero alta capacidad entre espiras, “resistencias en zig-zag” de comportamiento muy parecido a la anterior, y “resistencias en forma de filamento recto”, que reducen mucho la capacidad parásita (no existen espiras) pero su inductancia es superior a la de las construcciones anteriores.

Para el propósito de los ensayos experimentales se adoptó la tercera solución de las anteriores como la mejor, ya que al eliminar la capacidad parásita se obtuvo una frecuencia mucho más próxima a la teórica que depende sólo de los valores de  $R$ ,  $L$  y  $C$ , según ya se ha explicado en el apartado 2.1 de esta tesis y formulado por la ecuación (2.7).

Adicionalmente, se debe mantener el tiempo de frente del impulso de tensión dentro de los límites del  $\pm 30\%$ , especificados en la Norma IEC 60060-1, y se deberá obtener un valor de la tensión máxima (extrema)  $U_e$ , superior al de la curva  $U_b$ , en una magnitud de al menos el 70% de la amplitud de la primera oscilación. Esta última restricción, significa que las oscilaciones se tienen que superponer en la zona de la cresta del impulso. Estos criterios y condicionantes se detallan en la referencia {10}.

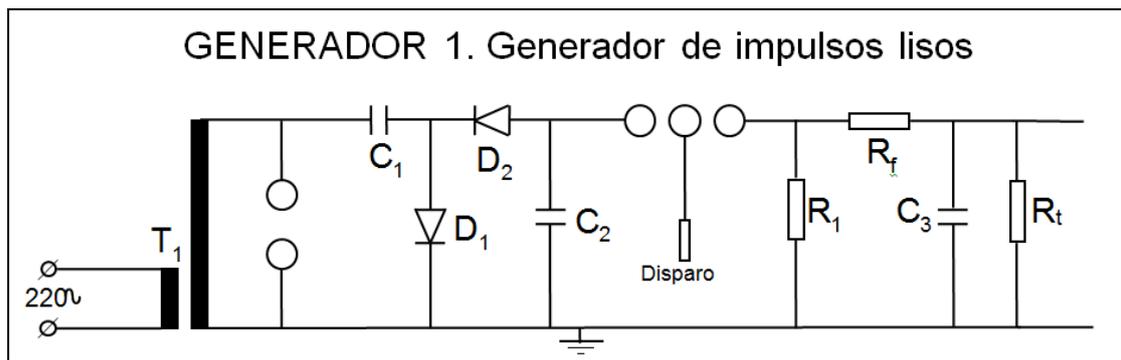


Figura 3-2 – Esquema general del generador de impulsos lisos

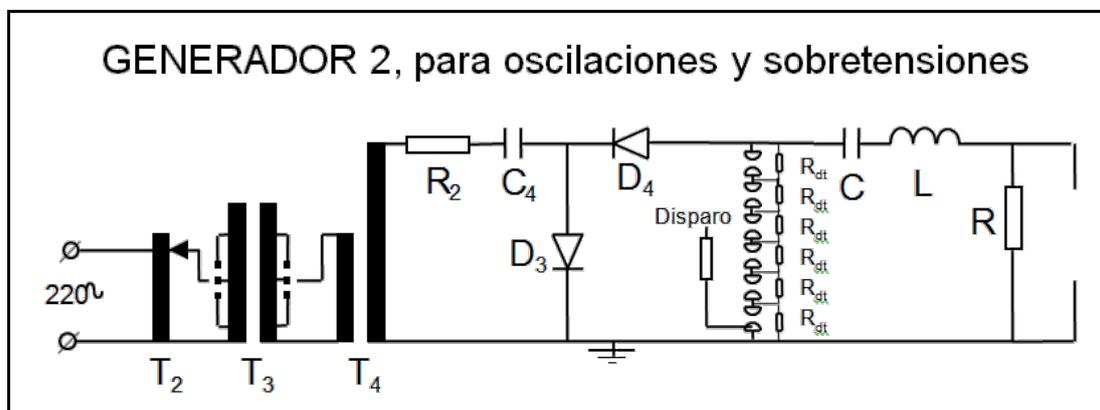


Figura 3-3 – Esquema general del generador de las oscilaciones y sobretensiones

Para controlar bien el tiempo de retardo, se realizó previamente a los ensayos experimentales, una simulación matemática variando el retardo entre 0 ns y 1200 ns para cada frecuencia de oscilaciones prevista, de forma que en la Figura 3-4 se muestran los impulsos más representativos a las frecuencias de oscilación 35 kHz, 80 kHz y 250 kHz, para una amplitud relativa de sobretensión del orden del 10%.

El control del retardo en el disparo de ambos generadores se realiza mediante una tarjeta electrónica de forma que la repetibilidad de los valores de retardo aplicados, es mejor de 200 ns.

MATERIALES Y MÉTODOS – PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO

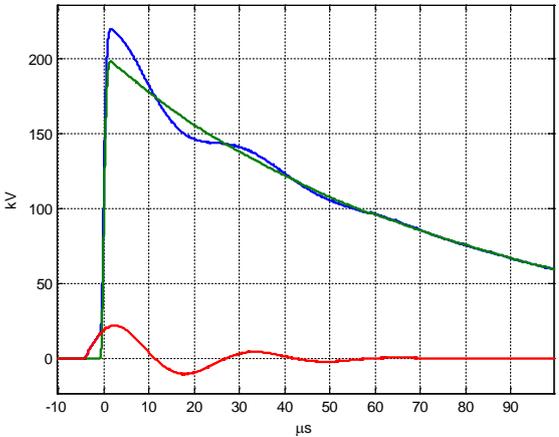
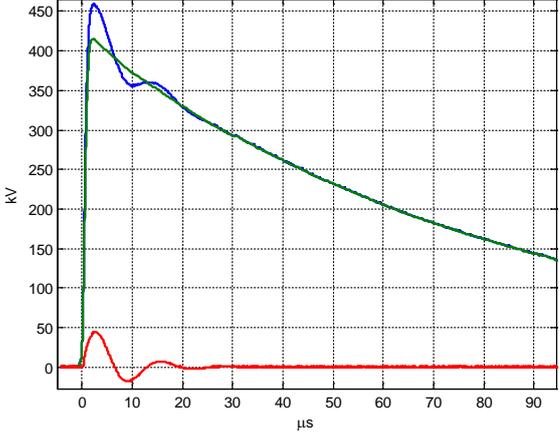
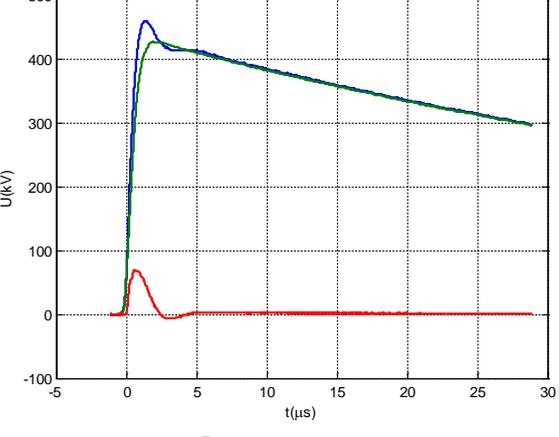
Frecuencia de la oscilación	Oscilograma	Amplitud relativa de sobretensión $\beta'$
30 kHz	<p style="text-align: center;">JH26M<sub>0</sub>4</p>  <p style="text-align: center;">Retraso=4000ns</p>	10%
80 kHz	<p style="text-align: center;">JH11E<sub>0</sub>4</p>  <p style="text-align: center;">Retraso=800ns</p>	11%
250 kHz	<p style="text-align: center;">II17B<sub>2</sub></p>  <p style="text-align: center;">Retraso=900ns</p>	12%

Figura 3-4 – (página anterior) Retardos escogidos según las frecuencias de oscilación de 0,2 MHz, 0,5 MHz y 0,8 MHz

### 3.1.1.2 Sistemas de medida

Para la configuración de dos generadores sincronizados (Instalación 2G), resulta necesario utilizar dos divisores de tensión independientes. El sistema de medida 1 medirá los impulsos lisos 1,2/50 aplicados por el Generador 1 y tendrá un rango de medida adecuado al máximo valor de cresta previsto. El sistema de medida 2 medirá correctamente la máxima amplitud de la oscilación a la frecuencia prevista. La frecuencia de la oscilación máxima a medir, será del orden de 1 MHz.

Los dos divisores conectados a través de sendos atenuadores, comparten un mismo registrador digital que dispone de 2 canales de entrada, donde se conectan las salidas de los atenuadores, utilizados para adaptar la tensión a la entrada del registrador.

Teniendo en cuenta los factores de escala de las tensiones de entrada que se aplican a cada uno de los canales del registrador, la diferencia entre las dos tensiones registradas, es el impulso tipo rayo oscilante resultante, que es aplicado al objeto en ensayo, que en los experimentos corresponde al espacio libre de aire que se está analizando.

La estabilidad de ambos sistemas de medida durante los ensayos experimentales para determinar los valores de la función de tensión de ensayo k-factor, debe ser mejor que el 1%, tal como se especifica en la norma de sistemas de medida en alta tensión, IEC 60060-2 {19}.

El sistema de medida 1 de la Instalación 2G es un divisor capacitivo aprobado y calibrado conforme a los requisitos recogidos la norma IEC 60060-2. La incertidumbre combinada para las medidas de la máxima amplitud de los impulsos plenos lisos aplicados, es mejor que 0,5% (0,05 pu).

El sistema de medida 2 de la instalación 2G, consiste en un divisor resistivo, también aprobado y calibrado conforme a los requisitos recogidos en la misma norma de sistemas de medida en alta tensión IEC 60060-2 {19}. Pero en este caso, el ancho de banda  $f_B$  del sistema de medida, debe ser elegido cuidadosamente para medir oscilaciones de hasta 1 MHz.

Para un sistema de medida, el ancho de banda  $f_B$ , es la frecuencia a la que la función de transferencia se atenúa en un factor

$$1/\sqrt{2} = 0,707 = -3dB.$$

La frecuencia a la que la atenuación es del 1% (0,01 p.u.) o mejor, puede expresarse en función del ancho de banda  $f_B$ , mediante la siguiente expresión.

$$f_{1\%} = 0,147 f_B \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta la expresión anterior, la máxima frecuencia de la oscilación que puede medirse con un error máximo del 1%, será aproximadamente 7 veces inferior a la frecuencia correspondiente al ancho de banda. En consecuencia, es necesario utilizar un sistema de medida con un ancho de banda como mínimo 7 veces ( $1/0,147 \approx 7$ ) la frecuencia de oscilación máxima esperada que se vaya a medir.

El sistema de medida 2, al ser un divisor resistivo, se caracteriza mediante porque tiene un tiempo de respuesta escalón de  $T = 18$  ns que, según se especifica en la norma de caracterización de los sistemas de medida IEC 60060-2, tiene un ancho de banda que viene expresado por la siguiente ecuación, en función del tiempo de respuesta escalón.

$$f_B = \frac{1}{4,1 T} \quad (3.2)$$

Según la fórmula anterior, con un tiempo de respuesta a escalón de 18 ns el ancho de banda resultante es de aproximadamente 14 MHz, que resulta adecuado para la medida de impulsos con frecuencias de oscilación de hasta 2 MHz.

Como para el caso de ensayos realizados la frecuencia de la oscilación más elevada que se considera es del orden de 1 MHz, podría ser suficiente un ancho de banda del divisor de 7 MHz, correspondiente a una respuesta escalón del orden de 35 ns, que está tres veces por encima del obtenido para el divisor de tensión utilizado en los experimentos.

El software utilizado permite evaluar todos los parámetros de los impulsos tipo rayo que se van a considerar en los experimentos. Este software ha sido desarrollado y validado mediante ondas matemáticas, según se detalla en {12}, y también de acuerdo a lo especificado en la norma IEC 61083-2 {23} sobre instrumentos y software utilizado para las medidas de impulsos de alta tensión.

Las principales conclusiones de la validación realizada han sido que el error de medida del software es inferior al 0,2% (0,02 pu) cuando se mide el valor de cresta de un impulso pleno liso sin oscilaciones o con oscilaciones de hasta 200 kHz, incluso con ruido superpuesto.

Adicionalmente, para impulsos con oscilaciones con frecuencias de oscilación de hasta 5 MHz, el error en la medida global de la tensión de cresta del impulso resulta siempre inferior al 1%, obteniéndose errores mayores para frecuencias de la oscilación crecientes, hasta llegar al error máximo del 1% (0,01 pu), para las frecuencias de oscilación de 5 MHz.

En la Figura 3-5 se muestra el esquema del sistema de medida y control utilizado en la disposición de dos generadores (Instalación 2G).

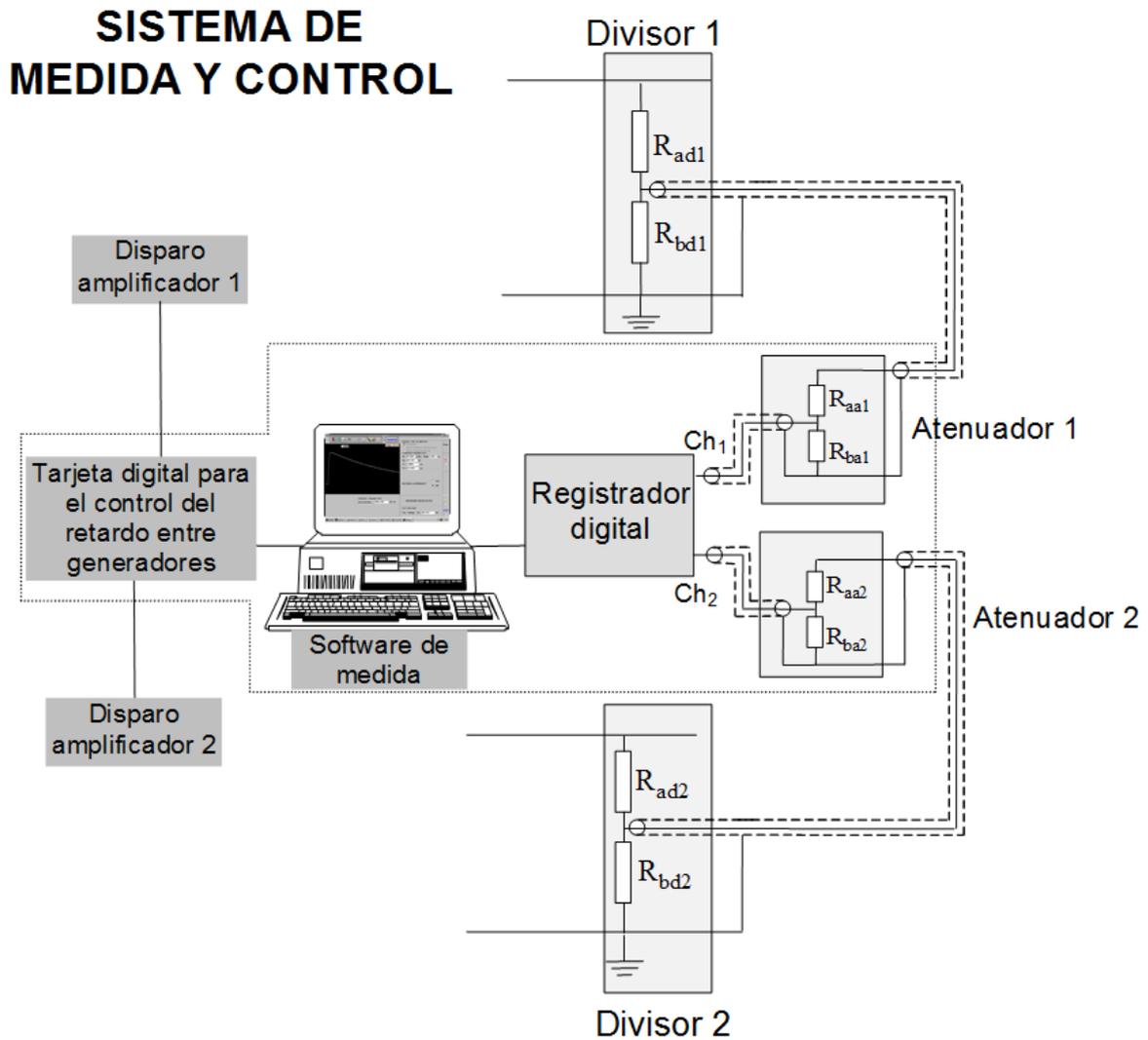


Figura 3-5 – Esquema básico del sistema de medida y control del montaje de 2 generadores (Instalación 2G)

#### 3.1.1.3 Limitaciones del sistema de 2 generadores:

Las limitaciones de esta disposición de ensayo, es el nivel de tensión de impulso aplicados no pueden superar 1,5 MV, debido a problemas de aislamiento del Generador 2 respecto a tierra, ya que la tensión máxima soportada por el aislamiento del generador 2 es de 450 kV.

### 3.1.2 DISPOSICIÓN DE ENSAYO UTILIZANDO UN GENERADOR MARX MODIFICADO (INSTALACIÓN 1G)

Para poder conseguir en los ensayos experimentales mayores niveles de tensión, se utiliza una disposición de ensayo adicional mediante un único generador G3.

#### 3.1.2.1 Generador de impulsos oscilantes

Este generador es un generador de impulsos tipo Marx convencional de 12 etapas, en el que se utiliza la capacidad de frente o de carga del generador,  $C_2$ , y conectando en serie a la salida una inductancia ajustable con el fin de alcanzar tensiones de impulso elevadas, hasta 2,0 MV y con oscilaciones superpuestas. Con este generador se pueden controlar los parámetros fundamentales de los impulsos oscilantes. Su esquema se representa en la Figura 3-6.

Este generador de ensayo se ha modificado mediante la conexión en serie de un conjunto de inductancias (6 de valor 64  $\mu\text{H}$ ), conectadas a su vez en configuración variable serie paralelo, para conseguir impulsos oscilantes con diferentes frecuencias de oscilación.

Adicionalmente y mediante el ajuste del valor de la resistencia en serie conectada a la salida del generador, podrá modificarse el valor relativo de amortiguamiento de la oscilación  $\delta_h$  y el valor relativo de la amplitud de la sobreoscilación  $\beta'_j$ .

El principal inconveniente de esta configuración es que los parámetros de la oscilación (frecuencia, amortiguamiento y amplitud) no son independientes entre sí, al ser tener las inductancias una componente resistiva que no puede modificarse, por lo que los grados de libertad en la generación de los impulsos oscilantes son limitados.

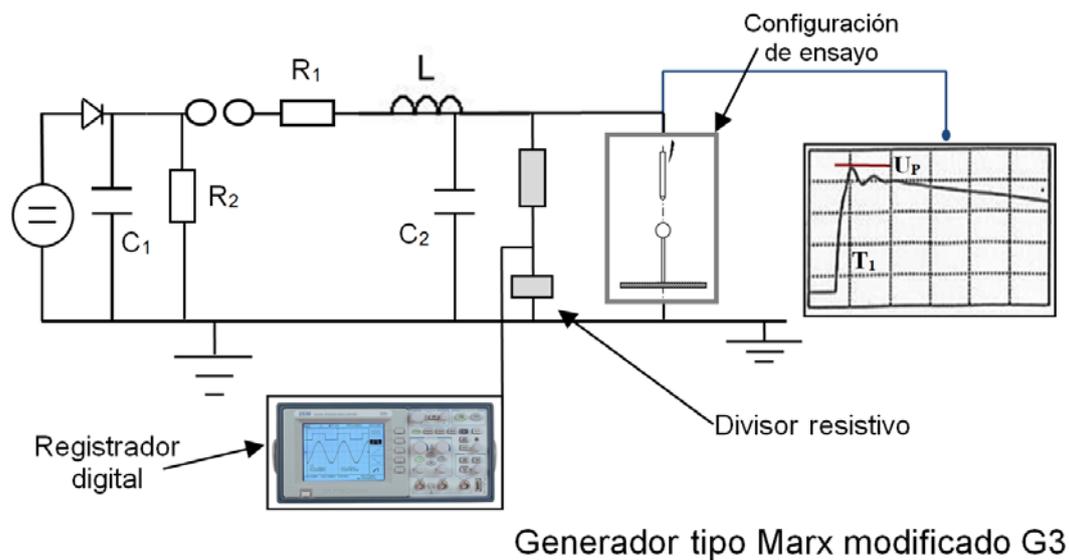


Figura 3-6 – Generador tipo Marx modificado para generar impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas

Tal como ya se ha visto en el capítulo 2.1, este tipo de generadores proporcionan impulsos con oscilaciones superpuestas cuya frecuencia de oscilación viene dada por la ecuación (2.7) del capítulo 2.1

### 3.1.2.2 Sistema de medida

Al ser un único generador el que provoca el impulso, las oscilaciones superpuestas a los impulsos de tensión deberán medirse con un único sistema de medida, por lo que la frecuencia máxima de la oscilación que se pueda medir vendrá limitada por el ancho de banda del divisor utilizado.

El divisor de tensión utilizado consiste en un divisor resistivo que tiene una respuesta escalón  $T=18$  ns y que es el mismo que el utilizado en el generador 2 de la disposición de dos generadores expuesta en el apartado anterior. El ancho de banda del divisor considerado, aplicando la ecuación (3.2), resulta de 14 MHz.

Como en la práctica cuando se están analizando experimentalmente espacios de aire grandes con campos no homogéneos, no se espera encontrar frecuencias de oscilación superiores a 800 kHz, el ancho de banda mínimo del sistema de medida debería ser superior a 5,6 MHz, es decir que con un divisor resistivo con una respuesta escalón de  $T=18$  ns como el utilizado ( $f_B \sim 14$  MHz) y que está calibrado y es conforme a la norma IEC 60060-2 {19}, resulta más que suficiente para la medida.

Para este sistema de medida, además de un registrador digital conforme con los requisitos definidos en la norma IEC 60083-1 {22}, sobre registradores digitales para las medidas durante los ensayos de impulsos de alta tensión, también se ha utilizado el software descrito para la instalación 2G del apartado 3.1.1.2, que permite evaluar todos los parámetros de los impulsos tipo rayo oscilantes que se van a considerar en los ensayos. Este software ha sido validado y es conforme con la norma IEC 61083-2 {23} sobre evaluación del software utilizado para obtener los parámetros de las formas de onda de los impulsos de alta tensión.

### 3.1.3 DETERMINACIÓN DE LA CURVA BASE

En ambos montajes de ensayo, con un único generador o con dos generadores sincronizados, el método utilizado para calcular la curva base se ha modificado ligeramente respecto al indicado en la norma como se ha descrito en el apartado 2.4. Esta modificación se ha realizado a tenor de varios estudios recientes y considerados en {36} y {47}, que indican que la determinación de la curva base mediante el ajuste de una función doble exponencial, debe realizarse con un procedimiento especial cuando existen valores elevados de sobretensión relativa ( $\beta' \geq 20\%$ ). Esta conclusión se ha obtenido ya que al aplicar el método normativo al impulso oscilante obtenido mediante la composición de un impulso liso del generador 1 (equivalente a la curva base) y de una onda oscilante del generador 2 (equivalente a la curva residual), se obtiene una curva base calculada con desviaciones significativas hacia arriba en la zona de frente o hacia abajo en el tramo final de zona de cola, debido a la contribución

de la sobretensión relativa de elevado valor en el cálculo de la misma (véase el apartado 2.4.3 y el anexo B de la norma IEC 60060-1).

En los ensayos experimentales realizados en esta tesis, para evitar estos errores o reducirlos al mínimo posible, el método utilizado para determinar la curva base consiste en encontrar una función-curva doble exponencial con la que se obtenga el mejor ajuste de los puntos obtenidos en la curva del impulso oscilante, desde que alcanza por primera vez el 10% del valor  $U_e$  en el frente de la curva, hasta que baja por primera vez del 10% del valor de  $U_e$  en la cola de dicha curva, a diferencia del valor del 20% en el frente y del 40% en la cola del valor de  $U_e$ , que es el que se ha demostrado como inconsistente para valores de amplitud relativa de sobretensión elevados.

Este procedimiento, resulta equivalente al método II propuesto en {36} y {47}, y es el que proporciona el mejor ajuste, respecto al impulso liso real, para el cálculo de la curva base ya que, considerando más puntos de la curva, ésta se verá menos influenciada por la parte de la sobretensión de la curva oscilante.

Matemáticamente, se expresa por la siguiente ecuación (3.3).

$$U_b(t) = U \left( e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right) + C e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

donde

- $U_b(t)$  función de tensión correspondiente a la tensión base
- $U, C$  valores de amplitud constantes
- $\tau_1, \tau_2$  constantes de tiempo de la curva
- $t_d$  desfase temporal entre el origen de la curva ajustada y el punto de disparo de la curva registrada
- $\delta$  amortiguamiento
- $\omega t$  pulsación de la onda senoidal de amortiguamiento

En esta ecuación, el primer sumando corresponde a la ecuación para el cálculo de la curva base, definida por la ecuación (2.36) que es la que se

---

utiliza normativamente para calcular la curva doble exponencial. El segundo sumando es una curva senoidal amortiguada con una exponencial en la que  $\delta$  es el amortiguamiento que se va a considerar en los ensayos experimentales pues para sobretensiones con una  $\beta$  de valor elevado, tiene cierta influencia.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO

El procedimiento propuesto consiste en determinar de forma experimental para una determinada configuración de campo eléctrico y de distancia en aire, el valor de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, para cada frecuencia de oscilación a partir de dos ensayos. Un ensayo con impulsos tipo rayo lisos 1,2/50 para determinar el valor de referencia  $U_t$  y el segundo, con impulsos tipo rayo oscilantes de la frecuencia considerada, a fin de calcular los valores de la tensión extrema  $U_e$  y de la curva base  $U_b$  con los que determinar el valor de la función de la tensión de ensayo,  $k(f)$ :

$$k(f) = \frac{U_t - U_b(f)}{U_e(f) - U_b(f)} \quad (3.4)$$

Con objeto de determinar la función de tensión de ensayo, *k factor*, el valor de  $U_t$  se identificara con el nivel del 50% de probabilidad de descarga disruptiva,  $U_{50\%}$ , ya que, aunque  $U_t$  se calcula normalmente para el nivel de probabilidad que caracteriza la tensión soportada ( $U_{10\%}$ , para aislamiento autorregenerable), el error introducido se considera despreciable, tal como se describirá más adelante.

Hay que tener en cuenta que las condiciones atmosféricas ambientales presentes en el laboratorio durante la realización de los ensayos experimentales pueden variar, al dilatarse mucho en el tiempo estos

---

ensayos (varias horas), y esta variación es uno de los factores que condicionan la evaluación de los impulsos tipo rayo, añadiendo incertidumbres inaceptables a los resultados de los ensayos, si no se aplican las correcciones correspondientes.

Con tal fin y con objeto de reducir en la práctica la incertidumbre por efecto de la corrección debida a la influencia de las condiciones atmosféricas, se deberán realizar tres conjuntos de ensayos para cada determinación de un valor de la función de tensión de ensayo  $k(f)$ : un conjunto de impulsos tipo rayo con oscilaciones de frecuencia  $f$  superpuestas en la cresta de la onda y dos conjuntos de ensayos idénticos, con impulsos plenos lisos 1,2/50, aplicando un primer conjunto “antes” de los impulsos con oscilaciones y el otro conjunto “después” de ellos.

Las correcciones por condiciones atmosféricas normalizadas que se recogen en la norma IEC 60060-1 {18} están establecidas para la realización de ensayos con impulsos tipo rayo lisos y por lo tanto no resultan aplicables de forma general, a impulsos que tengan oscilaciones superpuestas. Para la aplicación de la fórmula para determinar el valor de la función de la tensión de ensayo  $k(f)$  se deben utilizar siempre valores de tensión referidos a las mismas condiciones atmosféricas, de forma que en ese caso, el valor obtenido de la función no se verá afectado si éstas son las condiciones atmosféricas de referencia o las presentes durante los ensayos con impulso oscilante. Para evitar la aparición de errores no conocidos debidos la conversión de los valores de  $U_e$  y de  $U_b$  a las condiciones de referencia, se opta por corregir los valores de las tensiones de ensayo  $U_t$  cuando se aplican impulsos 1,2/50 lisos y cuya correlación está demostrada, a las condiciones atmosféricas existentes en el laboratorio durante cada aplicación de cada uno de los impulsos oscilantes.

En cada uno de estos conjuntos de ensayos, se obtendrá la función de probabilidad de descarga  $U_t$ , designándose como  $p_b(U_t)$  a la correspondiente al impulso aplicado “antes” (subíndice “b” corresponde a “before”) y  $p_a(U_t)$  la correspondiente al impulso aplicado “después”

(subíndice “a” corresponde a “after”), de realizar el ensayo de impulsos con oscilaciones superpuestas en la cresta (impulsos oscilantes). Estas funciones de probabilidad, se deben corregir a las condiciones atmosféricas de referencia, y calcular la función de probabilidad media  $p(\bar{U}_t)$  de ambas funciones de probabilidad que se tomará como valor de la tensión de ensayo  $U_t$  para el cálculo de  $k(f)$ . Esta hipótesis que se considerará razonablemente válida siempre que la diferencia entre ambas funciones de probabilidad sea suficientemente pequeña (menor que 0,05 p.u.) y además porque permitirá realizar posteriormente, la corrección de dicho valor a las condiciones atmosféricas presentes durante los ensayos con impulsos oscilantes de una forma correcta y normativa al corresponder a impulsos 1,2/50 lisos. Adicionalmente y de forma empírica, también se considera válida esta hipótesis siempre que el tiempo total entre el inicio del primer conjunto de ensayos y la finalización del último conjunto de ensayos con impulsos lisos no supere un periodo total de 6 horas.

Para el conjunto de ensayos con impulsos oscilantes, el valor de la función de tensión de ensayo a determinar vendrá condicionado por la oscilación presente en el impulso definido por:

- el valor relativo de amortiguamiento de la oscilación  $\delta_h$ ,
- la frecuencia de las oscilaciones  $f_j$ ,
- el valor relativo de la amplitud de la sobretensión  $\beta'_j$ .

A lo largo de este capítulo, cuando se cita un determinado parámetro (normalmente la función de tensión de ensayo,  $k$ ), el subíndice “h” identificará valores diferentes de amortiguamiento relativo  $\delta$ , el subíndice “j” identificará las diferentes frecuencias de la oscilación  $f$ , y el subíndice “j” identificará las diferentes amplitudes relativas de la sobretensión  $\beta'$ .

Para determinar las funciones de probabilidad de descarga, tanto con impulsos tipo rayo lisos  $p(U_t)$  como con impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas (impulsos oscilantes)  $p(U_{hij})$ , se aplica el método de los niveles múltiples, denominado “método de la clase 1” según la norma IEC 60060-1 {18} y que se ha descrito anteriormente en el apartado 2.2.

---

Para los ensayos experimentales con los impulsos oscilantes, se obtendrán dos funciones de probabilidad. Una asociada al valor extremo (valor máximo) de la tensión  $p(U_{e_{hij}})$  y la otra asociada al valor de cresta de la curva base  $p(U_{b_{hij}})$ . Ambas funciones estarán asociadas también a los diferentes valores de amortiguamiento (subíndice “h”), frecuencia de la oscilación (subíndice “i”) y amplitud de la oscilación (subíndice “j”).

### 3.2.1 DETERMINACIÓN DE UN VALOR $k_{hij}$ DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO MEDIANTE EL ENSAYO DE $U_{hij}(50\%)$ PARA EL CASO DE CAMPOS NO HOMOGÉNEOS

#### 3.2.1.1 Probabilidad de descarga con impulso tipo rayo liso antes del ensayo de impulso tipo rayo oscilante, $p_b(U_t)$ :

El primer conjunto de ensayos, primer paso para obtener la función de la tensión de ensayo asociada a una configuración eléctrica y polaridad de impulsos dada, tiene por objeto determinar la función de probabilidad de descarga  $p_b(U_t)$  aplicando el método de los niveles múltiples (Clase 1), con  $m \geq 5$  niveles de tensión y con un número de aplicaciones  $n \geq 10$ , en cada nivel de tensión, incrementando de tensión entre 1% y el 6% de la tensión extrema ( $\Delta U = (0,01 \div 0,06)U_e$ ), al pasar de un nivel al siguiente.

Los valores de tensión de descarga obtenidos se corrigen a las condiciones atmosféricas de referencia desde las condiciones presentes en cada momento del ensayo.

Conforme a lo indicado en la IEC 60071-2 {21} y que se ha tratado en el capítulo 2, cuando se ensayan espacios de aire grandes y para obtener un mejor ajuste de la función, es conveniente utilizar la distribución Weibull. En la Figura 3-7 se muestra para una configuración dada, la

representación de la función de probabilidad experimental ajustada mediante una distribución de Weibull.

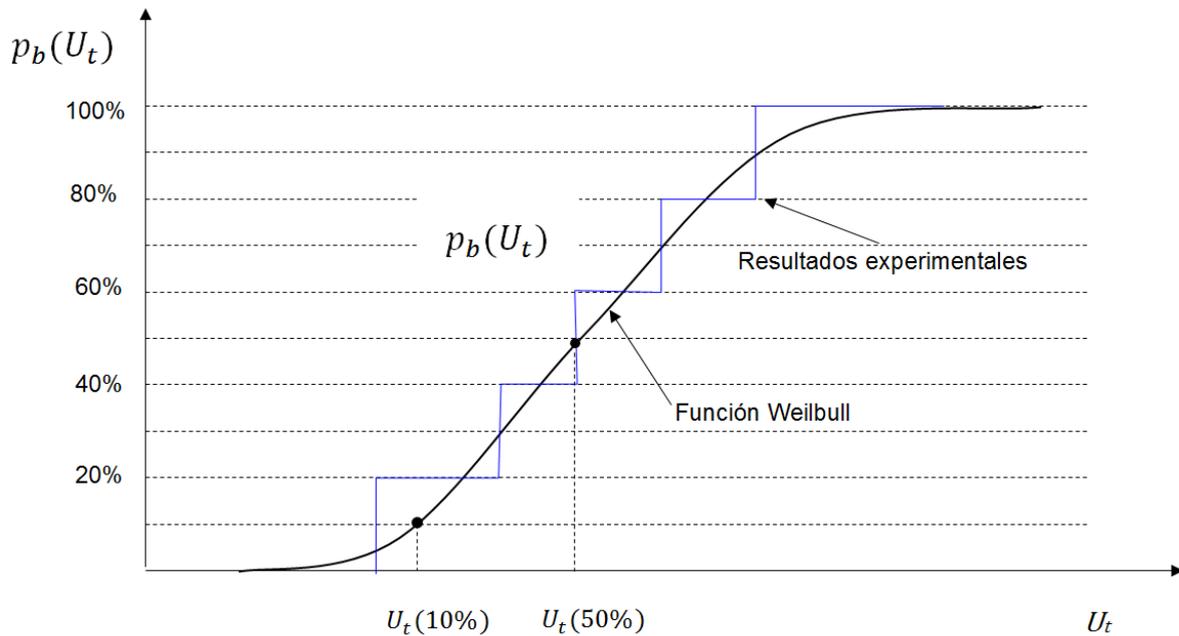


Figura 3-7 – Distribución de Weibull  $p_b(U_t)$ , ajustada a los resultados experimentales con el conjunto de ensayos de impulso pleno liso

### 3.2.1.2 Probabilidad de descarga con impulso tipo rayo oscilante; $p(U_{enij})$

$\underline{p}(U_{b_{nij}})$ :

El segundo conjunto de ensayos consiste en determinar las funciones de probabilidad de descarga,  $p(U_{enij})$  y  $p(U_{b_{nij}})$ , de los impulsos tipo rayo oscilantes asociadas a un determinado valor de amortiguamiento  $\delta_h$ , a una frecuencia de oscilación  $f_i$ , y a una amplitud relativa de sobretensión  $\beta'_j$ , aplicando, de forma análoga al caso anterior, el método de los niveles múltiples, con  $m \geq 5$  niveles de tensión y con un número de aplicaciones  $n \geq 10$ , en cada nivel de tensión, incrementando la tensión entre 1% y el 6% de la tensión extrema ( $\Delta U = (0,01 \div 0,06)U_e$ ), entre niveles sucesivos.

También se obtendrá un buen ajuste a los resultados experimentales al utilizar una distribución de Weibull, como puede verse en la Figura 3-8.

En este conjunto de ensayos con oscilaciones superpuestas en la cresta, no se aplican correcciones a las condiciones atmosféricas de referencia, a las tensiones medidas, ya que no se conoce adecuadamente la influencia de la corrección de las condiciones atmosféricas para este tipo de impulsos no normalizados.

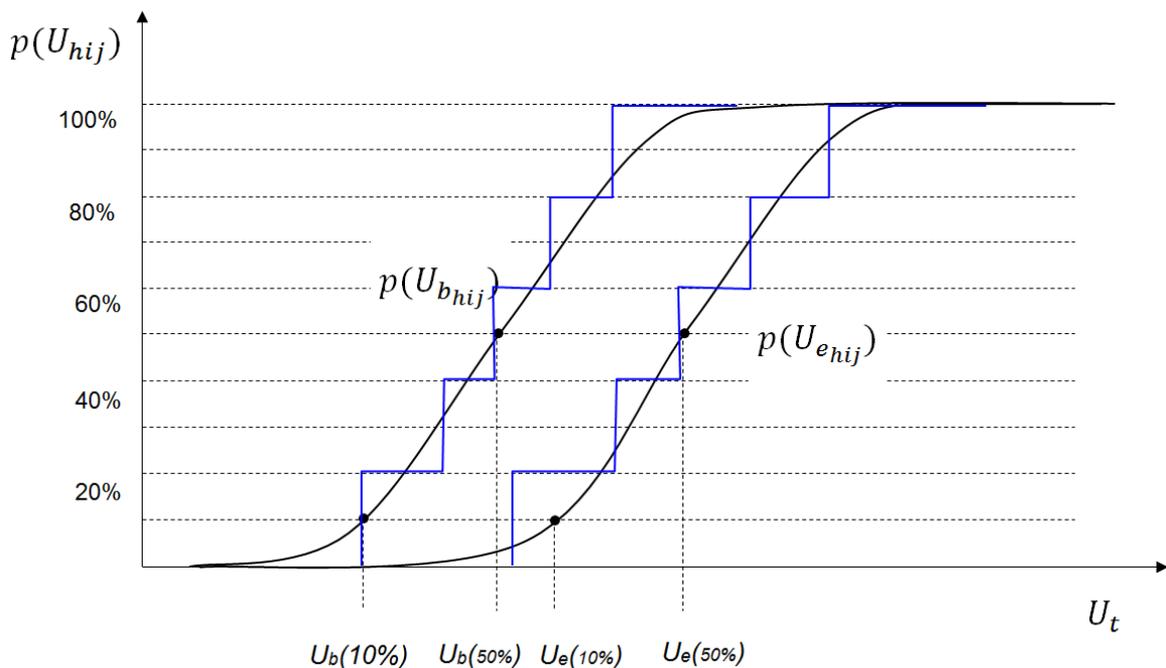


Figura 3-8 - Distribuciones de probabilidad  $p(U_{bhij})$  y  $p(U_{ehij})$  del conjunto de impulsos oscilantes

### 3.2.1.3 Probabilidad de descarga con impulso tipo rayo liso después del ensayo de impulso tipo rayo oscilante, $p_a(U_t)$ :

El tercer conjunto de ensayos y último paso del procedimiento, consiste en determinar nuevamente, la función de probabilidad de descarga  $p_a(U_t)$  para impulsos lisos, aplicando también el método de los niveles múltiples,

con  $m \geq 5$  niveles de tensión, con un número de aplicaciones  $n \geq 10$  en cada nivel de tensión, incrementando la tensión entre los sucesivos niveles, un valor comprendido entre 1% y el 6% de la tensión extrema ( $\Delta U = (0,01 \div 0,06)U_e$ ).

También en este conjunto se utiliza la distribución de Weibull para el ajuste, y su representación gráfica sería análoga a la ya representada en la Figura 3-7.

Los resultados de los dos conjuntos de ensayos realizados con los impulsos lisos *antes* y *después* del ensayo con impulso oscilante, proporcionan dos funciones de probabilidad de la descarga disruptiva ( $p_b(U_t)$  y  $p_a(U_t)$ ), muy parecidas pero no idénticas, debido a incertidumbres de medida e inestabilidades propias del medio dieléctrico en ensayo (aire).

Utilizando estas dos funciones de probabilidad se calculará una distribución de probabilidad  $p(\bar{U}_t)$ , media de ambas, que estará referida a las condiciones atmosféricas de referencia y posteriormente se corregirán a las condiciones atmosféricas locales existentes durante el ensayo con impulsos oscilantes. De esta forma los valores de tensión de los tres conjuntos de ensayos estarán referidos a las mismas condiciones atmosféricas (las locales del laboratorio durante ensayo con impulsos oscilantes) y por lo tanto pueden operarse con ellos en la expresión (3.5).

En la Figura 3-9 se representan ambas funciones de probabilidad, ajustadas con la distribución Weibull, que proporciona un buen ajuste de los valores obtenidos.

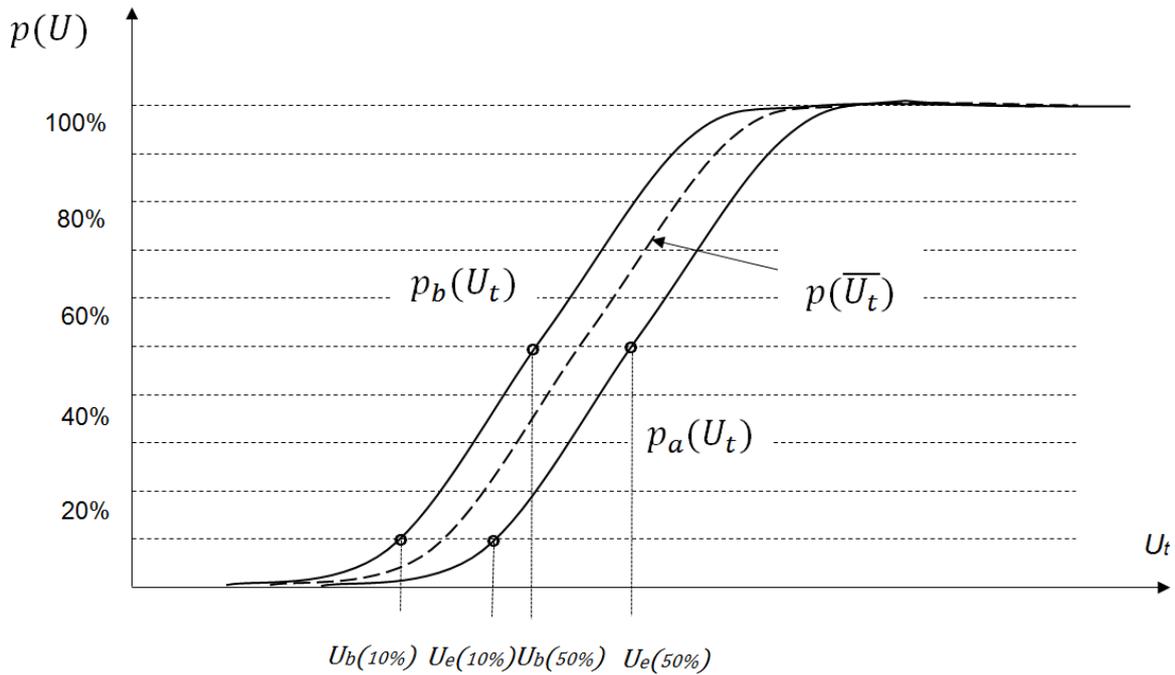


Figura 3-9 – Distribuciones de probabilidad  $p_b(U_t)$  y  $p_a(U_t)$  con correcciones por condiciones atmosféricas y su distribución de probabilidad media  $p(\bar{U}_t)$

La función de probabilidad  $p(k_{hij})$ , correspondiente al valor de la función de tensión de ensayo ( $k_{hij}$ ) se determina para diferentes niveles de probabilidad de descarga  $\ell$  %, aplicando la ecuación (3.5), que es una particularización de la expresión general (3.4), tomando los valores de las distribuciones de probabilidad de Weibull, expresadas por  $p(\bar{U}_t)$ ;  $p(U_{e_{hij}})$  y  $p(U_{b_{hij}})$ , para un determinado nivel de probabilidad,  $\ell$ .

$$k_{hij}(\ell) = \frac{\bar{U}_t(\ell) - U_{b_{hij}}(\ell)}{U_{e_{hij}}(\ell) - U_{b_{hij}}(\ell)} \quad (3.5)$$

Debe indicarse que, aunque para lograr el mejor ajuste posible, éstos se hayan realizado mediante distribuciones de Weibull, las distribuciones gaussianas son también suficientemente válidas, pues proporcionan

errores del mismo rango, tal como se ha explicado anteriormente en el capítulo 2.

El cálculo de los valores individuales de los factores de tensión de ensayo  $k_{hij}$ , sólo resulta aplicable si la descarga disruptiva aparece después del valor de cresta, como es el caso en configuraciones de campo no homogéneo, ya que en configuraciones de campo homogéneo, la descarga se produce en la cresta del impulso y no es posible conocer de forma precisa, el valor de cresta de la tensión base al carecer de datos de la curva completa y por lo tanto en la ecuación (3.4) se desconoce  $U_b$ . Por este motivo, se va a establecer un procedimiento diferente para determinar la función de la tensión de ensayo en configuraciones de campo homogéneo, tal y como se describe en el siguiente apartado.

### 3.2.2 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO, MEDIANTE EL ENSAYO DE $U$ (50%) PARA EL CASO DE CAMPOS HOMOGÉNEOS O CUASI-HOMOGÉNEOS:

Para campos homogéneos o cuasi-homogéneos, la descarga disruptiva aparece en la cresta del impulso tipo rayo y en consecuencia, no puede determinarse la curva base del impulso de tensión generados, si se utiliza el montaje de un único generador (Instalación 1G).

Para este caso, los valores experimentales de la función de la tensión de ensayo, se deben determinar por el método de “subidas y bajadas de tensión” (*Método de la Clase 2*), determinando la tensión de descarga de probabilidad 50% y utilizando únicamente impulsos oscilantes que no provoquen la descarga disruptiva en el aire. En este caso, para los campos homogéneos o cuasi-homogéneos se determinará el valor experimental  $k(50\%)$ , considerando la distribución Gaussiana, pues proporciona un mejor ajuste a los resultados obtenidos.

Para cada aplicación individual del impulso tipo rayo sin que exista descarga (“*ns*”= no sparkover-sin descarga) durante el ensayo con impulso oscilante, se aplicará la siguiente ecuación:

$$k_{ns}(50\%) = \frac{\overline{U}_t(50\%) - U_{b_{ns}}}{U_{e_{ns}} - U_{b_{ns}}} \quad (3.6)$$

Mientras que para cada aplicación del impulso en el que exista descarga (“*s*”= sparkover-descarga), la expresión de la función de tensión *k* vendría dada por la expresión:

$$k_s(50\%) = \frac{\overline{U}_t(50\%) - U_{b_s}}{U_{e_s} - U_{b_s}} \quad (3.7)$$

Donde, en las expresiones anteriores:

$\overline{U}_t(50\%)$  es el valor de la tensión del 50% de probabilidad de descarga disruptiva para un nivel de impulsos lisos y que corresponde al valor medio del nivel del 50% de probabilidad de dos impulsos lisos aplicados, uno antes y otro después, del ensayo con impulso oscilante (nótese que, como la descarga se produce en la cresta, un impulso liso y un impulso con oscilaciones adquieren la misma forma)

$U_{b_{ns}}$  es el valor de cresta de la curva base de una aplicación de tensión de impulso que no provoca la descarga disruptiva (*ns*)

$U_{e_{ns}}$  es el valor máximo de la tensión de impulso aplicada que no produce descarga disruptiva (*ns*)

$U_{b_s}$  es el valor de cresta de la curva base de una aplicación de tensión de impulso que provoca la descarga disruptiva (*s*)

$U_{e_s}$  es el valor máximo de la tensión de impulso aplicada que produce descarga disruptiva (*s*)

El valor medio  $\bar{k}(50\%)$ , calculado a partir de un ensayo con impulso tipo rayo oscilante, se puede expresar por la siguiente ecuación, donde el índice  $n_I$  es el número de impulsos aplicados que no provocan la descarga disruptiva de un total de  $(2 \times n_I)$  impulsos totales de tensión aplicados:

$$\bar{k}(50\%) = \frac{\sum_{ns=1}^{n_I} k_{ns}(50\%) + \sum_{s=1}^{n_I} k_s(50\%)}{2 \cdot n_I} = \frac{1}{2 \cdot n_I} \left[ \sum_{ns=1}^{n_I} k_{ns}(50\%) + \sum_{s=1}^{n_I} k_s(50\%) \right] \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3.6) y (3.7):

$$\bar{k}(50\%) = \frac{1}{2 \cdot n_I} \left[ \sum_{ns=1}^{n_I} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{b_{ns}}}{\beta_{ns}} + \sum_{s=1}^{n_I} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{b_s}}{\beta_s} \right] \quad (3.9)$$

donde :

$\bar{k}(50\%)$  es el valor medio del conjunto de valores individuales

$$\beta_{ns} = U_{e_{ns}} - U_{b_{ns}}$$

$$\beta_s = U_{e_s} - U_{b_s}$$

Teniendo en cuenta que

- $\beta_{ns} \approx \beta_s$  (ya que la descarga se origina principalmente debido al incremento de la curva base)
- Para cada impulso con descarga “s” existe otro impulso que no provoca descarga “ns” (luego el número total “s” = “ns”) y cuyos valores de tensión de la curva base  $U_{b_s}$  y  $U_{b_{ns}}$  están correlacionados por la expresión  $U_{b_s} = U_{b_{ns}} + \Delta U$

Entonces, la ecuación (3.9) puede expresarse de la siguiente forma:

$$\bar{k}(50\%) = \frac{1}{2 \cdot n_1} \left[ \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{bns}}{\beta_{ns}} + \sum_{s=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - (U_{bns} + \Delta U)}{\beta_{ns}} \right] \quad (3.10)$$

Luego, operando en la ecuación anterior,

$$\begin{aligned} \bar{k}(50\%) &= \frac{1}{2 \cdot n_1} \left[ \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{bns}}{\beta_{ns}} + \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{bns}}{\beta_{ns}} - \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\Delta U}{\beta_{ns}} \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot n_1} \left[ 2 \cdot \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{bns}}{\beta_{ns}} - \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\Delta U}{\beta_{ns}} \right] = \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\bar{U}_t(50\%) - U_{bns}}{\beta_{ns}} - \frac{1}{2 \cdot n_1} \sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\Delta U}{\beta_{ns}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Finalmente, considerando la ecuación (3.6) y la expresión

$$\beta_{ns} = U_{ens} - U_{bns}$$

la ecuación (3.11) anterior puede expresarse de la siguiente forma:

$$\bar{k}(50\%) = \frac{\sum_{ns=1}^{n_1} k_{ns}(50\%)}{n_1} - \frac{\sum_{ns=1}^{n_1} \frac{\Delta U}{U_{ens} - U_{bns}}}{2 n_1} \quad (3.12)$$

Aunque el segundo término (sustraendo) de la ecuación (3.12) compensa el efecto de los impulsos que provocan la descarga, que no pueden ser utilizados en cálculo del valor medio por carecer de los datos de  $U_b$ , su influencia resulta, en la práctica, despreciable, ya que para el escalón de tensión utilizado en el método de subidas y bajadas que es de

---

$\Delta U \leq 0,01U_e$  y una amplitud de la sobretensión  $\beta$  del 20%, este término tendría un valor de 0,05 p.u., que se encuentra dentro de los márgenes de incertidumbre considerados anteriormente

Entonces, se puede considerar que la ecuación (3.12) anterior se puede expresar como:

$$\bar{k}_{ns}(50\%) = \frac{\sum_{ns=1}^{n_l} k_{ns}(50\%)}{n_l} \quad (3.13)$$

### 3.2.3 EXTENSIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE PROBABILIDAD DEL NIVEL DEL 50% A LA DEL NIVEL DEL 10%

Los valores de las funciones de tensión determinadas para el nivel de probabilidad del 50%, se pueden extender a otros niveles de probabilidad, por ejemplo al nivel del 10%, que representa el nivel de tensión soportada para el aire. De esta forma los valores de la función de tensión de ensayo del 50% se calculan por la aplicación de la ecuación (3.4) a partir de los resultados experimentales, particularizados para la probabilidad del 50%.

$$k_{hij}(50\%) = \frac{U_t(50\%) - U_{bhij}(50\%)}{U_{ehij}(50\%) - U_{bhij}(50\%)} \quad (3.14)$$

Si se asume que la función de probabilidad para campos homogéneos sigue la distribución gaussiana, la tensión que corresponde a un nivel de probabilidad del 50% y la desviación típica “s” serán los parámetros representativos de dicha función. Considerando como  $s_{hij}$ ,  $s'_{hij}$  y  $s''_{hij}$  los valores de desviación típica de las funciones de probabilidad de descarga  $p(U_t)$ ;  $p(U_{ehij})$  y  $p(U_{bhij})$  respectivamente, es posible determinar  $U_t$ ,  $U_b$

---

y  $U_e$  para cualquier otro nivel de probabilidad, por ejemplo el 10% o tensión soportada.

$$U_t(10\%) = U_t(50\%) - 1,3 s \quad (3.15)$$

$$U_{b_{hij}}(10\%) = U_{b_{hij}}(50\%) - 1,3 s'_{hij} \quad (3.16)$$

$$U_{e_{hij}}(10\%) = U_{e_{hij}}(50\%) - 1,3 s''_{hij} \quad (3.17)$$

Por ejemplo para el nivel de probabilidad de descarga del 10%, sustituyendo los valores de las expresiones (3.15), (3.16) y (3.17) en la ecuación (3.14), se obtiene:

$$k_{hij}(10\%) = \frac{U_t(50\%) - U_{b_{hij}}(50\%) + 1,3 (s'_{hij} - s)}{U_{e_{hij}}(50\%) - U_{b_{hij}}(50\%) + 1,3 (s'_{hij} - s''_{hij})} \quad (3.18)$$

Que considerando las desviación típica de la tensión de la curva base  $U_b$ , ( $s'_{hij}$ ) y la desviación típica de la tensión extrema  $U_e$ , ( $s''_{hij}$ ), aproximadamente iguales y teniendo en cuenta la ecuación (3.14), resulta:

$$k_{hij}(10\%) \approx k_{hij}(50\%) + \frac{1,3(s'_{hij} - s)}{\beta_{hij}} \quad (3.19)$$

Es decir, que asumiendo que los valores experimentales de las desviaciones típicas  $s$ ,  $s'$  y  $s''$  son iguales, las funciones de la tensión de ensayo,  $k$  factor, serán idénticas, independientemente del nivel de probabilidad de descarga considerado.

---

Como en la práctica las tres desviaciones típicas no son idénticas, se pueden obtener ligeras diferencias en los diferentes niveles de probabilidad de descarga. No obstante, puede comprobarse experimentalmente que la discrepancia entre los valores de  $k_{hij}(10\%)$  y  $k_{hij}(50\%)$  es pequeña y por lo tanto se pueden extender los valores experimentales de la función de tensión de ensayo, k-factor, determinados para un nivel del 50%, a otros niveles de probabilidad.

En la Figura 3-10 puede verse la representación de la distribución de probabilidad de la función de tensión  $k_{hij}$ , ajustada para los valores obtenidos para cada diferente nivel de probabilidad de descarga  $\ell \%$ , observándose una diferencia muy pequeña.

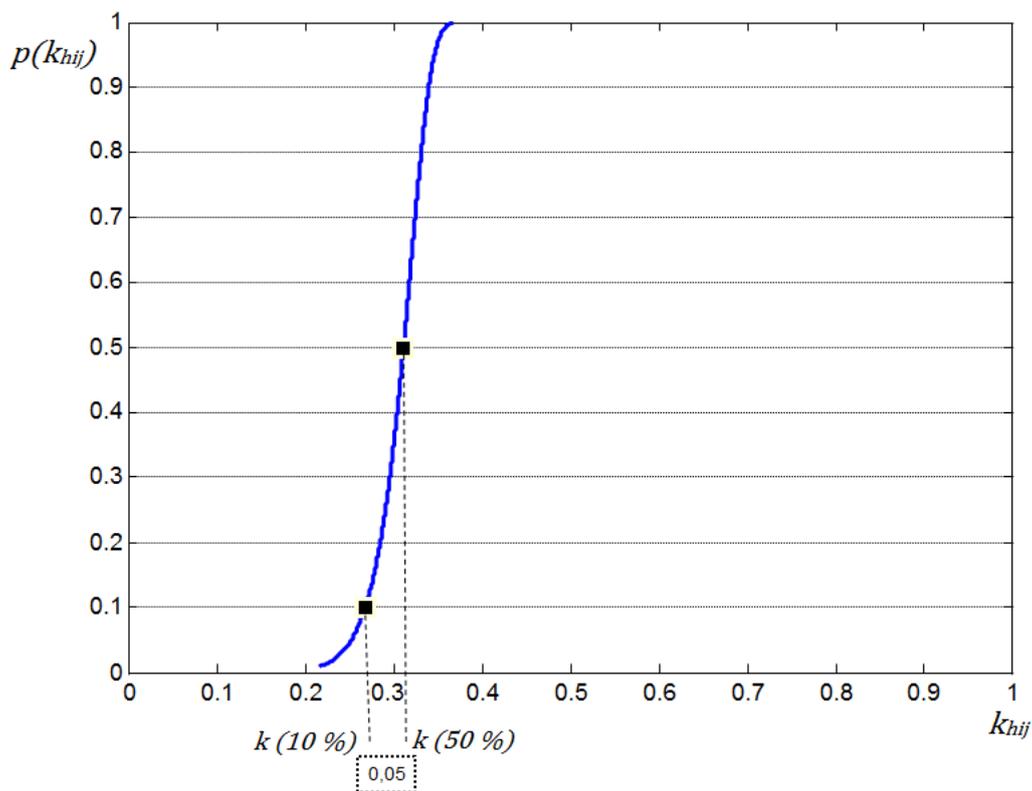


Figura 3-10 – Función de probabilidad  $p(k)$  para un valor experimental de la función de tensión de ensayo,  $k$  factor, ajustada para cada diferente nivel de probabilidad de descarga  $\ell \%$  y diferencia entre  $\ell \% = 10\%$  y  $\ell \% = 50\%$  .

En consecuencia, se evidencia que la función de probabilidad  $p(k_{hij})$  de un valor experimental de la función de tensión de ensayo,  $k_{hij}$ , es una línea prácticamente vertical independientemente del nivel de probabilidad de descarga considerado ya el valor de  $k(10\%)$  y de  $k(50\%)$  son prácticamente iguales.

### 3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES EN APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

En este apartado se incluyen los resultados experimentales obtenidos aplicando el método descrito en el apartado anterior, mostrando con las funciones de probabilidad resultantes y que se utilizarán a lo largo de toda la tesis en la determinación de las funciones de tensión de ensayo. Los valores y distribuciones representadas de forma genérica en la primera parte de este apartado, se incluyen ahora a modo de ejemplo particular de una configuración de ensayo correspondiente a un campo no homogéneo punta-plano, realizada con el montaje de dos generadores (Instalación 2G), para una distancia de aire libre de 0,5 m, con una tensión de ensayo de 260 kV, frecuencia de oscilación de 250 kHz, amplitud de sobretensión del 12% y una amortiguamiento del 10%.

También se describen los ensayos para determinar la tensión disruptiva del 50 % para el caso de un campo no homogéneo punta-plano para unas distancias de separación variables de 0,5 m a 1,60 m.

La forma del impulso pleno aplicado típica cuando no se produce descarga disruptiva, se muestra en la Figura 3-11 en la que puede verse la curva de tensión de ensayo (traza azul), la curva residual (traza roja) y la curva base (traza verde), esta última obtenida como función doble exponencial mediante ajuste de todos los valores de tensión registrados, desde que la curva de tensión de ensayo alcanza el 10% del valor  $U_e$ , hasta que vuelve a alcanzar el valor del 10 % de  $U_e$ , en la cola del impulso, aplicando la mejora del procedimiento normativo explicado en el apartado 3.1.2.2.

Análogamente, en la Figura 3-12, se muestra el impulso de tensión cortado, aplicado a la misma configuración y en la que se ha producido la descarga disruptiva. Al ser condiciones de campo no homogéneo, el corte se produce siempre, después de la cresta del impulso.

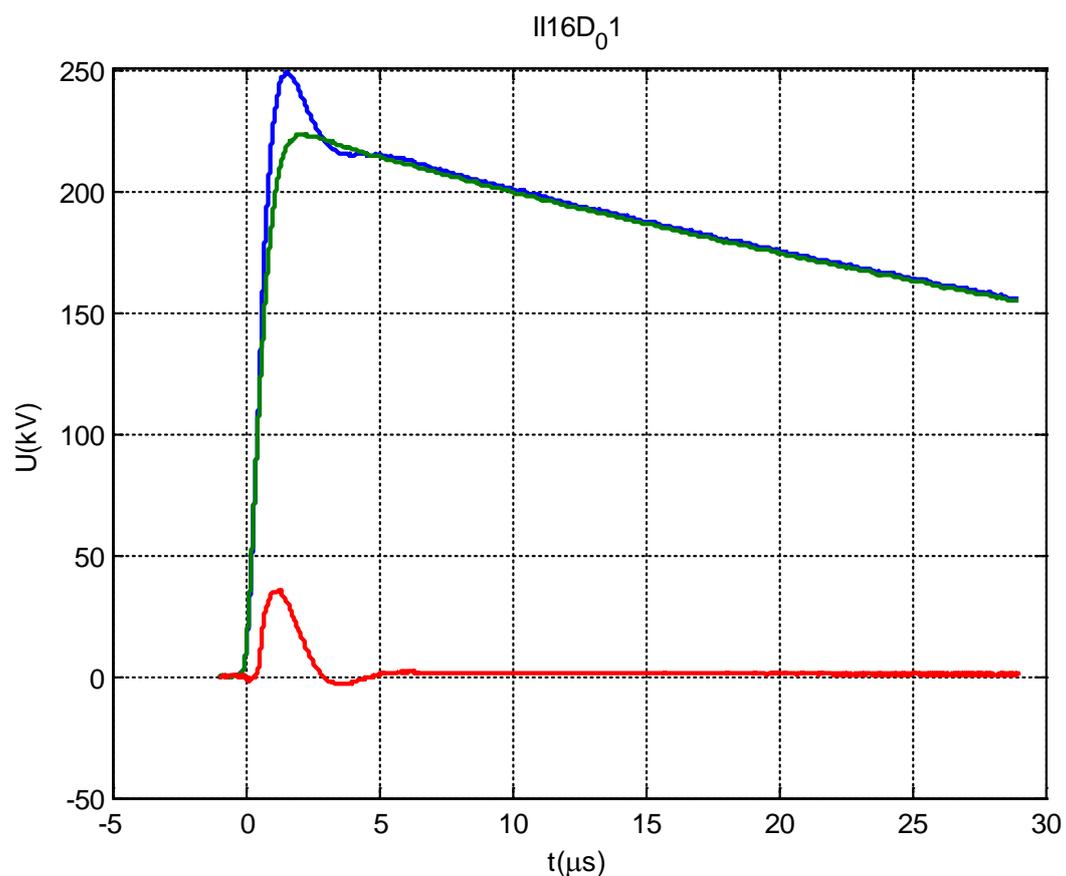


Figura 3-11 – Forma de onda del impulso oscilante aplicado a una configuración de campo no homogéneo (punta-plano) para una separación de aire de 0,5 m,  $U_e = 250$  kV, amplitud de oscilación  $\beta=10\%$  y amortiguamiento  $\delta=10\%$ .

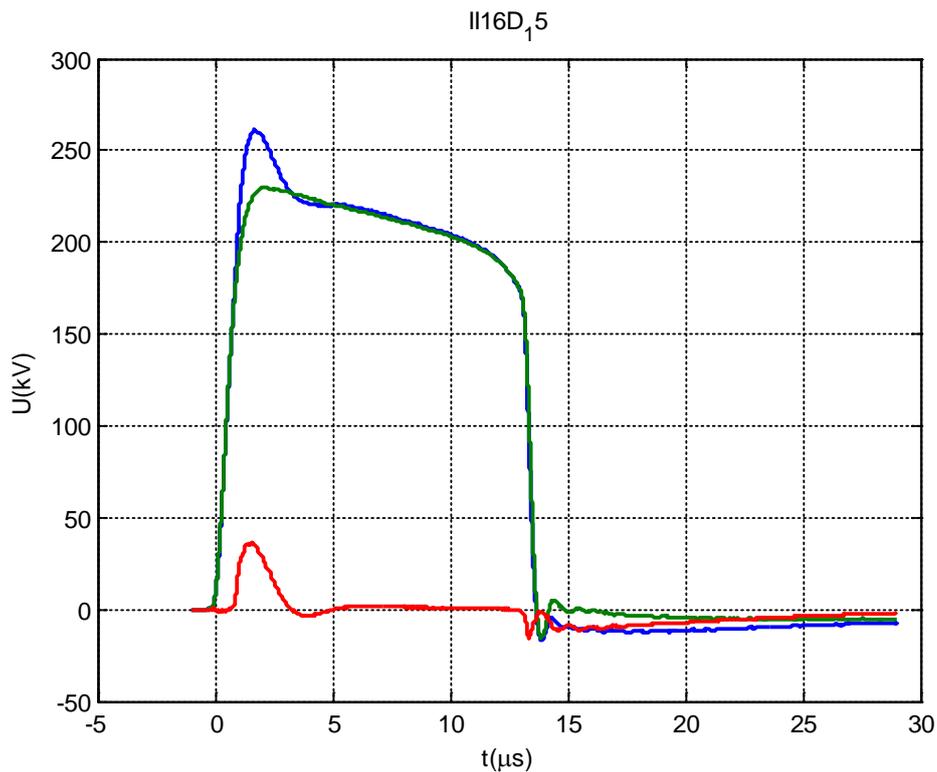


Figura 3-12 – Forma de onda del impulso oscilante aplicado a la configuración indicada en la Figura 3-11 y que provoca descarga disruptiva.

Por aplicación del método de los niveles múltiples (clase 1), se han obtenido los valores de tensión correspondientes a cada nivel de probabilidad mediante el ajuste de la curva utilizando la distribución de Weibull. En la Figura 3-13, se observa un ajuste muy bueno de las funciones de probabilidad de descarga, tanto para el conjunto de impulsos lisos aplicados antes del conjunto de impulsos oscilantes, como para el grupo de impulsos lisos aplicados después. Las funciones de probabilidad de ambos conjuntos de impulsos del impulso oscilante corresponden a los valores de tensión disruptiva obtenidos sin haber realizado las correcciones a las condiciones atmosféricas de referencia. En la Figura 3-14 se representan, las mismas funciones de probabilidad pero después de haber aplicado las correcciones atmosféricas.

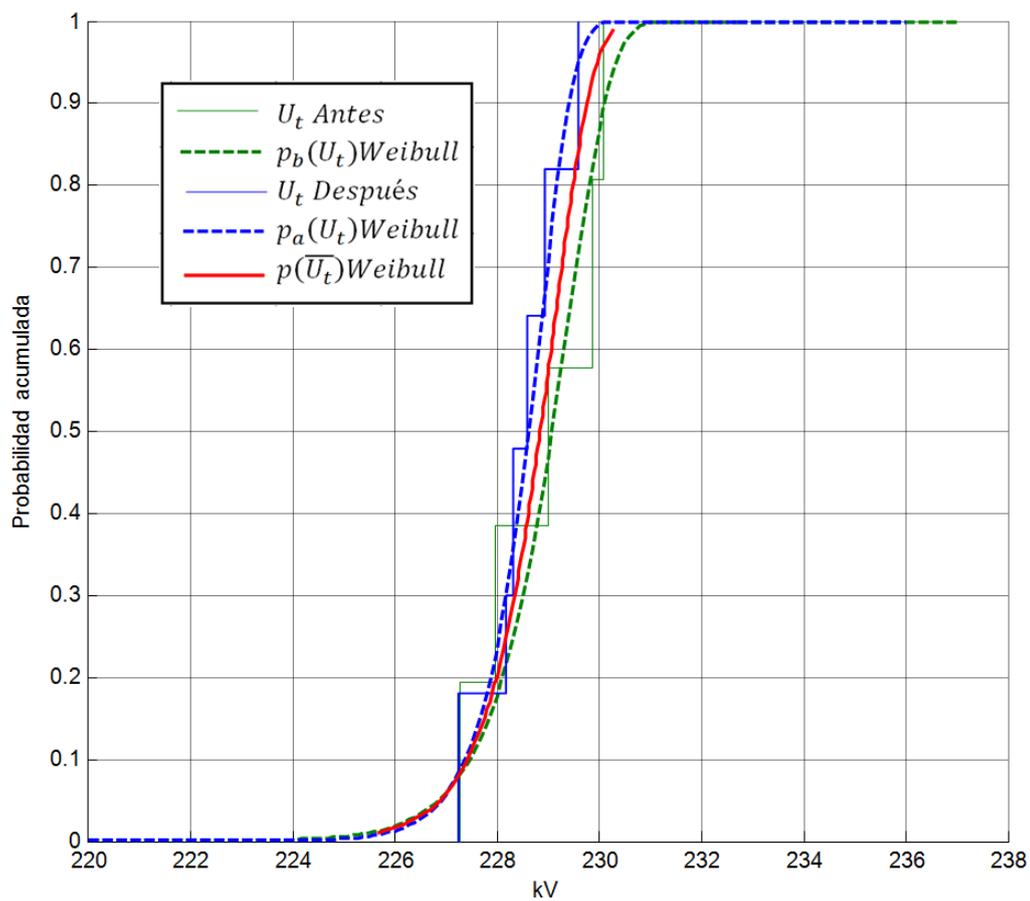


Figura 3-13 – Funciones de probabilidad de los impulsos lisos plenos aplicados antes y después de la aplicación del impulsos oscilante en las condiciones atmosféricas correspondientes a cada conjunto de ensayos.

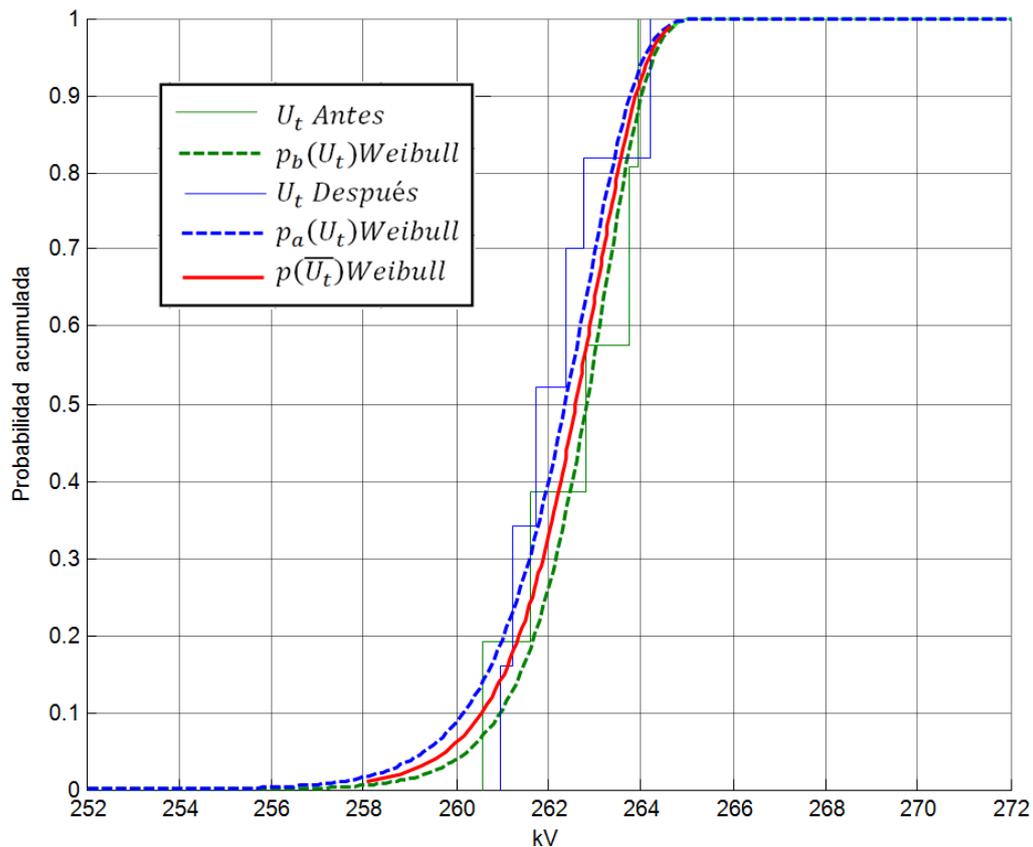


Figura 3-14 – Funciones de probabilidad mostradas en la Figura 3-13, habiendo realizado las correcciones a las condiciones atmosféricas de referencia.

Del análisis de la Figura 3-13 y Figura 3-14, se desprende que las funciones de probabilidad obtenidas con los conjuntos de ensayo anterior y posterior a los impulsos oscilantes, son prácticamente coincidentes ya que la diferencia entre ambas, aproximadamente 0,9 kV, del orden del 0,4% de  $U_t$ , está dentro de los márgenes de incertidumbre expandida admitidos para los sistemas de medida aprobados, que es del 3%.

En la Figura 3-15, se representan las funciones de probabilidad de la tensión máxima,  $U_e$ , y de la curva base,  $U_b$ , ajustadas mediante una distribución de Weibull y que se adapta muy bien a los resultados experimentales obtenidos. En esta figura, las funciones de probabilidad se han corregido a las condiciones atmosféricas presentes durante cada uno de los conjuntos de ensayos oscilantes.

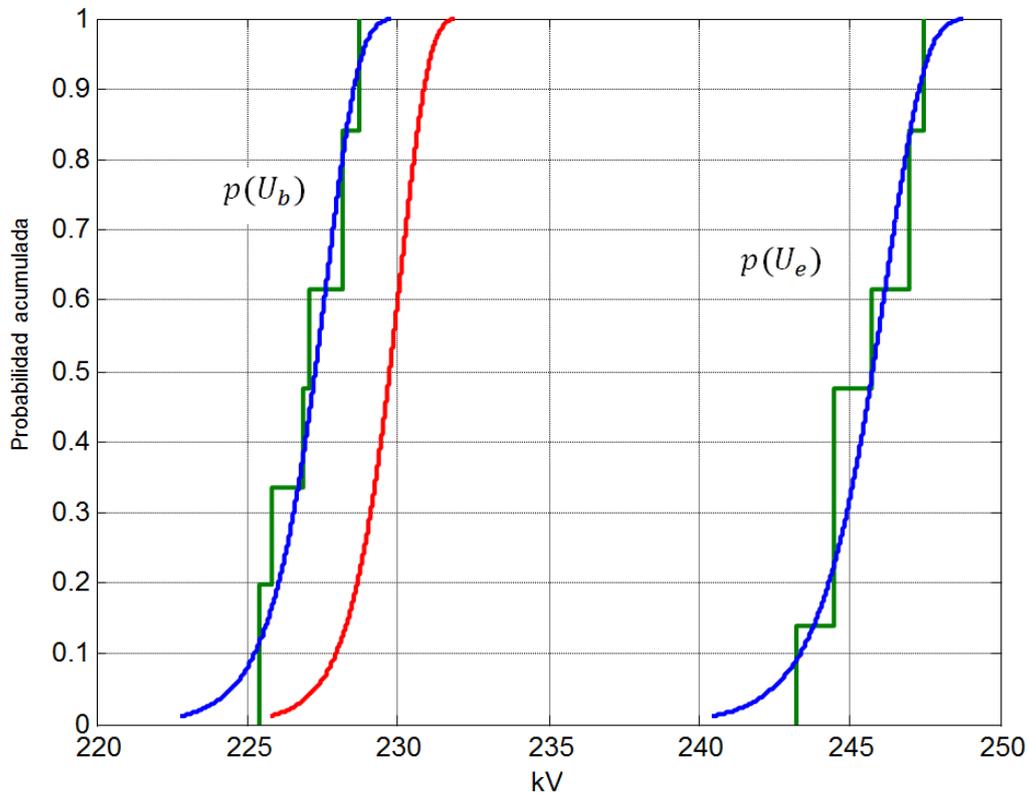


Figura 3-15 – Distribuciones de probabilidad de la tensión máxima  $U_e$  y de la tensión de la curva base  $U_b$  obtenidas por la aplicación de impulsos oscilantes junto con la distribución de probabilidad de la tensión de ensayo  $U_t$ .

En la Figura 3-16 se muestra el ajuste de la función de probabilidad para la función de tensión de ensayo  $k(f)$ , calculada con las funciones de probabilidad de la tensión de ensayo,  $U_t$ , de la tensión de la curva base,  $U_b$  y de la tensión máxima,  $U_e$ , correspondientes a impulsos oscilantes una frecuencia de oscilación de 250 kHz, una amplitud de sobretensión del 12% y un amortiguamiento del 10% y a los valores individuales de la tensión de ensayo obtenidos experimentalmente y aplicando la ecuación (3.5).

Puede observarse que la función de probabilidad de la función de la tensión de ensayo  $k$ , es muy vertical de forma que el factor de la tensión de ensayo correspondiente a la tensión soportada ( $U_{10\%}$ ) y el

---

correspondiente a la tensión de probabilidad de descarga del 50% ( $U_{50\%}$ ) son prácticamente iguales (diferencia menor que la incertidumbre considerada), confirmando las hipótesis expuestas en el apartado anterior.

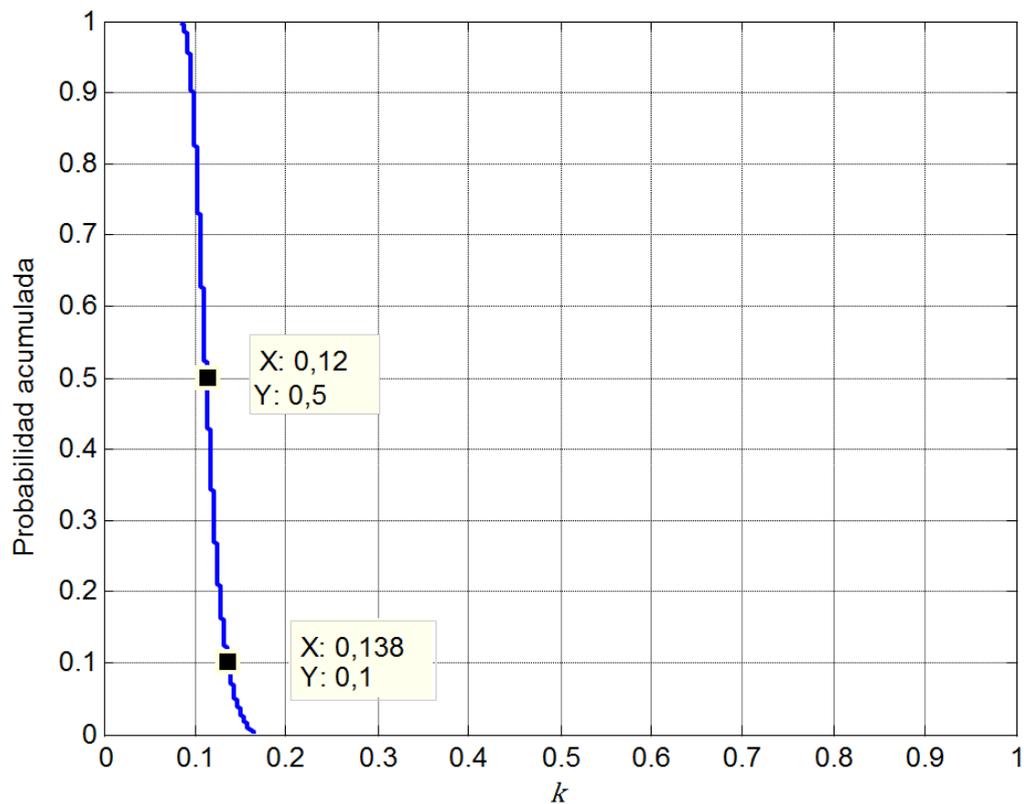


Figura 3-16 – Función de probabilidad de la función de tensión de ensayo  $k(f)$  obtenida a partir de las funciones de probabilidad  $U_t$ ,  $U_e$  y  $U_b$  por aplicación de la ecuación (3.5), para una frecuencia y amplitud de sobreoscilación de 250 kHz, y 12%, respectivamente.

### 3.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES CON UNA CONFIGURACIÓN DE ENSAYO CON CAMPO HOMOGÉNEO (ESFERA-ESFERA) Y DIFERENTES DISTANCIAS DE AIRE

Con objeto de validar el método de ensayo experimental propuesto con los valores obtenidos para la función de la tensión de ensayo, *k factor*, por aplicación de la fórmula normativa, se ha seleccionado una configuración de ensayo consistente en una distancia de aire entre electrodos comprendida entre 0,1 m y 0,40 m, para la configuración de esfera-esfera, que corresponde a una configuración de ensayo de campo homogéneo o cuasi-homogéneo.

Con esta configuración se pretende evaluar si la función de la tensión de ensayo, *k factor*, obtenida experimentalmente en esta tesis, es compatible con la ecuación de la función de la tensión de ensayo, considerada en la norma de ensayos de alta tensión IEC 60060-1 {18}.

Para estos ensayos experimentales se han aplicado impulsos de tensión tipo rayo oscilantes, con diferentes valores de amplitud relativa de sobretensión  $\beta'$  y amortiguamiento  $\delta$ .

Como disposición de ensayo más reproducible para una configuración de campo homogéneo, se toma la correspondiente a dos electrodos con forma esférica, de diámetro 1 m, separados entre sí una distancia comprendida entre 0,09 m y 0,40 m, como el que se muestra en la Figura 3-17. Con esta disposición se han realizado ensayos de tensión disruptiva con impulsos tipo rayo de tensiones de cresta comprendidas entre 250 kV y 950 kV, aproximadamente. En todos los casos los impulsos tipo rayo aplicados tenían unas oscilaciones superpuestas de frecuencia 250 kHz.

Los impulsos aplicados tienen unas amplitudes relativas de sobreoscilación  $\beta'_j$  comprendidas entre el 10% y el 35%, con un amortiguamiento  $\delta_j$  desde el 0% (sin amortiguamiento, sobretensión), hasta el 30 %.

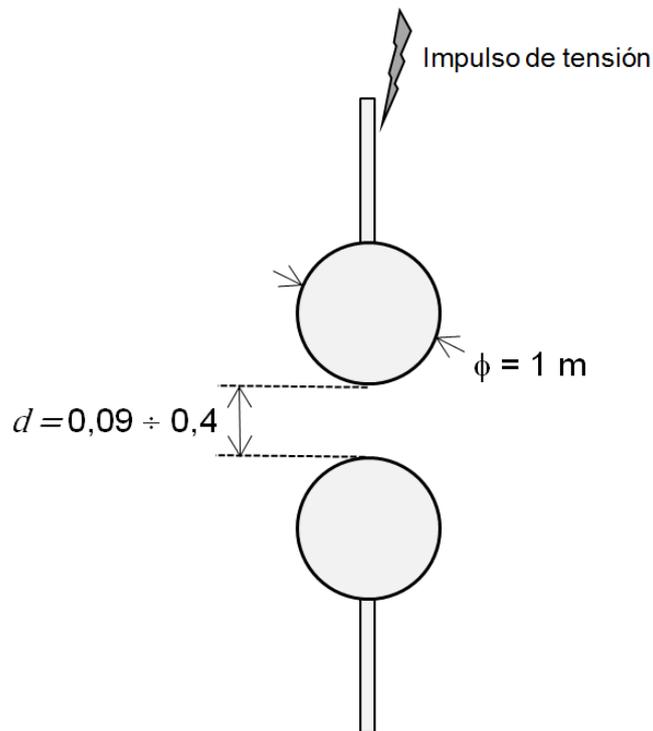


Figura 3-17 – Configuración de ensayo de campo homogéneo formado por dos electrodos esféricos de 1 m de diámetro

No obstante, al ser campo homogéneo y aparecer la descarga disruptiva en la cresta del impulso, los diferentes valores del amortiguamiento considerados en los ensayos experimentales, no afectarían a los resultados.

En la Tabla 3-1 se muestran los valores de la función de la tensión de ensayo, k-factor, determinados de forma experimental para las configuraciones de campo eléctrico homogéneo esfera-esfera con diferentes distancias libres de aire entre electrodos, tal como se ha descrito anteriormente.

Los valores de la función de la tensión de ensayo se dan con su incertidumbre, correspondiente a una desviación típica ( $s$ ) de los valores medidos.

<i>Distancia de aire (m)</i>	0,10	0,097	0,20	0,40
$U_t(50\%) (kV)$ $\pm s (\%)$	266 $\pm 0,9$	258 $\pm 0,7$	509 $\pm 0,8$	897 $\pm 0,9$
$U_e(50\%) (kV)$ $\pm s (\%)$	267 $\pm 0,6$	267 $\pm 0,5\%$	517 $\pm 0,6$	901 $\pm 0,6$
$U_b(50\%) (kV)$ $\pm s (\%)$	240 $\pm 0,3$	174 $\pm 0,7$	334 $\pm 0,8$	844 $\pm 0,4$
$\beta'_j (\%)$	10	35	35	6,3
$\delta'_j (\%)$	0	25	25	30
$\bar{k}_{ns}(50\%)$ $\pm s$	<sup>(2G)</sup> 0,96 $\pm 0,03$	<sup>(1G)</sup> 0,90 $\pm 0,02$	<sup>(1G)</sup> 0,96 $\pm 0,02$	<sup>(2G)</sup> 0,93 $\pm 0,03$
$\bar{k}(50\%)$ $\pm s$	<sup>(2G)</sup> 0,95 $\pm 0,03$	<sup>(1G)</sup> 0,90 $\pm 0,02$	<sup>(1G)</sup> 0,95 $\pm 0,02$	<sup>(2G)</sup> 0,93 $\pm 0,03$
<i>Valor medio de k (50%)</i>	0,93 $\pm 0,03$			
(1G) – Montaje un generador oscilante: P=938 $\pm$ 3 mbar (HPa); T=27 $\pm$ 1,5 °C; h <sub>r</sub> =35 $\pm$ 5 % (2G) – Montaje dos generadores sincronizados: P=937 $\pm$ 10 mbar (HPa); T=22 $\pm$ 3 °C; h <sub>r</sub> =38 $\pm$ 8 %				

Tabla 3-1 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para la configuración de distancias de aire con campo homogéneo esfera-esfera

Con objeto de poder analizar también la influencia del montaje o disposición de ensayo, para estos ensayos experimentales en una configuración de campo homogéneo, se han determinado dos de los valores de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, utilizando la configuración de ensayo de un único generador oscilante (Instalación 1G) y otros dos valores de la función de la tensión de ensayo, *k factor*,

utilizando la configuración de dos generadores sincronizados (Instalación 2G).

Considerando el intervalo de recubrimiento correspondiente a dos desviaciones típicas  $s$ , los resultados obtenidos con ambos generadores resultan compatibles.

En ambos casos, se ha utilizado para el tratamiento de los resultados, el método de subidas y bajadas de tensión (Clase 2), por ser el método aplicable en el caso de una configuración de ensayo de campo homogéneo o quasi-homogéneo.

En la Figura 3-18, se muestran unos ejemplos de las formas de onda de los impulsos aplicados en el caso de la configuración de campo homogéneos y para una distancia de aire de 0,20 m.

El valor medio de los diferentes resultados experimentales del valor de la función de tensión de ensayo  $k$ -factor, resulta ser  $k = 0,93$ , lo que viene a demostrar una compatibilidad razonable (diferencia: 0,05) con el valor del  $k$ -factor obtenido con la fórmula de la función de tensión de ensayo,  $k$  factor, indicada en la norma de ensayos de alta tensión, para una frecuencia de la oscilación de 250 kHz (0,25 MHz) (véase la expresión (3.20)).

$$k(f = 250 \text{ MHz}) = \frac{1}{1 + 2,2 \cdot 0,250^2} = 0,88 \quad (3.20)$$

La diferencia existente (0,05) implica un error de alrededor del 5,6 % de la función de tensión de ensayo,  $k$  factor, que resultara un error máximo del 0,56 % en la magnitud de la tensión de ensayo en el caso más desfavorable de una amplitud relativa de sobreoscilación  $\beta' = 10\%$ .

Nótese que los valores de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, normativa representan los valores promedios aplicables a un conjunto de dieléctricos (aire, aceite, SF6 y papel-aceite) lo que explica perfectamente las diferencias obtenidas entre los valores de la norma y los valores particularizados para el aire.

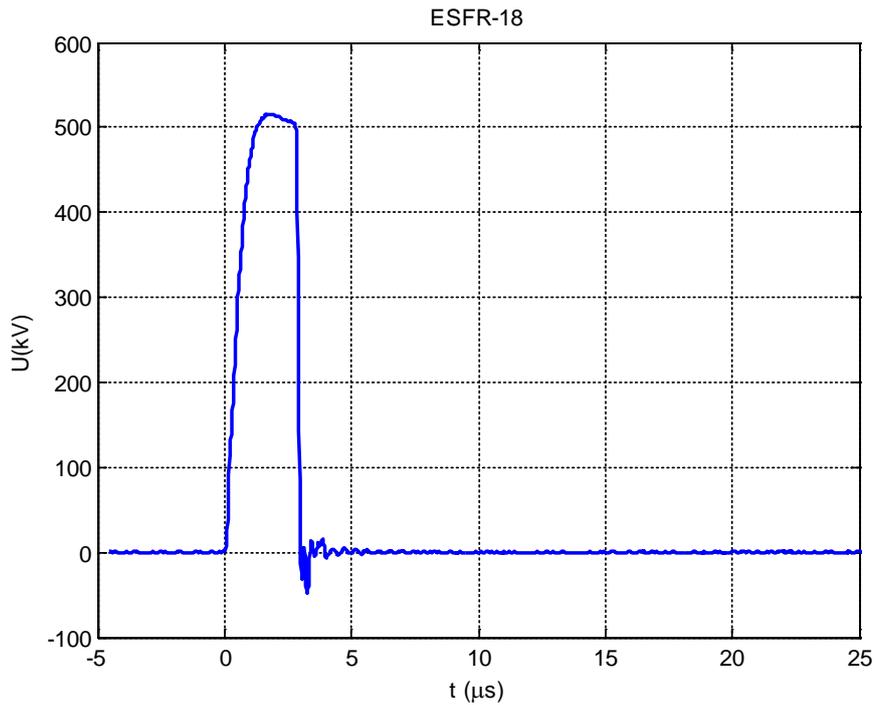


Figura 3-18 a) – Forma de onda correspondiente al ensayo con impulso liso cortado en la cola, para la configuración de campo homogéneo para una distancia de aire de 20 cm entre esferas de 1 m de diámetro

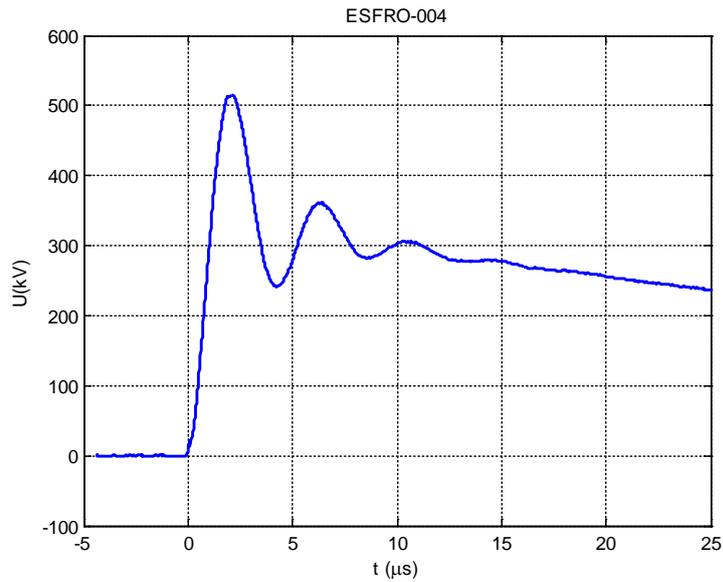


Figura 3-18 b) – Forma de onda correspondiente al ensayo con impulso oscilante pleno, para la configuración de campo homogéneo para una distancia de aire de 20 cm entre esferas de 1 m de diámetro

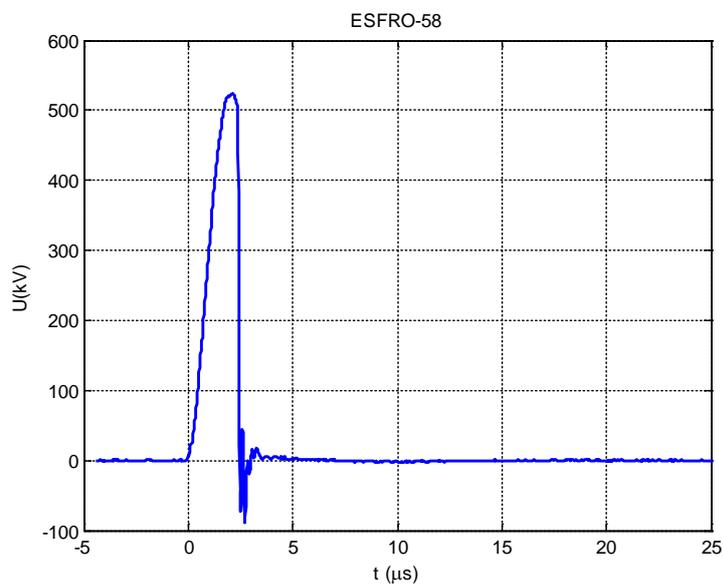


Figura 3-18 c) – Forma de onda correspondiente al ensayo con impulso oscilante cortado en la cresta, para la configuración de campo homogéneo para una distancia de aire de 20 cm entre esferas de 1 m de diámetro.

### 3.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA UNA CONFIGURACIÓN DE ENSAYO DE CAMPO NO HOMOGÉNEO (PUNTA-PLANO) Y DIFERENTES DISTANCIAS DE AIRE

Análogamente a los experimentos realizados con la configuración de ensayo de campo homogéneo, se han realizado una serie de determinaciones de la función de tensión de ensayo, *k factor* con aislamiento autorregenerable formado por un espacio de aire entre dos electrodos formados por una punta y un plano, que se considera condiciones de campo no homogéneo.

Variando la distancia de separación entre los electrodos (punta-plano) desde 0,50 m hasta 1,6 m, se han podido realizar ensayo de tensión disruptiva con impulsos tipo rayo con tensiones de cresta comprendidas entre 265 kV y 800 kV, aproximadamente. En todos los casos los impulsos tipo rayo aplicados tenían unas oscilaciones superpuestas de frecuencia 250 kHz.

Los valores obtenidos se corresponden con impulsos que tienen unas amplitudes relativas de sobreoscilación  $\beta'_j$  entre 5% - 10% y 35% y un amortiguamiento  $\delta'_j$ , comprendido entre el 5% hasta 25 %. En este caso de campos no homogéneos, la descarga disruptiva se produce con posterioridad a la cresta del impulso, por lo que el amortiguamiento  $\delta$ , debe tenerse en cuenta, a diferencia de lo que se ha considerado para los campos homogéneos.

Para la determinación de los valores experimentales se ha utilizado el método de los niveles múltiples (clase 1) ya que la descarga disruptiva se produce después del valor de cresta del impulso y puede calcularse el valor de cresta  $U_b$ , de la curva base.

En la Tabla 3-2 se muestran los valores de la función de la tensión de ensayo k-factor, determinados de forma experimental para una configuración eléctrica de campo no homogéneo (punta-plano), descrita anteriormente.

---

Los valores de la función de tensión se dan con su incertidumbre, correspondiente a una desviación típica de los valores medidos.

<i>Distancia de aire d (m)</i>	0,50	0,60	0,86	0,96	1,60
<i>U<sub>t</sub>(50%) (kV) ± s (%)</i>	261 ± 1,0	321 ± 0,9	438 ± 0,9	480 ± 0,9	791 ± 0,7
<i>U<sub>e</sub>(50%) (kV) ± s (%)</i>	294 ± 2,0	424 ± 1,3	608 ± 1,2	525 ± 2,5	829 ± 1,5
<i>U<sub>b</sub>(50%) (kV) ± s (%)</i>	260 ± 1,0	286 ± 2,0	407 ± 1,7	474 ± 0,6	788 ± 0,7
<i>β<sub>j</sub> (%)</i>	10	35	33	10	5
<i>δ<sub>j</sub> (%)</i>	15	25	25	10	5
<i>k(50%) ± s</i>	(2G) 0,15 ± 0,05	(1G) 0,25 ± 0,05	(1G) 0,15 ± 0,04	(2G) 0,12 ± 0,04	(2G) 0,07 ± 0,04
<i>Valor medio de k (50%)</i>	0,17 ± 0,07				0,07 ± 0,04
(1G) – Montaje un generador oscilante: P=938 ± 3 mbar (HPa); T=27±1,5 °C; h <sub>r</sub> =35±5 % (2G) – Montaje dos generadores sincronizados: P=937±10 mbar (HPa); T=22±3 °C; h <sub>r</sub> =38±8 %					

Tabla 3-2 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para la configuración de campo no homogéneo (punta-plano) y diferentes distancias de aire que implican diferentes valores de la tensión de ensayo

A la vista de los resultados experimentales de la Tabla 3-2, puede deducirse que existe también una compatibilidad aceptable entre los resultados obtenidos por los dos montajes de generador de impulsos descritos anteriormente (Instalación 1G e Instalación 2G). No obstante en el capítulo 4, se analizará con mayor profundidad la influencia del montaje de ensayo de 1 o 2 generadores.

También puede deducirse a priori, que los valores de la función de tensión de ensayo, *k-factor*, para la frecuencia de oscilación considerada de ensayo, no varían prácticamente ni con la amplitud relativa de la sobretensión  $\beta'$ , ni con el amortiguamiento  $\delta$ , y que por el contrario, el parámetro más influyente es la distancia de aire entre los electrodos (punta y plano). Para distancias inferiores a 1 m (las comprendidas entre 0,5 m y 0,96 m), los valores experimentales obtenidos para la función de la tensión de ensayo *k-factor*, se pueden promediar a un solo valor  $k = 0,17 \pm 0,07$ .

Si se compara este valor experimental de la función de la tensión de ensayo, *k factor* obtenida, con el valor resultante de aplicar la fórmula normativa de la función de tensión de ensayo para la frecuencia de oscilación de 250 kHz que se indica en la expresión (3.20) y que proporciona un resultado de  $k = 0,88$ , se observa que es muy diferente, lo que implica que para campos no homogéneos de aire, la sobretensión relativa considerada por la norma IEC 60060-1 {18} cuando existen oscilaciones de frecuencia de 250 kHz superpuestas en la cresta de los impulsos sería el 0,88 p.u. de la sobretensión aplicada, es decir un 0,71 superior a la que debería considerarse en la realidad (0,17 p.u.), por lo que la tensión de ensayo para dicho aislamiento de aire en presencia de campo no homogéneo, sería superior a la que realmente debería soportar.

Esta clara discrepancia entre el valor determinado por el método normativo de ensayos de alta tensión {18} y el obtenido experimentalmente, evidencian que el mecanismo de la descarga disruptiva depende mucho de la distancia de aire, en el caso de existencia de campos no homogéneos.

En el capítulo siguiente se mostrarán los resultados experimentales de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, en el caso de campos no homogéneos con diferentes parámetros de influencia, incluida la frecuencia de oscilación, y que son los valores que deberían ser considerados en una próxima revisión de la norma IEC 60060-1 {18}.



## CAPÍTULO 4

### DISCUSIÓN – FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA GRANDES DISTANCIAS DE AIRE CON CAMPOS NO HOMOGÉNEOS

---

#### **4 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA GRANDES DISTANCIAS DE AIRE CON CAMPOS NO HOMOGÉNEOS**

En el capítulo anterior se analizaron los resultados experimentales de los valores de la función de la tensión de ensayo, *k factor*, obtenidos para una configuración de ensayo punta-plano ( $K = 1$ ), correspondientes a impulsos oscilantes de frecuencia,  $f$ , de 250 kHz. El análisis de dichos resultados permitió concluir que la función de la tensión de ensayo establecida en la actual norma IEC 60060-1 {18}, no es adecuada para configuraciones de ensayo en las que el campo eléctrico sea no homogéneo con un factor de separación  $K = 1$  y con distancias libres de aire comprendidas entre 0,5 m a 1,6 m.

Tras el referido análisis, en este capítulo se analizan nuevos resultados de valores de la función de tensión de ensayo para distintas configuraciones con diferentes grados de no homogeneidad

( $K= 0,9$  a  $1,42$ ), para distancias en aire de hasta  $3,0$  m, cuando la amplitud relativa de la sobretensión,  $\beta'$  y el amortiguamiento de la sobretensión,  $\delta$ , alcanzan hasta el 30% y el 35% respectivamente. Los impulsos oscilantes se generaron con dos instalaciones de ensayo: instalación con un sólo generador e instalación con dos generadores, por lo que también se analizó la influencia de utilizar una u otra instalación de generación. Los nuevos resultados obtenidos permiten proponer la generalización de la función de tensión de ensayo para configuraciones de aislamiento en aire con campo no homogéneo, en función de las tres variables de mayor influencia: frecuencia de la oscilación superpuesta,  $f$ , distancia libre en aire,  $d$ , y grado de no homogeneidad del campo eléctrico, dado por el factor de separación,  $K$ . La definición de la función de la tensión de ensayo mejora sustancialmente la establecida en la actual norma IEC 60060-1, en la que sólo se tiene en cuenta la frecuencia de oscilación de la sobretensión como factor de influencia.

Para los ensayos únicamente se aplicaron impulsos de polaridad positiva, debido a que son los más desfavorables para el aislamiento de aire, al corresponder con la polaridad de menor nivel de tensión soportada.

#### **4.1 CONFIGURACIONES DE ENSAYO DE CAMPO NO HOMOGÉNEO CON DISTANCIAS LIBRES EN AIRE COMPRENDIDAS ENTRE 0,15 m Y 3,0 m**

En los ensayos realizados para determinar los nuevos valores de la función de tensión de ensayo para campo no homogéneo con distancias libres en aire comprendidas entre  $0,15$  m y  $3,0$  m, se han utilizado configuraciones eléctricas que presentan diferentes factores de separación comprendidos entre  $0,9 \div 1$  (punta-plano) y  $1,42$  (conductor-estructura). También han sido considerados los resultados y los valores de la función de la tensión de ensayo correspondientes a la investigación del proyecto europeo {2}, utilizados para establecer la curva de la función de la tensión de ensayo  $k(f)$ , referida en las normas IEC 60060-1 {18} e IEEE Std 4 {24}. Las distancias libres en aire, junto con los factores de separación aplicados han permitido alcanzar tensiones de ensayo de hasta  $1,8$  MV, lo que permite proponer una nueva función de la tensión de ensayo aplicable a distancias libres en aire de material de hasta  $420$  kV,

---

incrementando sustancialmente el nivel de la tensión de ensayo del orden de los 100 kV, en los que se apoya la actual función de la tensión de ensayo referida en las normas anteriores.

Los ensayos correspondientes a las configuraciones 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4 se realizaron con una instalación de ensayo compuesta por dos generadores (instalación 2G descrita en el capítulo 3): un generador para conformar impulsos lisos plenos y otro para las ondas sinusoidales oscilantes a superponer en la cresta del impulso de salida del primer generador. Asimismo, se realizaron algunos ensayos complementarios con la configuración punta-plano descrita en el apartado 4.1.1, utilizando la instalación de generación con un sólo generador Marx modificado, a fin de analizar la influencia en los resultados de una u otra instalación de generación.

#### 4.1.1 CONFIGURACIÓN PUNTA-PLANO ( $K \sim 0,9 \div 1$ )

La configuración utilizada en el laboratorio para realizar ensayos de campo eléctrico no homogéneo punta-plano, consistió en una barra con punta en forma cónica (véase la Figura 4-1). El campo eléctrico en la punta cónica es mayor al obtenido con una punta con terminación redondeada utilizado para un factor de separación  $K = 1$  y, consecuentemente, el factor de separación,  $K$ , obtenido para esta disposición es ligeramente inferior a 1. En la práctica se obtuvieron valores del factor de separación comprendidos entre 0,9 y 1, como se analiza en el apartado 4.2.

El electrodo superior corresponde al formado por una barra conductora de 18 mm de diámetro, terminada en una punta cónica o afilada. El electrodo inferior consistió en un plano metálico circular de 4,5 m de diámetro terminado en un toroide de 0,3 m de diámetro, que trata de simular un electrodo plano de superficie infinita. La posición del plano circular es perpendicular al eje longitudinal de la barra cónica, como se muestra en la Figura 4-1. La longitud de la barra sobre la que se conforma el cono fue de 86 mm, de forma que en la punta de la barra el efecto de ionización se acentúa, aumentando la probabilidad del inicio de la descarga disruptiva

---

con menor nivel de tensión que el necesario para una configuración normalizada punta-plano ( $K=1$ ).

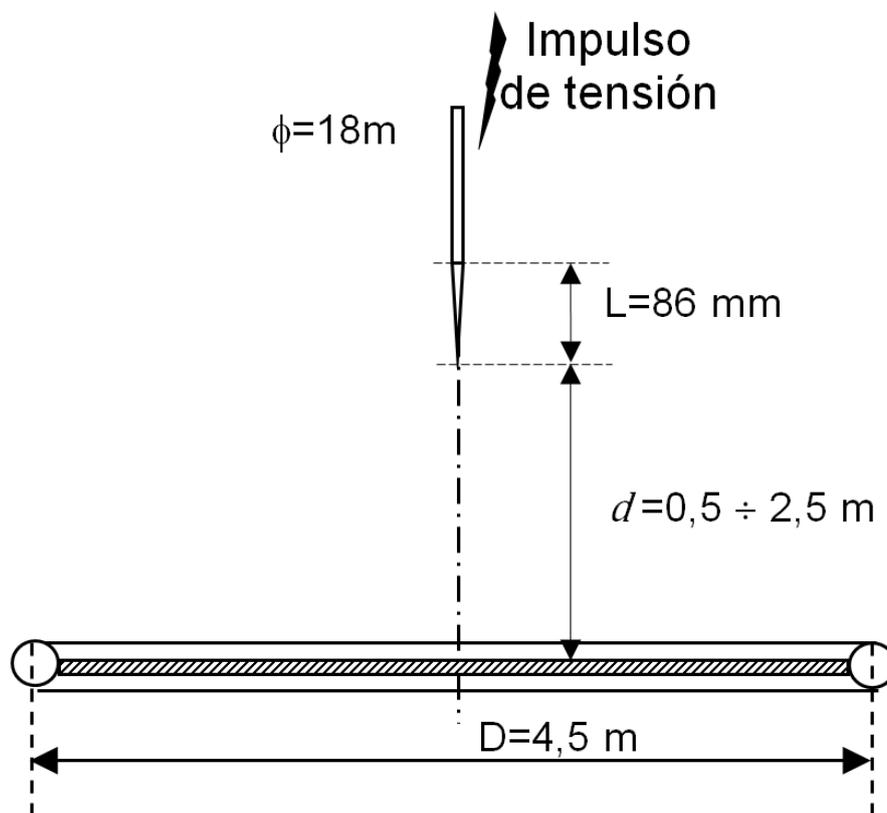


Figura 4-1 – Configuración de ensayo formada por una barra terminada en punta cónica y un plano ( $K\sim 0,9 \div 1$ ) y con distancias libres en aire de 0,5 m; 0,91 m; 1,92 m y 2,5 m.

Con objeto de poder realizar ensayos con diferentes tensiones de descarga dentro de un rango de tensiones representativas de las redes de transporte y distribución eléctrica, la distancia  $d$  entre los electrodos, se varió desde 0,5 m hasta 2,5 m. En concreto para esta configuración, se determinaron valores experimentales de la función de la tensión de ensayo para distancias libres de 0,5 m, 0,91 m, 1,92 m y 2,5 m con unas tensiones tipo rayo 1,2/50 de probabilidad de descarga disruptiva del 50%, comprendidas entre 261 kV y 1320 kV.

Con el fin de determinar el factor de separación  $K$  correspondiente a esta configuración punta cónica-plano se aplicaron impulsos tipo maniobra 250/2500, de polaridad positiva, para una distancia libre en aire de 1,5 m, valor medio de las distancias extremas ensayadas para esta configuración (0,5 m – 2,5 m), obteniéndose una tensión del 50% de probabilidad de descarga disruptiva de 618 kV. Teniendo en cuenta que para una configuración punta-plano ( $K=1$ ) a una distancia de separación de 1,5 m, la tensión del 50% de probabilidad de descarga para impulsos tipo maniobra normalizados (250/2500  $\mu$ s) de polaridad positiva fue de 632 kV, el factor de separación,  $K$ , resulta  $K = 618/632 = 0,98$ . Este valor de factor de separación,  $K = 0,98$ , resulta compatible con los valores obtenidos de  $U_{50}/d$  para impulsos tipo rayo 1,2/50 con polaridad positiva, para las distancias libres de 0,55 m, 1,92 m y 2,5 m, ya que en todos los casos el ratio  $U_{50}/d$  fue 527 kV/m  $\pm$  1 kV/m (véase Tabla 4-5 del apartado 4.3), valor ligeramente inferior al campo eléctrico medio de 530 kV/m, correspondiente a la configuración punta-plano ( $K = 1$ ), que cabía esperar.

El ensayo para una separación de 0,91 m, se realizó en condiciones de laboratorio diferentes a las existentes para otras distancias, especialmente en cuanto a distancias a paredes o estructuras próximas. Por tal motivo, el ratio  $U_{50}/d$  se redujo a 505 kV/m, lo que implica que el factor de separación  $K$ , debe ser bastante inferior a 1. En el apartado 4.2 se determina su valor que resulta ser  $K = 0,91$ .

#### 4.1.2 CONFIGURACIÓN PUNTA-ESFERA ( $K \sim 1$ )

Esta configuración de ensayo corresponde a una configuración de campo no homogéneo punta-esfera (véase Figura 4-2), en la que el electrodo superior es una punta formada por una barra conductora delgada, de sección circular de 20 mm de diámetro, terminada en una varilla de diámetro 4 mm y 40 mm de longitud y el electrodo inferior, es una esfera de 150 mm de diámetro. La distancia de separación entre electrodos es 0,150 m. Esta configuración provoca un campo eléctrico similar al creado por una configuración punta-plano, por lo que el factor de separación se considera que es  $K \sim 1$ .

---

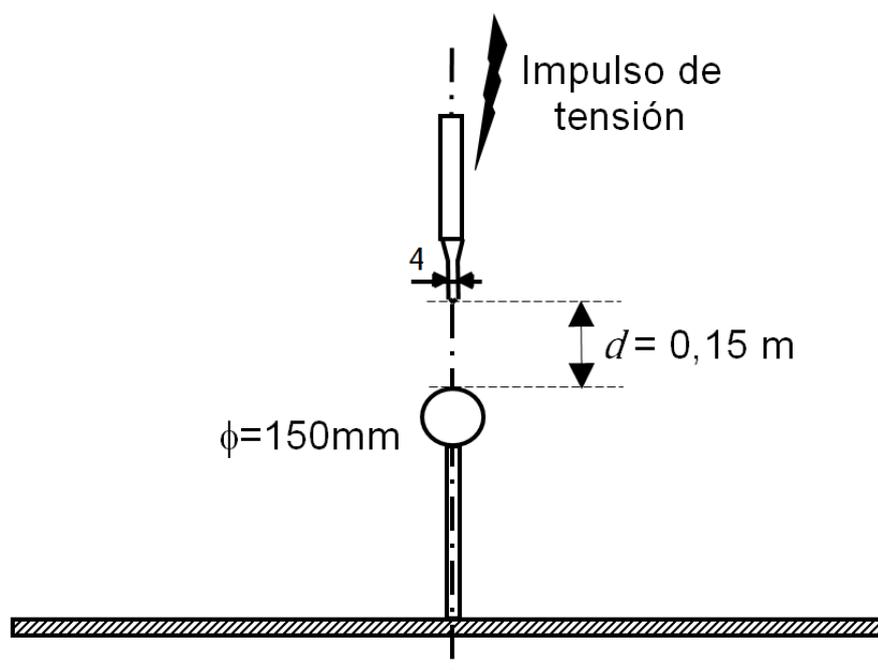


Figura 4-2 – Configuración de ensayo formada por una varilla y una esfera ( $K \sim 1$ ), con una separación de 0,15 m

El objetivo de este ensayo fue analizar la función de tensión de ensayo para pequeñas distancias de aire de 0,15 m, que corresponden con una tensión tipo rayo 1,2/50 del 50 % de probabilidad de descarga disruptiva de 128 kV. Para distancias libres en aire,  $d$  inferiores a 0,5 m, el campo eléctrico disruptivo medio de nivel de probabilidad 50%, es superior al requerido para mayores distancias e indicado en 4.1.1, de 530 kV/m. En efecto, con esta distancia de 0,15 m, el ratio  $U_{50}/d = 853$  kV/m.

En la Fotografía 4-1 se muestra la configuración real ensayada en las instalaciones del Departamento de Alta Tensión del Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE) en su sede de Getafe, donde se realizaron estos ensayos. Los ensayos correspondientes a esta configuración se realizaron con una instalación de ensayo compuesta por dos generadores (instalación 2G, descrita en el capítulo 3): un generador de impulsos lisos plenos (1) y un generador de ondas oscilantes (2). La tensión de salida del generador de impulsos plenos se aplica a electrodo superior (3) de la configuración en ensayo mientras que la onda oscilante se aplica al electrodo inferior.



Fotografía 4-1 – Montaje de ensayo experimental para la configuración punta-esfera, correspondiente a la Instalación 2G.

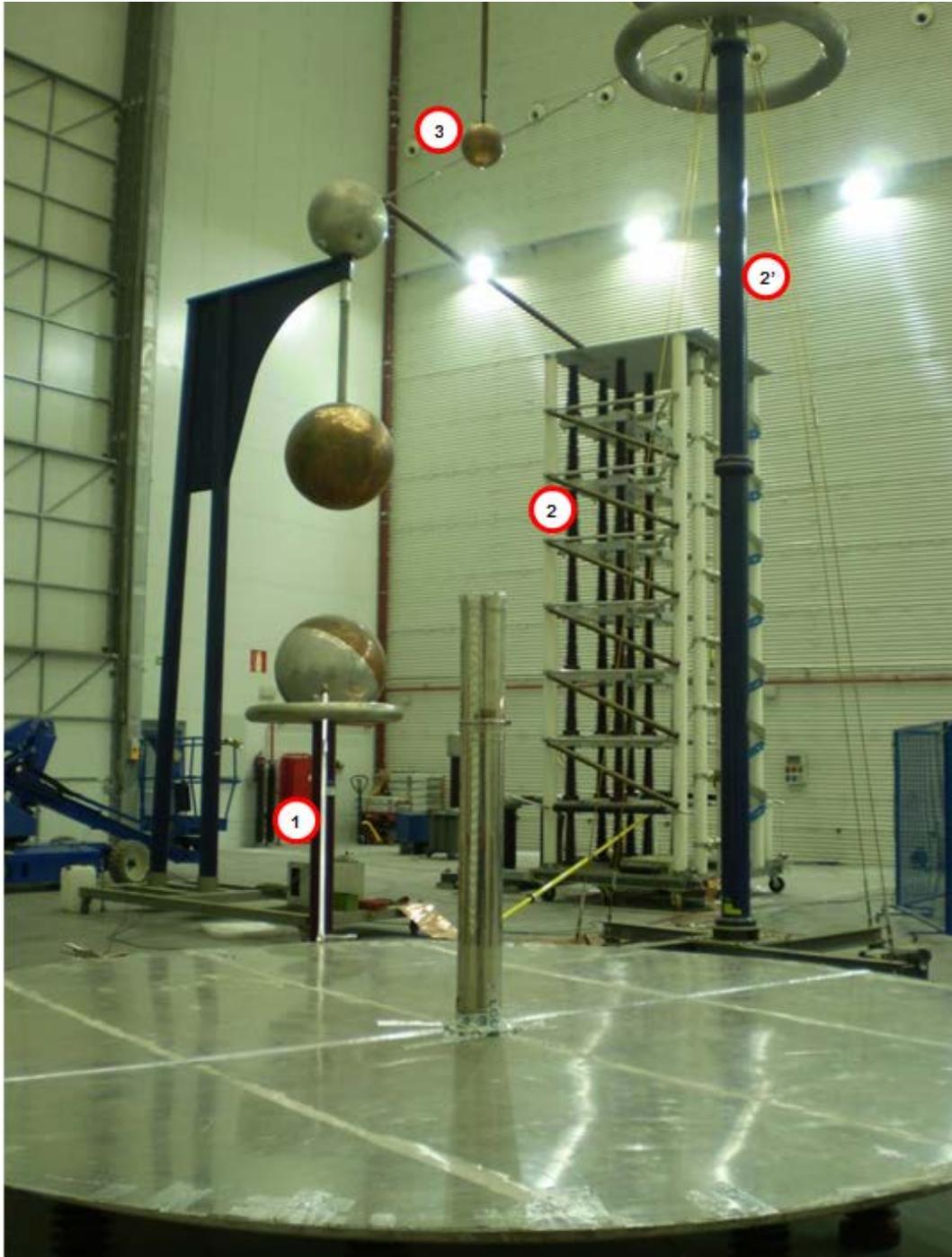
#### 4.1.3 CONFIGURACIÓN ESFERA-ESTRUCTURA ( $K=1,18$ )

La configuración de ensayo mostrada en la Figura 4-3 está constituida por un electrodo esférico superior, de 150 mm de diámetro y un electrodo inferior con forma de una estructura cilíndrica vertical, de 150 mm de diámetro y 1,5 m de altura, situada sobre un plano metálico circular de 4,5 m de diámetro, rematado por un toroide de 0,3 m de diámetro. La separación de los electrodos para esta configuración fue de 1,5 m, que corresponde con una tensión a impulsos tipo rayo del 50 % de probabilidad de descarga disruptiva de 852 kV.

Con el fin de determinar el factor de separación  $K$  correspondiente a esta configuración de ensayo, se aplicaron impulsos tipo maniobra 250/2500 de polaridad positiva, obteniéndose una tensión del 50% de probabilidad



impulsos lisos plenos (2) fue medida con un divisor capacitivo (2') conectado al electrodo superior de la configuración en ensayo (3).



Fotografía 4-2 - Configuración de ensayo formada por una esfera y cilindro-plano,  $K=1,18$ , con distancia de separación entre electrodos,  $d= 1,5$  m.

#### 4.1.4 CONFIGURACIÓN CONDUCTOR-ESTRUCTURA ( $K=1,42$ )

Esta configuración de ensayo está compuesta por un conductor horizontal de sección circular, de 25 mm de diámetro y 2,5 m de longitud, terminado en sus extremos por sendas esferas de 150 mm de diámetro, que evitan el efecto corona en los extremos del conductor. A una distancia de 1,5 m por debajo del conductor horizontal, se dispone el electrodo inferior, formado por una estructura cilíndrica vertical de 150 mm de diámetro y 1,5 m de altura, situada sobre un plano metálico circular de 4,5 m de diámetro rematado por un toroide de 0,3 m de diámetro (véase Figura 4-4).

También para esta configuración se determinó el factor de separación  $K$  mediante la aplicación de impulsos tipo maniobra 250/2500, de polaridad positiva, obteniéndose una tensión de 50% de probabilidad de descarga disruptiva de 895 kV. Teniendo en cuenta que para la misma distancia libre en aire de 1,5 m con una configuración punta-plano ( $K=1$ ), la tensión del 50% de probabilidad de descarga es de 632 kV, el factor de separación de esta configuración de ensayo resultó  $K=1,42$ , valor que se encuadra dentro del rango correspondiente a una configuración conductor-estructura ( $K=1,28$  a  $1,63$ ) establecida en la norma IEC 60071-2.

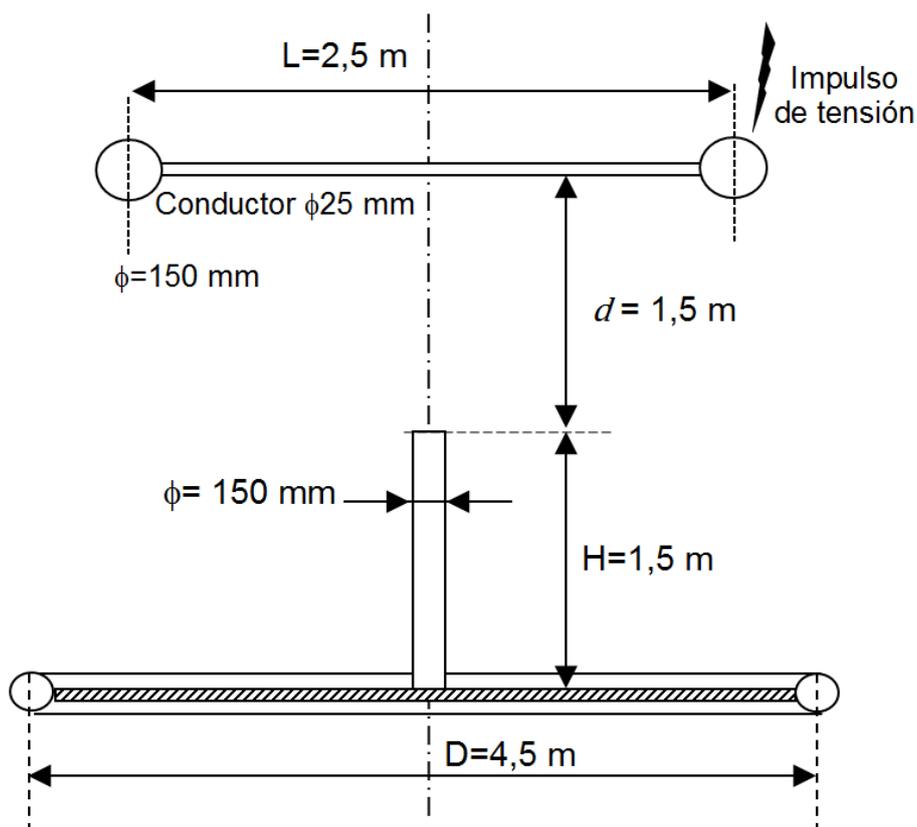
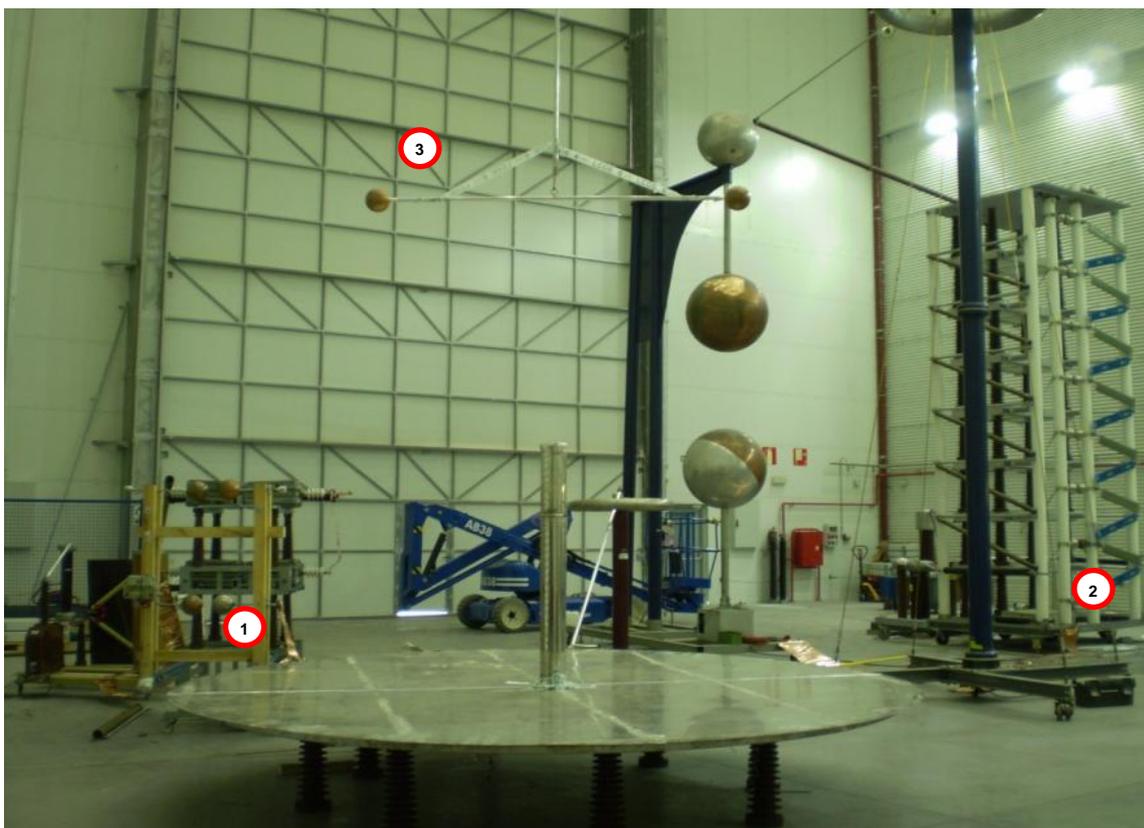


Figura 4-4 - Configuración de ensayo formada por una conductor horizontal y cilindro-plano,  $K=1,42$ , con distancia de separación libre en aire de  $d=1,5 \text{ m}$ .

En la Fotografía 4-3 se muestra la configuración real ensayada en las instalaciones de Tecnogetafe del Departamento de Alta Tensión del LCOE, que incluye el generador de ondas oscilantes (1), el generador de impulsos lisos tipo rayo 1,2/50 (2) y la configuración de ensayo formada por el conductor horizontal y el cilindro-plano (3).



Fotografía 4-3 – Configuración de ensayo formada por un conductor y cilindro-plano,  $K = 1,42$ , con distancia de separación libre en aire,  $d = 1,5$  m.

#### 4.1.5 CONFIGURACIÓN DE ANILLOS Y PLANO DE TIERRA ( $K \sim 1,32$ )

La configuración de ensayo de anillos en presencia de plano de tierra, consiste en un electrodo compuesto por dos anillos toroidales de diámetro externo de 0,56 m y 60 mm de diámetro del tubo toroidal, separados entre sí 0,4 m y situados a una distancia de 3 m respecto del plano de tierra.

Esta configuración, fue ensayada con un único generador Marx modificado como parte de una investigación realizada por *OKABE et al.* {37} y *UETA et al.* {48} con impulsos tipo rayo de polaridad positiva con oscilaciones superpuestas en la cresta, presentado una tensión de 1800 kV del 50% de probabilidad de descarga disruptiva.

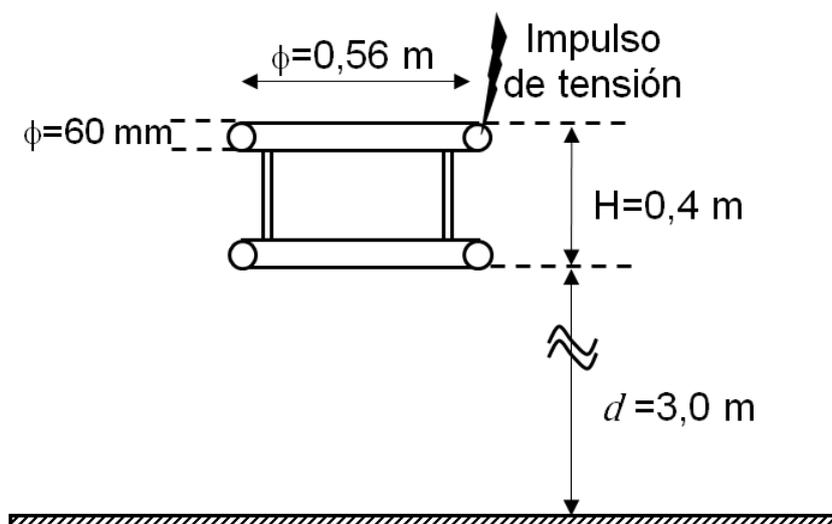


Figura 4-5 – Configuración de ensayo formada por dos electrodos toroidales y el plano de tierra, con distancia libre en aire de  $d = 3 \text{ m}$  {48}.

Al no estar indicado en la referencia {48}, el dato correspondiente al factor de separación  $K$ , se ha determinado como el valor que mejor compatibiliza con el resto de ensayos realizados (véase apartado 4.2) para la tensión de impulso tipo rayo obtenida de 1800 kV, resultando un factor de separación de  $K = 1,32$ . Cifra que está dentro el rango de valores de 1,18 a 1,35 establecido en el anexo G de la norma IEC 60071-2, para configuraciones de *conductor-estructura inferior*.

#### 4.2 NUEVA RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DISRUPTIVA PARA IMPULSOS TIPO RAYO NORMALIZADOS 1,2/50 Y LA DISTANCIA LIBRE EN AIRE

Conforme a lo establecido en la norma IEC 60071-2, la expresión que relaciona la tensión tipo rayo de polaridad positiva de probabilidad de descarga del 50%,  $U_t$ , con la distancia de separación libre en aire,  $d$ , para una configuración punta-plano, es la indicada en la fórmula:

$$U_{50}^+(1,2/50) = 530 \cdot d \quad (4.1)$$

donde:

$d$  distancia de separación, expresada en metros

$U_{50}^+$  tensión tipo rayo liso normalizada 1,2/50 de probabilidad de descarga disruptiva del 50% para punta-plano, expresada en kV que coincide con la denominada tensión de ensayo,  $U_t$  de la función de la tensión de ensayo.

Cuando la configuración no es punta-plano, para calcular la tensión de ensayo  $U_t$  es preciso corregir el valor de  $U_{50}^+$ , multiplicando por el factor  $K_{ff}^+$ . Por tanto, la relación entre la tensión de ensayo  $U_t$  y la distancia de separación  $d$  para configuraciones distintas a la de punta-plano con impulsos tipo rayo de polaridad positiva, adopta la expresión:

$$U_t = K_{ff}^+ \cdot 530 \cdot d \quad (4.2)$$

Despejando de la expresión (4.2), los valores experimentales de  $K_{ff}^+$ , obtenidos a partir de  $U_t$  en los ensayos realizados, pueden ser determinados por la expresión siguiente:

$$K_{ff}^+ = \frac{U_t}{530 \cdot d} \quad (4.3)$$

La relación entre  $K_{ff}^+$  y el factor de separación  $K$ , según la IEC 60071-2, viene dada por la siguiente ecuación lineal:

$$K_{ff}^+ = 0,74 + 0,26 \cdot K \quad (4.4)$$

Ecuación que, según la norma IEC 60071-2, resulta válida para distancias comprendidas entre 1 m a 8 m, con una desviación típica del 5%.

En esta tesis se han determinado los coeficientes de la ecuación lineal que relaciona  $K_{ff}^+$  con el factor de separación  $K$ , para las distancias analizadas, comprendidas entre 0,5 m y 2,5 m. La expresión obtenida ha servido para determinar los factores de separación de la configuración punta cónica-plano con una separación libre en aire de 0,91 m y el correspondiente a la configuración de ensayo dada en la referencia {48}.

$$K_{ff}^+ = \frac{U_{50}}{530 \cdot d} = a + b \cdot K \quad (4.5)$$

En la Tabla 4-1 se muestran los valores experimentales de  $K_{ff}^+$  obtenidos al aplicar la ecuación (4.3) con los valores de los ensayos realizados. Los factores de separación,  $K$ , se determinaron mediante el cociente entre el valor de la tensión del 50% de probabilidad de descarga disruptiva con impulsos tipo maniobra 250/2500, de polaridad positiva y el valor correspondiente obtenido para la configuración punta-plano ( $K=1$ ).

Tensión de ensayo $U_t$ (kV)	Distancia libre en aire $d$ (m)	Factor calculado $K_{ff}^+ = U_t / 530 \cdot d$	$K$ Obtenido por ensayo
290	0,55	0,9949	0,9778
852	1,5	1,0717	1,1820
975	1,5	1,2264	1,4161
1010	1,92	0,9925	0,9778
1320	2,5	0,9962	0,9778

Tabla 4-1 – Valores del factor de separación para impulsos tipo rayo de polaridad positiva teóricos y obtenidos experimentalmente

Tras obtener los valores de  $K_{ff}^+$  y  $K$  mostrados en la Tabla 4-1, para las configuraciones y niveles de tensión ensayados, se han determinado los coeficientes  $a$  y  $b$  de la recta que mejor ajusta por mínimos cuadrados al conjunto de los resultados experimentales, resultando los valores de  $a = 0,48$  y  $b = 0,52$ . Por lo tanto la expresión (4.5), se transforma en:

$$K_{ff}^+ = 0,48 + 0,52 K \quad (4.6)$$

En la Tabla 4-2 se muestra, para cada nivel de tensión de ensayo, el valor del factor  $K_{ff}^+$  resultante de los ensayos (segunda columna), el valor del factor  $K_{ff}^+$  obtenido al aplicar la nueva ecuación (4.6) (cuarta columna) y el obtenido cuando se aplica la expresión (4.4) de la norma IEC 60071-2 (sexta columna). En las columnas quinta y séptima de la tabla, se expresan los errores porcentuales de ambas fórmulas respecto a los factores  $K_{ff}^+$  resultantes de los ensayos. Puede observarse que los errores obtenidos al aplicar la expresión (4.4) de la norma IEC 60071-2, son significativamente superiores a los obtenidos al aplicar la nueva ecuación de ajuste (4.6).

Tras aplicar la nueva expresión (4.6) propuesta y evaluando el error obtenido entre el valor teórico calculado frente al valor obtenido experimentalmente, se obtiene en todos los casos, que el error es inferior al 2,1 %, respecto al máximo error de 9,6% que se obtuvo aplicando la expresión (4.4) de la norma, por lo que la expresión (4.6) aporta un error inferior en los ensayos realizados.

Tensión de ensayo $U_t$ (kV)	Factor calculado de los ensayos $K_{ff}^+ = U_t / 530 \cdot d$ (4.3)	$K$ Obtenido por ensayo	$K_{ff}^+$ Nueva ecuación (4.6)	Error (%) (4.6)-(4.3)	$K_{ff}^+$ IEC 60070-2 (4.4)	Error (%) (4.4)-(4.3)
290	0,9949	0,9778	0,9885	0,6	0,9942	0,1
852	1,0717	1,1820	1,0946	2,1	1,0473	2,3
975	1,2264	1,4160	1,2164	0,8	1,1082	9,6
1010	0,9925	0,9778	0,9885	0,4	0,9942	0,2
1320	0,9962	0,9778	0,9885	0,8	0,9942	0,2

Tabla 4-2 – Tabla comparativa de los factores  $K_{ff}^+$  calculados por las dos expresiones (4.4) y (4.6), junto con los errores respecto al valor calculado por los ensayos experimentales

Analizando los errores obtenidos, se observa que son mayores o iguales con la formula (4.4) (IEC 60070-2) que con la fórmula (4.6), especialmente cuanto mayor es el factor de separación  $K$  de la configuración ensayada (véase la Figura 4-6).

El factor de separación de la configuración punta cónica-plano correspondiente a la distancia de 0,91 m, se ha estimado mediante la nueva expresión (4.6), ya que esta expresión ha sido obtenida mediante los ensayos realizados en el laboratorio, con las condiciones locales que mejor representan las particularidades del mismo y que pudieran resultar generalizables a los ensayos de una configuración con impulsos tipo maniobra y con impulsos tipo rayo.

$$K(d = 0,91 \text{ m}) = \frac{k_{ff}^+ - 0,48}{0,52} = 0,91 \quad (4.7)$$

Sin embargo, para estimar el factor de separación correspondiente a la configuración de dos anillos toroidales en presencia de plano de tierra descrito en el apartado 4.1.5 {48}, al disponer únicamente del valor la tensión de ensayo a impulsos tipo rayo,  $U_t$ , realizado en un laboratorio diferente al que se realizaron el resto de los ensayos, se ha considerado oportuno tener en cuenta también la fórmula establecida en la norma IEC 60071-2. Se ha adoptado como criterio de estimación de  $K$ , el ponderar ambos resultados: el obtenido con la nueva fórmula (4.6) basada en los ensayos realizados en LCOE con motivo de esta tesis y el obtenido con la expresión de la norma (4.4) aplicable para distancias de 1 m hasta 10 m, dando un peso de ponderación del 75% y del 25%, respectivamente.

$$K(d = 3 \text{ m}) = 0,75 \cdot \left[ \frac{k_{ff}^+ [Eq. (4.6)] - 0,48}{0,52} \right] + 0,25 \cdot \left[ \frac{k_{ff}^+ [Eq. (4.4)] - 0,76}{0,24} \right] \quad (4.8)$$

De esta forma los nuevos valores ponderados para el factor de separación  $K$ , se incluyen en la Tabla 4-3 siguiente:

Tensión de ensayo $U_t$ (kV)	Distancia libre en aire $d$ (m)	Factor calculado $K_{ff}^+ = U_t / 530 \cdot d$	Factor de separación $K$ Según (4.4)	Factor de separación $K$ Según (4.6)	Factor de separación $K$ ponderado
460	0,91	0,954	-	0,911	0,91
1800	3,0	1,132	1,508	1,254	1,32

Tabla 4-3 – Valores del factor de separación calculados a partir de la nueva fórmula (4.6) y ponderando los cálculos de los resultados experimentales realizados con las expresiones (4.4) y (4.6).

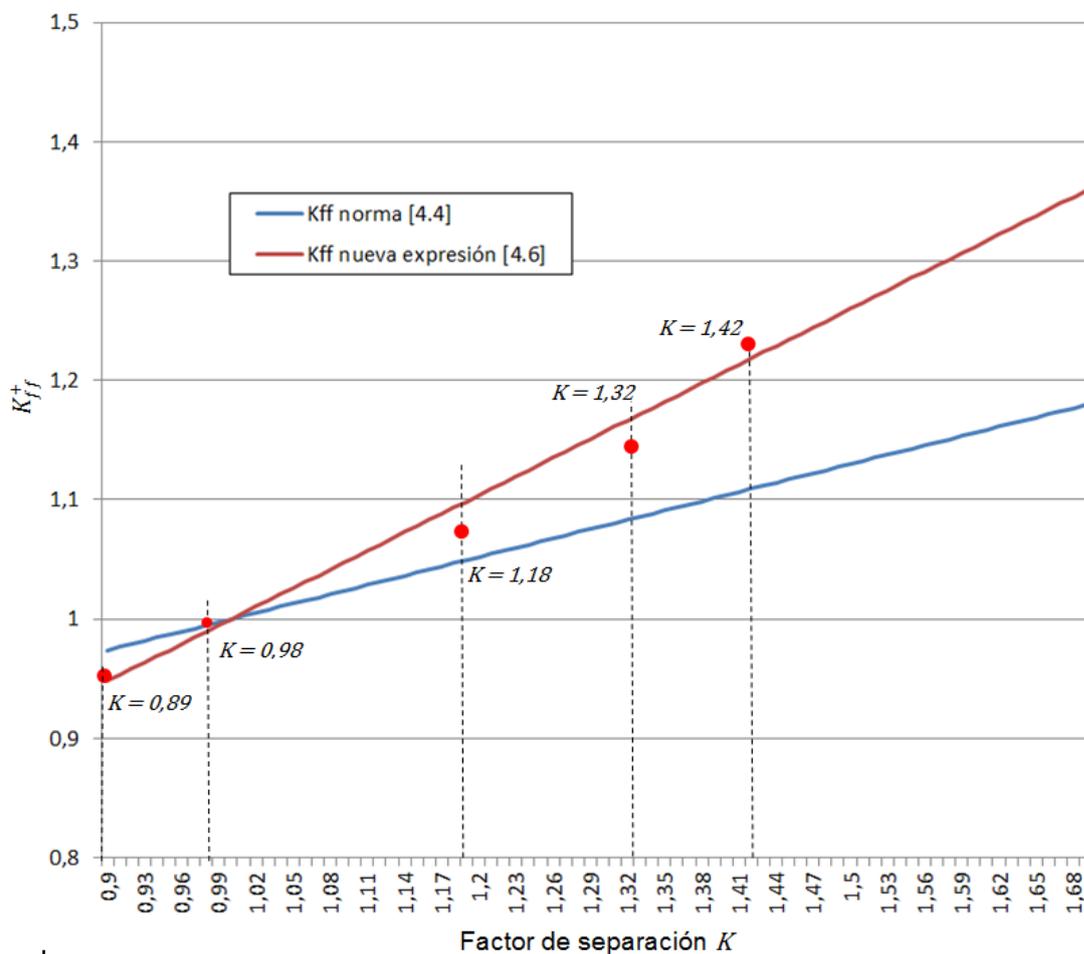


Figura 4-6 – Representación del factor  $K_{ff}^+$  según las ecuaciones (4.4) y (4.6) en función del factor de separación  $K$ . También se muestran (punto rojo), los valores experimentales y calculados del factor  $K$  obtenidos.

### 4.3 PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO

#### 4.3.1 PARÁMETROS SENSIBLES A LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO

En este apartado se analiza el efecto de la variación de las magnitudes de influencia que pueden afectar a la función de la tensión de ensayo en función de los ensayos realizados. Seguidamente se enumeran estas magnitudes de influencia:

- Instalación de generación de la tensión de ensayo: Para generar los impulsos tipo rayo oscilantes se utilizaron, bien dos generadores sincronizados (configuración flotante) o bien un sólo generador tipo Marx modificado (configuración a tierra), denominadas en el capítulo 3 como instalación tipo 2G o instalación tipo 1G.
- Frecuencia de la sobretensión  $f$  (véase Figura 4-7): El efecto de la frecuencia de la sobretensión se ha analizado desde 30 kHz hasta 800 kHz.
- Amplitud relativa  $\beta'$  de la sobretensión (véase Figura 4-7): se utilizaron impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas en la cresta de amplitudes relativas comprendidas entre 5% y 35%.
- Amortiguamiento  $\delta$  de la sobretensión (véase Figura 4-7): se aplicaron impulsos oscilantes con unos valores de amortiguamiento desde 0% (sobretensión única sin oscilación) hasta el 35% (sobretensión oscilante).
- Distancias libre de aire entre electrodos  $d$ : para lograr diferentes tensiones de ensayo,  $U_t$ , se utilizaron separaciones en aire diferentes, comprendidas entre 0,15 m y 3,0 m.
- No uniformidad del campo eléctrico: El factor de separación  $K$  establecido en la norma IEC 60071-2 {21} ha sido utilizado como parámetro indicador de la homogeneidad del campo eléctrico correspondiente a un ensayo. El factor de separación se varió para las configuraciones utilizadas entre  $K \sim 1$  (campo fuertemente no homogéneo) y 1,42 correspondiente a una configuración que simula una disposición electrodo conductor-estructura (campo notablemente más homogéneo).

En los siguientes apartados se analiza experimentalmente la influencia de cada uno de estos parámetros utilizando para ello los resultados de los ensayos realizados. El efecto del tipo de instalación generadora se consideró mediante la repetición del mismo ensayo utilizando, para conformar los impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas en la cresta, el montaje de uno o dos generadores.

Las disposiciones de ensayo descritas en el apartado 4.1 permitieron modificar las distancias de separación libres en aire,  $d$ , y la no uniformidad del campo eléctrico (factor de separación,  $K$ ), dentro de los valores de interés.

Los parámetros que definen la forma de onda de un impulso tipo rayo oscilante son la frecuencia principal de la oscilación  $f$ , la amplitud relativa de la sobretensión,  $\beta'$  y el amortiguamiento de la sobretensión  $\delta$ , que se controlan mediante el valor de la capacidad, inductancia y resistencia del generador oscilante o añadiendo una inductancia al generador de impulsos (véase capítulo 2). En la Figura 4-7 se muestra gráficamente los diferentes parámetros citados

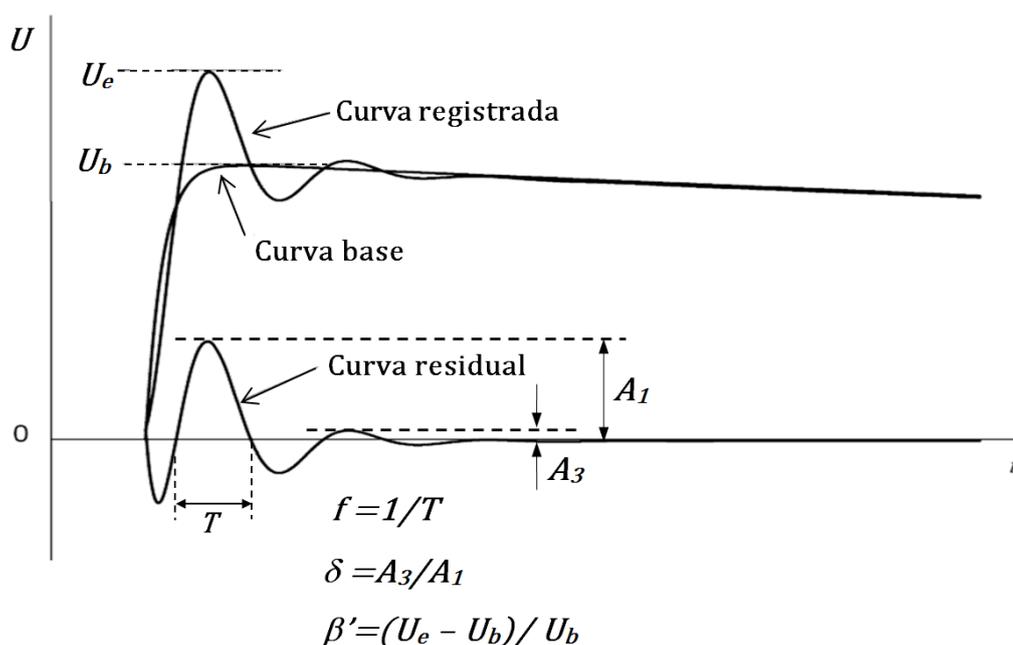


Figura 4-7 – Expresión gráfica de los parámetros  $U_e$ ,  $U_b$ ,  $\beta'$  y  $\delta$  de un impulso tipo rayo con oscilaciones superpuestas, según se define en las últimas ediciones de las normas IEC 60060-1 y IEEE Std 4

Mediante el software de medida descrito en el apartado 3.1 {12}, se determinan los parámetros característicos de cada impulso ( $f$ ,  $\beta'$  y  $\delta$ ), junto con los valores de la tensión extrema  $U_e$  de la curva registrada y el valor de la tensión de cresta de la curva base  $U_b$ , definen las características de los impulsos.

Aplicando el procedimiento de ensayo descrito en el capítulo 3 se obtienen valores experimentales de la función de la tensión de ensayo con desviaciones típicas iguales o inferiores a 0,05 p.u. Por tal motivo, el criterio utilizado para calificar si un determinado parámetro influye a la función de la tensión de ensayo es evaluar, si al variar el referido parámetro, en su rango de estudio, el valor obtenido de la función de tensión de ensayo presenta una diferencia superior a 2 veces la desviación típica, es decir, variaciones máximas de 0,1 p.u., significan que dicho parámetro influye a la función de la tensión de ensayo.

#### 4.3.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE INSTALACIÓN DE GENERACIÓN UTILIZADA

Se han determinado valores de la función de la tensión de ensayo para la configuración de ensayo punta cónica–plano descrita en el apartado 4.1.1 utilizando los dos tipos de instalaciones de generación de impulsos de alta tensión descritas en el capítulo 3.1, consistentes una de ellas, en un generador único tipo Marx modificado (instalación 1G) y la otra en dos generadores sincronizados (instalación 2G). Los ensayos se han efectuado para dos rangos de distancias de separación libres en aire diferentes de  $0,55 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$  y de  $0,91 \pm 0,05 \text{ m}$ , que corresponden a niveles de tensión tipo rayo liso normalizado 1,2/50 del 50% de probabilidad de descarga disruptiva de  $291 \pm 31 \text{ kV}$  y de  $459 \pm 21 \text{ kV}$  respectivamente.

Los ensayos se realizaron con sobretensiones oscilantes de frecuencia de la oscilación  $f = 250 \text{ kHz}$  y con valores de amplitud relativa de sobretensión  $\beta'$  entre 10% y 35% y de amortiguamiento  $\delta$  entre 15% y 35% (véase Tabla 4-4). De esta forma, se analiza la influencia no sólo del tipo de generador utilizado (uno o dos generadores o referida a tierra o flotante), sino también el efecto de los parámetros  $\beta'$ ,  $\delta$  y  $d$ . En la Figura 4-8 se incluyen las formas de onda de los impulsos aplicados en cada una de las disposiciones de generación de la tensión de ensayo (instalación 1G e instalación 2G).

Montaje para el ensayo	2G	1G	2G	1G
Distancia de aire $d$ (m)	0,50	0,60	0,96	0,86
Tensión de ensayo $\bar{U}_t$ (kV)	261	321	480	438
$E = \bar{U}_t/d$ (kV/m)	522	535	500	508
Sobretensión relativa $\beta'$ (%)	0-10	20-35	0-10	20-35
Amortiguamiento $\delta$ (%)	0-15	25	0-10	25
Valores de la función de la tensión de ensayo para el nivel de tensión del 50% $\bar{k}$ (50%)	0,15 $\pm 0,05$	0,25 $\pm 0,05$	0,12 $\pm 0,04$	0,15 $\pm 0,04$

Tabla 4-4 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo,  $k$  factor, para la configuración mostrada en la Figura 4-1 correspondiente a la configuración punta-plano, descrita en el apartado 4.1.1.

Analizando los resultados de la función de la tensión de ensayo obtenidos para las distancias libres en aire de 0,50 m y 0,60 m por un lado, y de 0,86 m y 0,96 m por el otro, se observa que la diferencia entre los valores de la función de tensión de ensayo es de hasta 0,13 p.u., superior al valor admisible de 0,1 p.u., lo que justifica considerar que la distancia de separación libre en aire,  $d$ , es un factor que influye en la función de la tensión de ensayo. La función de la tensión de ensayo tiende a valores más pequeños cuando se incrementa la distancia.

Sin embargo, las diferencias en la función de la tensión de ensayo cuando se utilizan los montajes de uno o dos generadores (Instalación 1G, Instalación 2G) no fueron superiores a 2 veces la desviación típica, por lo que se considera que la función de tensión de ensayo,  $\bar{k}$  (50%), no está influenciada significativamente por la instalación de generación de los impulsos, o lo que es lo mismo, por el hecho de que la configuración a ensayar este referida a tierra o se flotante.

Además, teniendo en cuenta que las formas de onda generadas tuvieron un amplitud relativa de sobretensión  $\beta'$  y un valor de amortiguamiento,  $\delta$ , que variaron entre el 10% y el 35% para  $\beta'$  y entre el 15% y el 35% para  $\delta$ , cuando se utilizó un sólo generador y cuando se utilizaron dos generadores, también puede concluirse que la amplitud relativa  $\beta'$  y el amortiguamiento de la sobretensión,  $\delta$ , en los rangos analizados entre el 10% y el 35%, no afectan significativamente a la función de la tensión de ensayo. Un estudio más específico al respecto de  $\beta'$  y  $\delta$ , se realiza en el apartado siguiente.

Independientemente de estas conclusiones, puede apreciarse que los valores de la función de la tensión de ensayo tienden a disminuir cuando se generan impulsos de amplitud relativa  $\beta'$  y amortiguamiento,  $\delta$ , bajos frente a cuando se generan impulsos con  $\beta'$  y  $\delta$ , más altos, lo que permite anticipar la sospecha de que existe una cierta influencia de estos factores, que será analizada y confirmada en el apartado siguiente.

En la Figura 4-8 se muestran dos formas de onda de los impulsos utilizados para la frecuencia de la oscilación  $f$  de 250 kHz, con diferentes amplitudes relativas,  $\beta'$ , y amortiguamiento,  $\delta$ , de la sobretensión.

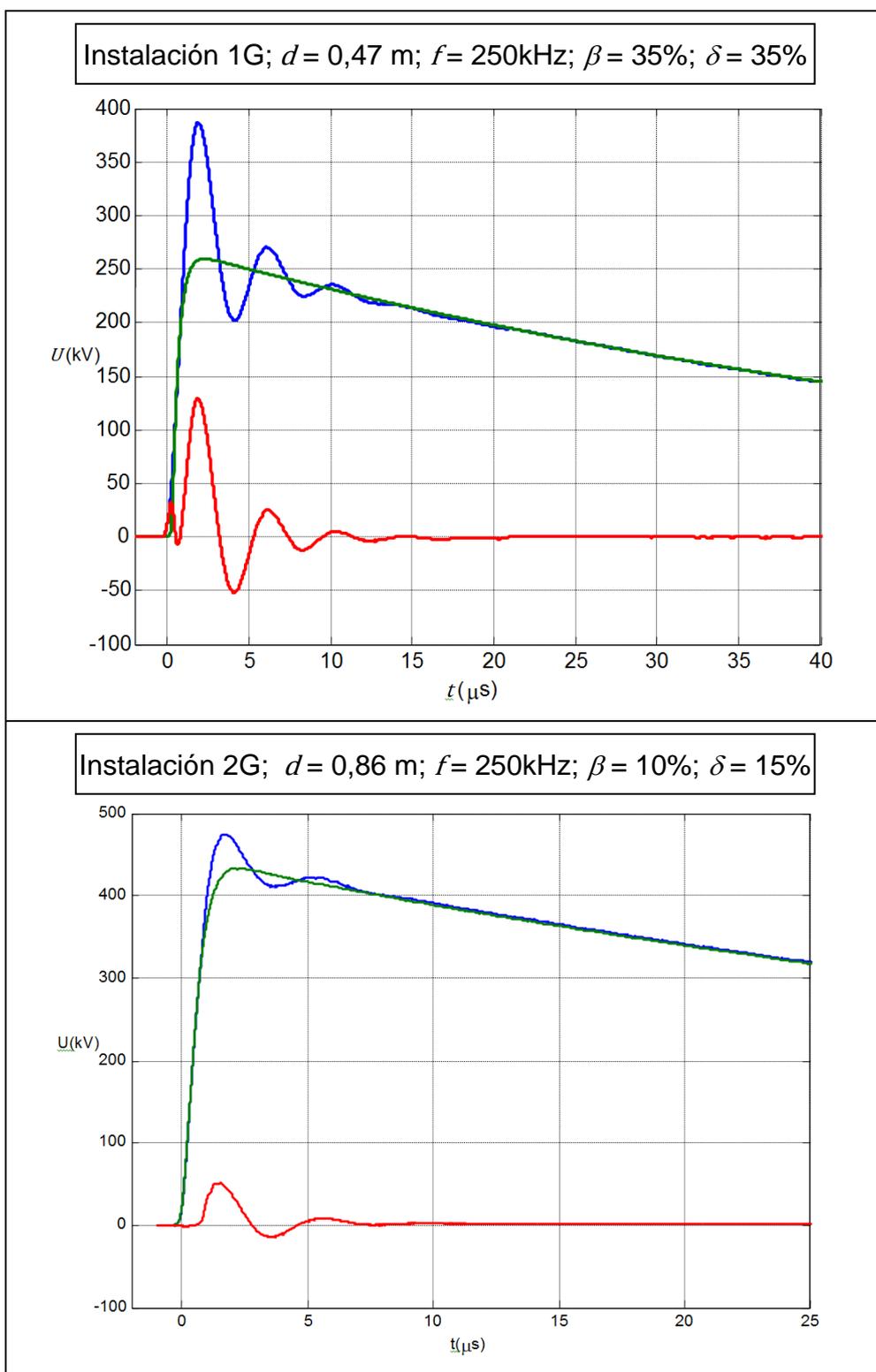


Figura 4-8 – Formas de onda de impulsos oscilantes aplicados según la disposición de ensayo de 1G o 2G para distancias de 0,5 m y 0,86 m.

#### 4.3.3 INFLUENCIA DE LA AMPLITUD RELATIVA $\beta'$ Y DEL AMORTIGUAMIENTO $\delta$ DE LA SOBRETENSIÓN

En el apartado anterior ya se observó, para impulsos oscilantes de frecuencia de oscilación de 250 kHz, que las variaciones de las amplitudes relativas de sobretensión  $\beta'$  comprendidas entre 10% y el 35% y las variaciones del amortiguamiento  $\delta$  comprendidas entre el 15% y el 35% podían afectar de algún modo, el valor de la función de la tensión de ensayo. No obstante, con objeto de poder analizar con mayor detalle la influencia de estos dos parámetros  $\beta'$  y  $\delta$  en los valores de la función de la tensión de ensayo, se ha realizado una batería de ensayos adicionales con impulsos tipo rayo oscilantes para la configuración de ensayo de campo no homogéneo punta-plano, con frecuencias de oscilación del orden de 35 kHz, 75 kHz y 255 kHz y para distancias de separación de 0,55 m, 0,91 m y 1,92 m (tensiones de ensayo comprendidas entre 260 kV y 1010 kV).

Analizando los resultados de la función de la tensión de ensayo de la Tabla 4-5 para cada distancia libre en aire y para las diferentes frecuencias de oscilación, se evidencia que además de la frecuencia de oscilación, afecta muy significativamente a los resultados de la función de la tensión de ensayo la distancia libre en aire,  $d$ , aspecto éste que no se conocía de la función  $k(f)$  establecida en la IEC 60060-1.

Además, los resultados de la Tabla 4-5 permiten apreciar que la diferencia de valores de la función de tensión de ensayo para diferentes valores de amplitud relativa  $\beta'$  y de amortiguamiento  $\delta$ , correspondientes a las diferentes distancias de separación,  $d$ , y a las diferentes frecuencias de oscilación analizadas,  $f$ , superaron las diferencias de 0,1 pu, valor máximo aceptable para considerar que un parámetro no afecta (véanse las celdas sombreadas correspondientes a la distancia de 0,55 m). Por este motivo, puede concluirse que la amplitud relativa,  $\beta'$ , y el amortiguamiento,  $\delta$ , de la sobretensión también afectan al valor de la función de la tensión de ensayo, aunque en menor medida que la distancia de separación,  $d$ , y la frecuencia de la oscilación,  $f$ . En consecuencia, con el fin de no tener que considerar estos parámetros como variables en la función de la tensión de

---

ensayo, se considera suficiente con fijar rangos máximos de variación, que puedan ser aceptables a nivel práctico. Un valor máximo admisible para la amplitud relativa,  $\beta'$ , de la sobretensión de hasta el 25%, y un valor máximo para el amortiguamiento  $\delta$  del 20% podrían ser admisibles si se analiza los resultados de la Tabla 4-5. Ambos valores límite pueden ser propuestos como mejora de la nueva revisión de la norma IEC 60060-1.

Distancia de aire d (m)	0,55±0,05						0,91±0,05				1,92			
$\bar{U}_t$ (kV)	290 ± 30						460 ± 20				1010			
$E = \bar{U}_t/d$ (kV/m)	527						505				526			
f (kHz)	35±5		75±5		255±5		35±5		255±5		35±5		75±5	
$\beta'$ (%) $\delta'$ (%)	10	35	10	35	10	35	10	35	10	35	10	25	5	10
0-5	-	0,85	-	-	0,13	-	-	0,62	0,15	-	-	0,55	-	-
15	-	-	0,63	0,75	0,15	-	-	-	0,12	-	-	-	0,29	0,31
20	0,93	-	-	-	-	-	0,68	-	-	-	0,54	-	-	-
35	-	-	0,72	-	-	0,25	-	-	-	0,15	-	-	0,22	-
Valor medio de $\bar{k}$ (50%)	0,89 ± 0,04		0,72 ± 0,03		0,18 ± 0,05		0,65 ± 0,03		0,14 ± 0,02		0,55 ± 0,01		0,27 ± 0,05	

Tabla 4-5 – Valores medios de las funciones de tensión de ensayo asociados a diferentes amplitudes de sobretensión relativa  $\beta'$  y amortiguamientos de la oscilación  $\delta$  y correspondientes a la configuración de ensayo punta-plano, descrita en 4.1.1

En la Figura 4-9, se muestran las formas de onda de los impulsos aplicados para las frecuencias de oscilación de 35 kHz y 250 kHz con diferentes valores de amplitud relativa,  $\beta'$ , y de amortiguamiento de la sobretensión,  $\delta$ , y con diferentes valores de tensión de ensayo correspondientes a distancias comprendidas entre 0,55 m y 1,92 m de la misma configuración punta-plano, descrita en el apartado 4.1.1.

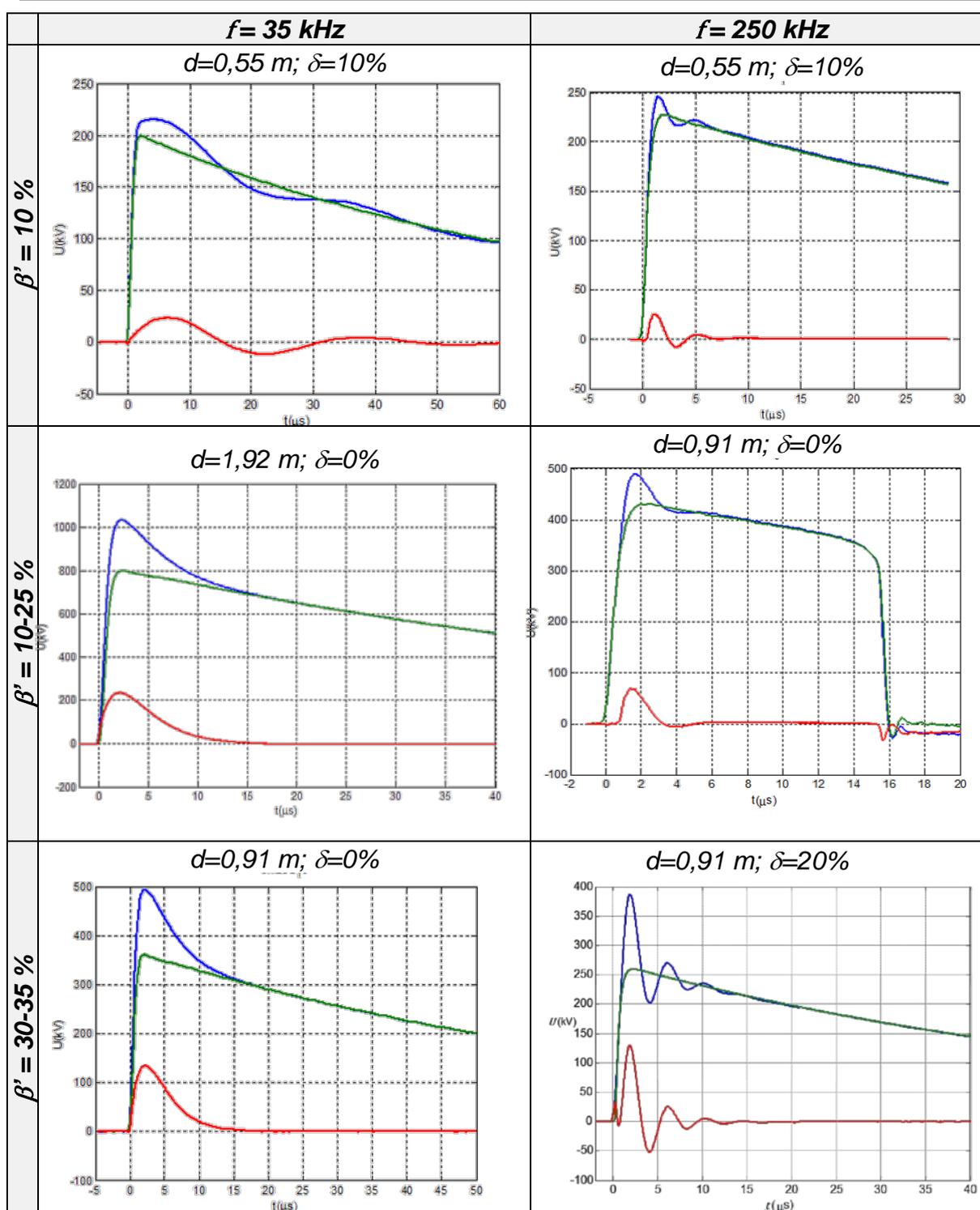


Figura 4-9 – Formas de onda de la tensión de impulso tipo rayo aplicada con diferentes valores de frecuencia de oscilación y amplitud relativa de sobretensión.

#### 4.3.4 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA LIBRE EN AIRE

Con objeto de determinar en detalle la influencia de la distancia de separación en aire libre sobre la función de la tensión de ensayo, se analiza en este apartado configuraciones de ensayo de campo no homogéneo punta-plano y punta-esfera ( $K \sim 1$ ), para distancias comprendidas entre 0,05 m y 2,5 m. Este rango de distancias permite cubrir tensiones de ensayo,  $U_t$ , desde 53 kV hasta 1,32 MV. En la Tabla 4-6 se muestran los valores de la función de tensión de ensayo para diferentes frecuencias de oscilación de la sobretensión.

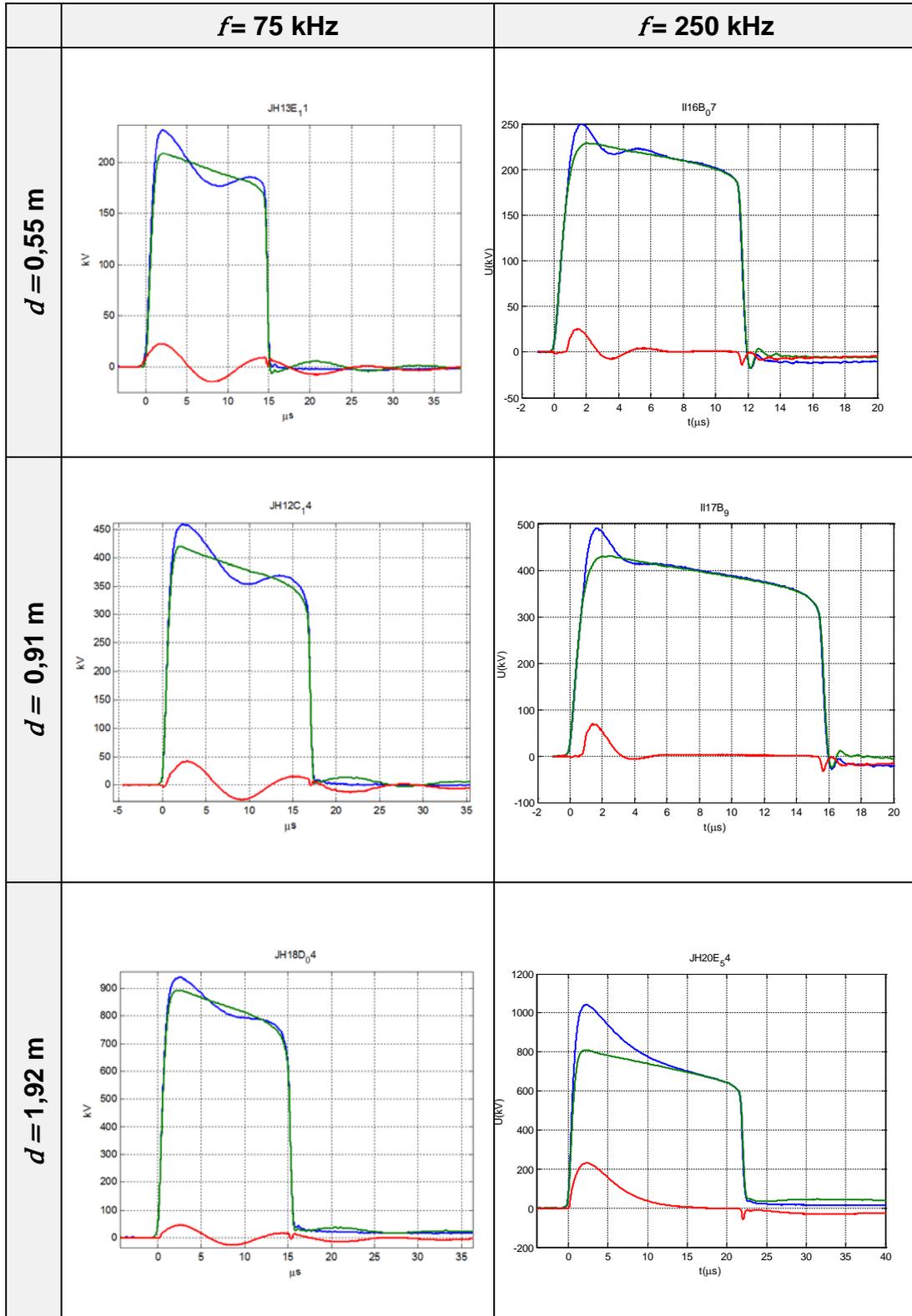
Configuración de ensayo $K \sim 1$		a) Proyecto Europeo	b) Punta-esferas/4.1.2	c) Punta-plano s/4.1.1				$k(f)$ de la norma
Distancia de aire (m)		0,05	0,15	0,55	0,91	1,92	2,5	
$\bar{U}_t$ (kV)		53	125	290	460	1010	1320	
$E = \bar{U}_t/d$ (kV/m)		1.000	853	527	505	526	528	
$f$ (kHz)	35	1,0	1,0	0,89	0,65	0,55	0,72	1,0
	75	1,0	1,0	0,72	0,30	0,27	0,33	0,99
	200	1,0	-	-	-	-	-	0,92
	250	-	0,80	0,18	0,14	0,07	0,08	0,88
	520	0,51	0,58	-	-	-	-	0,63
	800	0,08	0,25	-	-	-	-	0,42

Tabla 4-6 - Valores de la función de tensión de ensayo para campos no homogéneos (factor de separación  $K \sim 1$ ): a) P.E.: datos recogidos del proyecto europeo {2}, b) Configuración punta-esfera con valores recogidos en el apartado 4.1.2 y c) Configuración punta-plano con valores recogidos en el apartado 4.1.1.

Para campo no homogéneo ( $K \sim 1$ ) se observa que cuando las distancias son pequeñas, del orden de 0,05 m a 0,15 m, las discrepancias de los valores de la función de la tensión de ensayo determinados experimentalmente con los establecidos por la función de ensayo de la norma IEC 60060-1,  $k(f)$ , son menores a las discrepancias que aparecen para distancias libres de aire mayores a 0,5 m, incrementándose esta diferencia también con la frecuencia. También se observa un desplazamiento de la frecuencia umbral de inicio del decrecimiento de la función de la tensión de ensayo,  $k(f)$ , desde el valor de 75 kHz para la función de la tensión de ensayo establecida por la norma, hasta valores por debajo de los 35 kHz para funciones de tensiones de ensayo correspondientes a distancias mayores a 0,5 m.

En la Figura 4-10 se muestran diferentes formas de onda de los impulso tipo rayo oscilante en los que se produce descarga disruptiva aplicados a la configuración de ensayo del apartado 4.1.1 ( $K \sim 1$ ). Al tratarse de campo no homogéneo, la descarga disruptiva tiene lugar después del valor de cresta del impulso, en un instante de la cola del impulso suficientemente retrasado para que el área disruptiva sea alcanzada, según fue explicado en capítulo 2 por el método de integración o de igualdad de áreas. Al producirse el corte en la cola de la onda es posible calcular los valores de los parámetros característicos de los impulsos (frecuencia de la oscilación, amplitud relativa de sobretensión y amortiguamiento) sin dificultad. Es de destacar que para configuraciones de campo homogéneo, la descarga se produce en la cresta del impulso (descargas extremadamente rápidas).

A la vista de la Figura 4-10, es posible apreciar que el instante de corte se retrasa (descarga disruptiva más lenta) para las configuraciones correspondientes a distancias libres de aire mayores para una misma frecuencia de la sobretensión. A la vez también puede observarse que el instante de corte se retrasa para frecuencias de la sobretensión más elevadas para una misma distancia de separación. Estos efectos serán determinantes en la justificación de la generalización de la función de la tensión de ensayo descrita en el apartado 4.5.



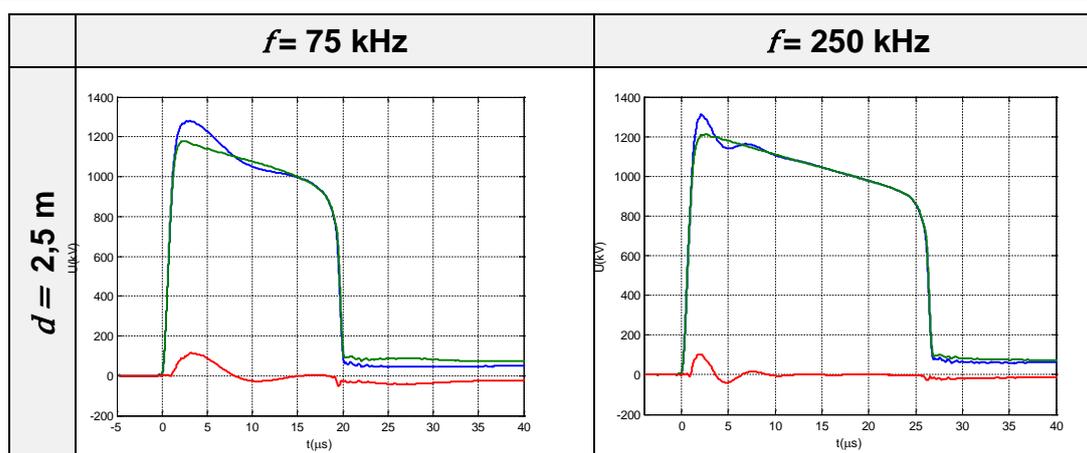


Figura 4-10 – Formas de onda de los impulsos tipo rayo en los que se ha producido descarga disruptiva aplicados a diferentes distancias libres de aire para la configuración de campo no homogéneo punta-plano ( $K \sim 1$ ).

#### 4.3.5 INFLUENCIA DE LA HOMOGENEIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO

Para analizar la influencia de la no homogeneidad del campo eléctrico presente en las configuraciones estudiadas, se han realizado ensayos en configuraciones con diferentes factores de separación  $K$ . El campo eléctrico no homogéneo se ha variado utilizando configuraciones con valores de factores de separación desde  $K \sim 1$ , (campo fuertemente no homogéneo de tipo punta-plano) hasta  $K = 1,42$ , configuraciones más homogéneas de tipo conductor-estructura. Para completar los resultados se han utilizado los resultados experimentales obtenidos en una investigación realizada en R&D Center de Tokio Electric Power Company (Japón) publicados en {37} y {48}, para una configuración con distancia libre en aire de 3,0 m, cuyo factor de separación estimado en el apartado 4.2, fue de  $K \sim 1,32$ . Los ensayos fueron realizados con frecuencias de la sobretensión comprendidas entre 35 kHz y 520 kHz y con amplitudes relativas de la sobretensión del 10% y 20% y amortiguamientos inferiores al 15% según se muestran en la Tabla 4-7. Los valores de la tensión de la función de ensayo correspondientes a la columna de  $K \sim 1$ , han sido obtenidos por interpolación lineal de los resultados experimentales correspondientes a la configuración del apartado 4.1.1, en donde la distancia libre en aire, se varió desde 0,5 m a 2,5 m.

Configuración de ensayo			4.1.1	4.1.3	4.1.4	4.1.5			
Factor de separación $K$			$\sim 1$	1,18	1,42	1,32			
$\bar{U}_t$ (kV)			781	852	975	1800			
Distancia de aire $d$ (m)			1,5 <i>(interpolado)</i>	1,5	1,5	3,0			
$E = \bar{U}_t/d$ (kV/m)			520	568	650	600			
$k(f)$ norma	$f$ (kHz)	$\beta$ (%) $\delta$ (%)	10	10	20	5	20	10	20
1,0	35	0-5	0,60	0,64	-	-	-	-	-
0,99	75	0-6	0,28	0,41	-	-	0,96	-	-
0,97	116	5	-	-	-	-	0,79	-	-
0,96	150	0	-	-	0,25	-	-	0,50	0,34
0,95	160	5	-	-	-	-	0,76	-	-
0,93	180	15	-	0,18	-	-	-	-	-
0,88	250	0-5	0,10	-	-	-	-	0,41	0,23
0,74	400	0	-	-	-	-	-	0,20	0,09
0,65	520	7	-	-	-	0,35	-	-	-

Tabla 4-7 – Valores experimentales de la función de tensión de ensayo para campos eléctricos no homogéneos con factores de separación  $K \sim 1$ ,  $K = 1,18$ ;  $K = 1,42$  y  $K = 1,32$  correspondiente a las configuraciones de ensayo de los apartados 4.1.1, 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5.

Puede observarse que para la misma distancia libre en aire de 1,5 m las diferencias de los valores de la función de la tensión de ensayo son superiores a 0,1 p.u., cuando el factor de separación,  $K$ , varía entre 1 y 1,42, manteniendo constante la frecuencia de la sobretensión y la distancia libre en aire. También puede observarse que los valores de la función de la tensión de ensayo son muy diferentes a los valores normativos reflejados en la primera columna de la Tabla 4-7. Todo ello evidencia que la función de la tensión de ensayo depende del grado de no homogeneidad del campo eléctrico.

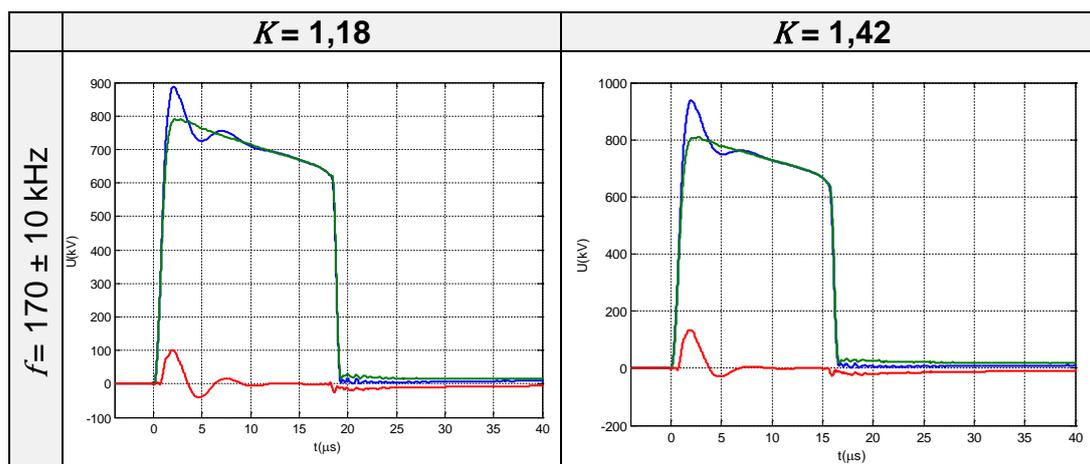


Figura 4-11 – Formas de onda de los impulsos tipo rayo en los que se ha producido descarga disruptiva para la frecuencia de la sobretensión de 175 kHz:  
a) configuración de ensayo  $K=1,18$  y b) configuración de ensayo  $K=1,42$ .

En la Figura 4-11 puede observarse que el instante de corte se anticipa en unos microsegundos (descarga disruptiva más rápida) para la configuración que resulta ser más homogénea ( $K=1,42$ ) que para la configuración que lo es menos ( $K=1,18$ ). En la Figura 3-18 del capítulo 3, se muestra que para campos cuasi-homogéneos, la descarga disruptiva se produce en la cresta del impulso (descarga extremadamente rápida). Este efecto de anticipación de la descarga será tratado con más detalle en el apartado 4.5 relativo a la generalización de la función de la tensión de ensayo.

#### 4.4 REVISIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO.

La ecuación matemática ajustada para representar la función de la tensión de ensayo correspondiente a un aislamiento genérico viene dada por {15}:

$$k(f) = \frac{1}{1 + c \cdot f^n} \quad (4.9)$$

donde:

$c$  : coeficiente que desplaza la curva  $k(f)$  con respecto al eje de la frecuencia de izquierda a derecha, sin cambiar su pendiente de variación.

$n$  : coeficiente que acentúa o suaviza la pendiente de decrecimiento de la curva  $k(f)$  con la frecuencia.

En la actual función de la tensión de ensayo recogida por las normas IEC 60060-1 {18} e IEEE Std 4 {24}, los valores de los coeficientes  $c$  y  $n$  fueron ajustados a los valores 2,2 y 2, respectivamente, teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos en el proyecto europeo {2}, tras ensayar un conjunto de medios dieléctricos bajo las siguientes configuraciones y polaridades:

- aire con campo homogéneo de ambas polaridades,
- aire con campo no homogéneo de polaridad positiva,
- aceite con campo homogéneo de polaridad positiva,
- XLPE con campo homogéneo de polaridad positiva,
- SF<sub>6</sub> con campo homogéneo de polaridad positiva y
- SF<sub>6</sub> con campo no homogéneo de ambas polaridades.

Se parametrizó por tanto, la expresión (4.9), de la forma siguiente:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2 \cdot f^2}$$

Las tensiones de ensayo  $U_t$  utilizadas en el proyecto europeo estuvieron comprendidas entre 53 kV y 174 kV, por lo que en esta tesis, se amplía la investigación para distancias libres de aire en campo no homogéneo con niveles de tensión de ensayo de hasta 1,8 MV. Los ensayos disruptivos realizados en esta tesis, permiten replantearse los coeficientes  $c$  y  $n$ , aplicables para distancias libres en aire desde unos pocos centímetros (5 cm), hasta unos pocos metros (3 m), que corresponden a tensiones de ensayo  $U_t$ , desde 53 kV hasta 1800 kV, respectivamente.

#### 4.4.1 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA DIFERENTES DISTANCIAS LIBRES EN AIRE CON FACTOR DE SEPARACIÓN $K \sim 1$

En la Tabla 4-8 se representan el conjunto de valores de la función de la tensión de ensayo obtenidos para configuraciones de ensayo con factor de separación  $K \sim 1$ , correspondientes a las geometrías recogidas en los apartados 4.1.1, 4.1.2, y en el proyecto europeo {2}. La configuración de ensayo utilizada en el proyecto europeo corresponde a la misma descrita en el apartado 4.1.2, pero con una distancia libre en aire a 0,05 m en lugar de 0,15 m utilizada en 4.1.2.

**DISCUSIÓN – FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO PARA GRANDES DISTANCIAS DE AIRE CON CAMPOS NO HOMOGÉNEOS**

Configuración		Punta-esfera				Punta - plano							
Factor de separación K		~ 1		~ 1		1		~ 0,9		1		1	
Distancia de aire d (m)		0,05		0,15		0,55±0,05 (~ 0,5)		0,91±0,05 (~ 1)		1,92 (~ 2)		2,5	
$\bar{U}_t$ (kV)		53		128		290 ± 30		460 ± 20		1010		1320	
$E = \bar{U}_t/d$ (kV/m)		1000		853		527		505		526		528	
f (kHz)	$\beta$ (%)	5-10	10-20	10	30	10	35	10	35	5	10	25	10
	$\delta$ (%)												
35	0-5	-	-	-	-	-	0,85 ± 0,01	-	0,62 ± 0,01	-	-	0,55 ± 0,03	0,72
	20	-	-	-	-	0,93 ± 0,05	-	0,68 ± 0,01	-	-	0,54 ± 0,01	-	-
75	0-15	-	-	-	-	0,63 ± 0,03	0,75 ± 0,01	0,31 ± 0,01	-	0,29 ± 0,02	0,31 ± 0,03	-	0,33
	35	-	-	-	-	0,72 ± 0,03	-	0,29 ± 0,03	-	0,22 ± 0,01	-	-	-
180	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08
200	0-5	-	1,12										
227	10	-	-	-	0,8 ± 0,06	-	-	-	-	-	-	-	-
250	35	-	-	-	-	-	0,25 ± 0,09	-	0,15 ± 0,02	-	-	-	-
260	5	-	-	-	-	0,13 ± 0,03	-	0,15 ± 0,06	-	-	0,07 ± 0,03	-	-
	15	-	-	-	-	0,15 ± 0,01	-	0,12 ± 0,05	-	-	-	-	-
500	0-5	-	0,51										
520	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	-	-	0,58 ± 0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	5/20	0,08	-	0,25 ± 0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	0-5	0,34	-										
5000	0-5	0,09	-										

Tabla 4-8 – Tabla resumen de los resultados de ensayo para campos no homogéneos con factor de separación  $K \sim 1$ .

En la Figura 4-12 se muestran los valores de la función de la tensión de ensayo correspondientes a la Tabla 4-8, en función de la frecuencia de la sobretensión para las diferentes distancias libres en aire analizadas. Además en la figura se muestra con una línea discontinua, la curva de la función de la tensión de ensayo, establecida por la norma,  $k(f)$ .

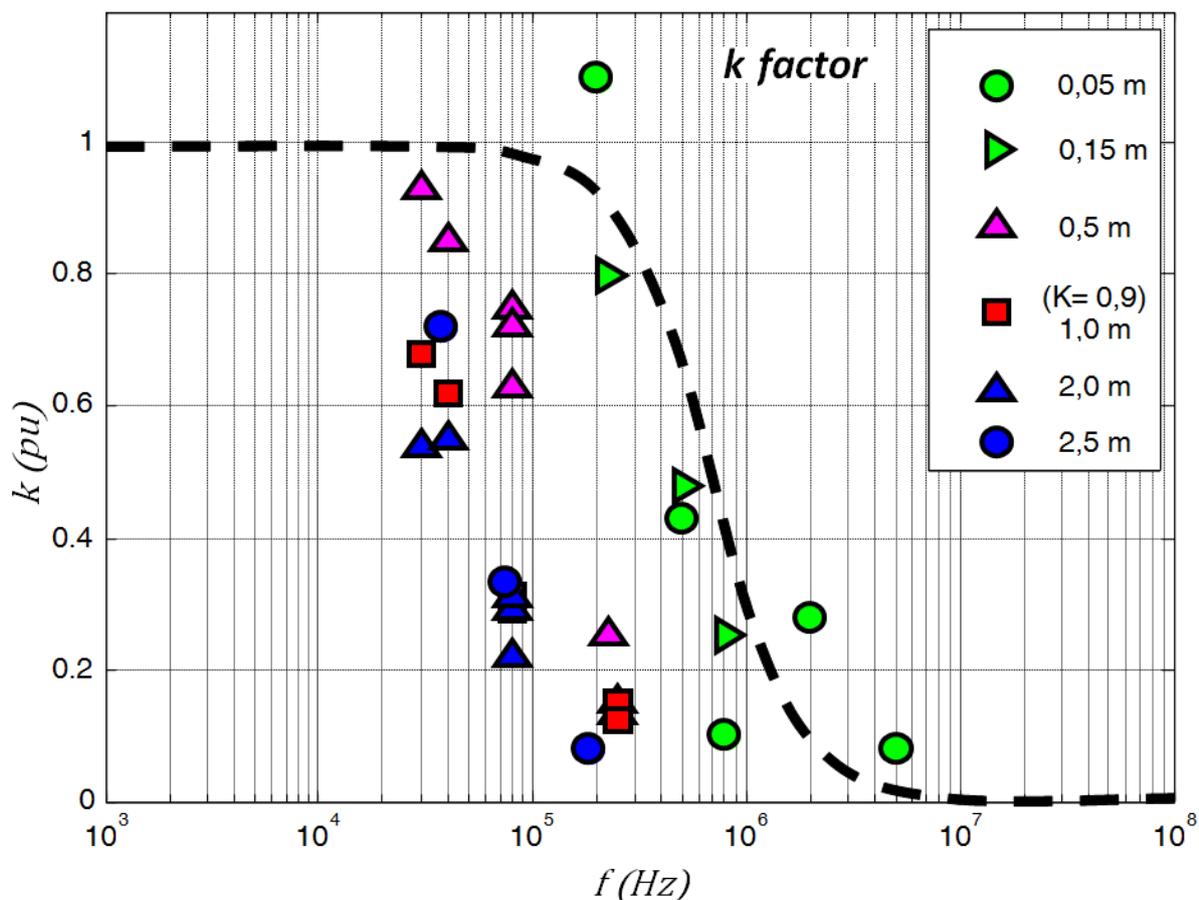


Figura 4-12 – Valores de la función de tensión de ensayo de la Tabla 4-8 en función de la frecuencia para diferentes distancias libres en aire con un factor de separación  $K \sim 1$ ; en línea discontinua la curva  $k(f)$  establecida en la norma IEC 60060-1:2010.

Analizando la Figura 4-12, se observa que los valores de la función de la tensión de ensayo  $k(f)$  disminuyen según aumentan las distancias ensayadas. Este efecto, puede expresarse por un desplazamiento de la curva  $k(f)$  hacia la izquierda al aumentar la distancia libre en aire ensayada. Consecuentemente, los valores de la función de tensión de ensayo a aplicar para la determinación de la tensión de ensayo deberían ser menores a los dados por la curva  $k(f)$  de la norma IEC 60060-1, lo que significa que para campos no homogéneos ( $K \sim 1$ ) y distancias de aire superiores a 0,15 m, la amplitud relativa de la sobretensión  $\beta'$  de un impulso oscilante afecta en menor medida al aislamiento de aire cuanto mayor sea la distancia libre en aire. Por lo tanto, una menor proporción de

la amplitud de la sobretensión debería ser considerada en la determinación de la tensión de ensayo.

Además, los resultados mostrados en la Figura 4-12, permiten afirmar que el aumento de la distancia libre en aire no produce cambios significativos de la pendiente de decrecimiento de  $k(f)$  en función de la frecuencia, ya que con la misma pendiente ( $n = 2$ ), y sin más que desplazar hacia la izquierda la curva  $k(f)$  cambiando el coeficiente  $c$  de la fórmula (4.9), es posible encontrar ajustes razonables a los resultados experimentales de la Tabla 4-8.

Determinando el coeficiente  $c$  para cada conjunto de valores de la función de la tensión de ensayo  $k(f)$ , correspondiente a una misma distancia libre en aire,  $d$ , resulta la familia de curvas mostradas en la Figura 4-13, que resultan válidas para configuraciones con factor de separación unidad o muy próximo a la unidad,  $K \sim 1$ .

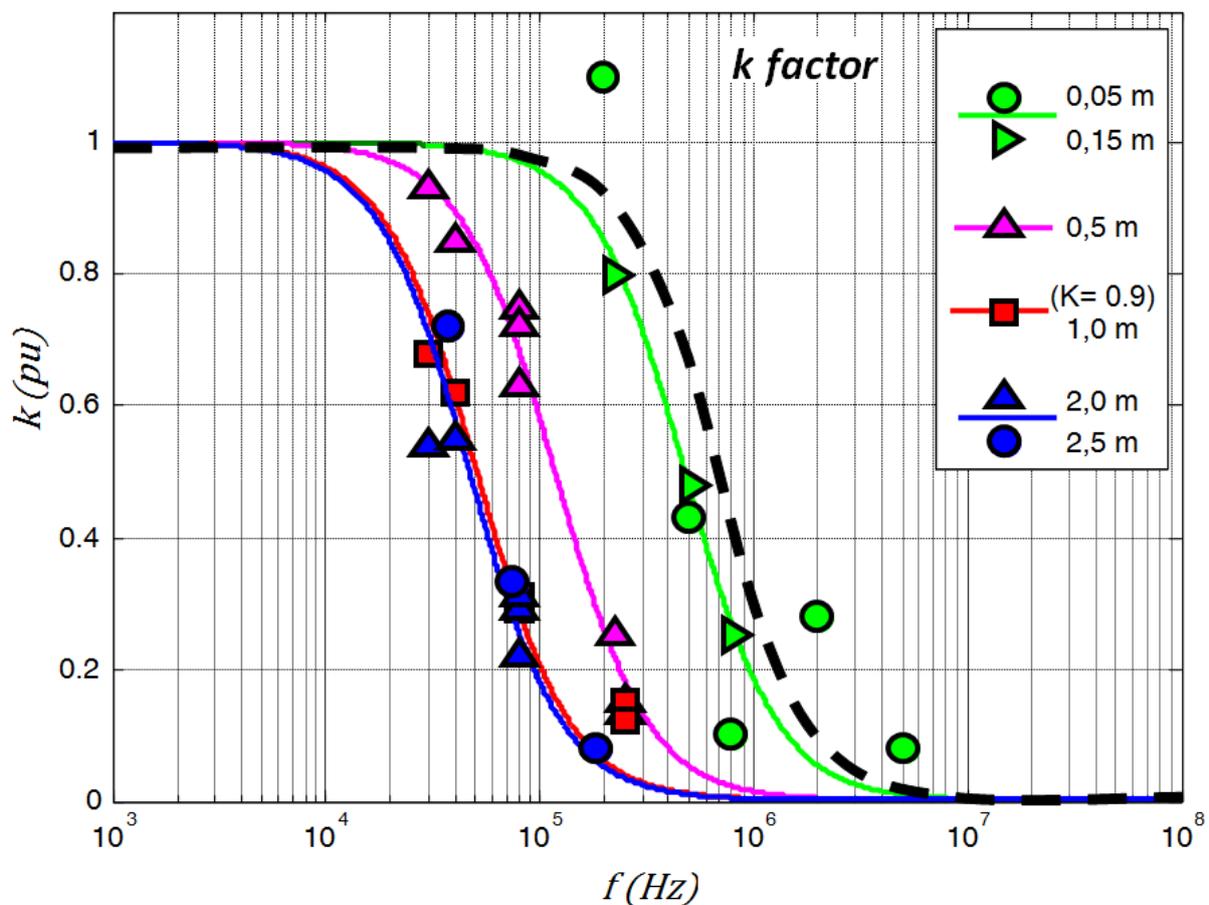


Figura 4-13 – Familia de curvas de la función de tensión de ensayo  $k$  factor para diferentes distancias de aire  $d \leq 0,15$  m;  $d = 0,5$  m;  $d = 1$  m;  $d = 2$  m y  $d = 2,5$  m con factor de separación  $K \sim 1$ .

Los valores de los coeficientes  $c$  y de las expresiones matemáticas asociadas a cada distancia ensayada se muestran en la Tabla 4-9, en la que se establece las funciones matemáticas obtenidas para las referidas distancias analizadas.

Distancia de aire ( $K \sim 1$ ) $d$ (m)	$c$	Función de tensión de ensayo $k(f)$
0,05 - 0,15	$c_i = 4,46$	$k_i(f)[d < 0,15] = \frac{1}{1 + 4,46 \cdot f^2}$
0,5	72	$k(f)[d = 0,5] = \frac{1}{1 + 72 \cdot f^2}$
1,0	386	$k(f)[d = 1,0] = \frac{1}{1 + 386 \cdot f^2}$
2,0	$c_s (K \sim 1) = 446$	$k_s(f)[d > 2,0] = \frac{1}{1 + 446 \cdot f^2}$
2,5	$c_s (K \sim 1) = 446$	

Tabla 4-9 – Expresiones de la función de tensión de ensayo ajustadas a los valores experimentales obtenidos para diferentes distancias de aire con  $K \sim 1$ .

En la Figura 4-13 puede observarse un efecto de “saturación” para ciertos valores de distancia libre en aire, tanto a partir de una distancia máxima como por debajo de una distancia mínima. En particular, el inicio de la saturación se produce a partir de una distancia de 1,0 m y para distancias superiores a 2,0 m, la función de la tensión de ensayo se mantiene sobre la misma curva, función de la tensión de ensayo saturada superior  $k_s(f)$ . Análogamente, para distancias iguales o inferiores a 0,15 m, la función de tensión de ensayo también puede aproximarse por la función de la tensión de ensayo saturada inferior  $k_i(f)$ .

La Figura 4-14 muestra las diferencias entre los valores de la función de la tensión de ensayo en función de la frecuencia obtenidos por las nuevas curvas y los valores obtenidos por la curva  $k(f)$  establecida en la norma. Para distancias de separación pequeñas ( $d \leq 0,15$  m) puede observarse que la máxima desviación de las nuevas curvas obtenidas con respecto de la curva establecida por la norma,  $k(f)$ , difiere un 0,18 p.u. para frecuencias de oscilación  $f \approx 0,6$  MHz. Éstas diferencias aumentan cuando la distancia libre en aire se incrementa, hasta la máxima diferencia de 0,86 p.u. que se obtiene para distancias libres en aire superiores a la de saturación ( $d \geq 2$  m), lo que supone un error del 8,6 % en la evaluación de la tensión de ensayo si el impulso evaluado presenta

una amplitud relativa del 10%, a una frecuencia de la sobretensión de unos 180 kHz.

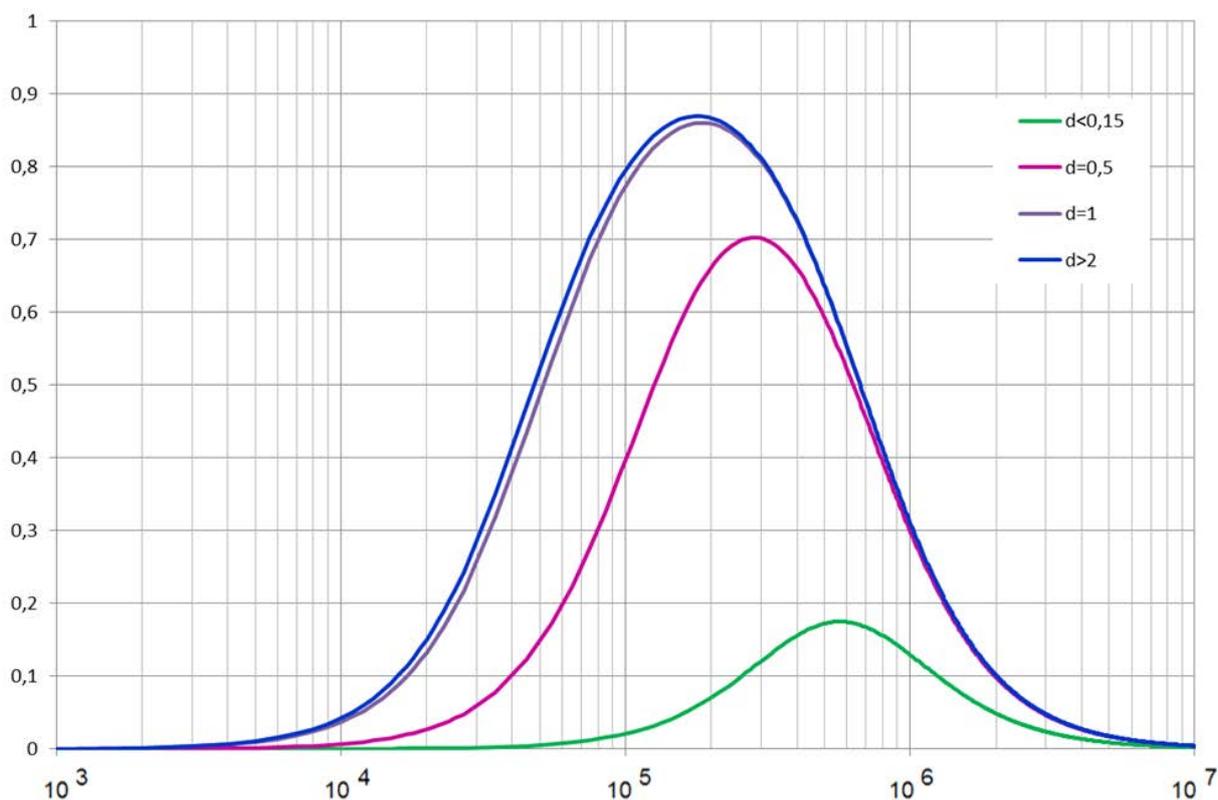


Figura 4-14 – Diferencias entre los valores de la función de tensión de ensayo en función de la frecuencia aplicando las curvas determinadas experimentalmente para diferentes distancias de aire y los valores de la función de tensión de ensayo calculados por la fórmula establecida por las normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4.

#### 4.4.2 FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENSAYO SATURADA $k_s(f)$ PARA DIFERENTES FACTORES DE SEPARACIÓN $K$

En este apartado se determinan las funciones de la tensión de ensayo saturadas superiores  $k_s(f)$  asociadas a diferentes factores de separación ( $K \sim 1$ ;  $K=1,18$ ;  $K=1,32$  y  $K=1,42$ ) teniendo en cuenta los valores experimentales de la función de la tensión de ensayo obtenidos en los ensayos del apartado 4.3.5.

En la Figura 4-15 se muestran los valores de la función de la tensión de ensayo saturada superior en función de la frecuencia,  $k_s(f)$ , para los diferentes valores de factor de separación analizados. Se sabe que los valores obtenidos corresponden a las funciones saturadas superiores  $k_s(f)$  y no a otras intermedias que no alcanzan la saturación, porque la distancia de separación libre en aire elegida para los ensayos ( $d = 1,5$  m), es claramente superior al umbral ( $d_s = 1$  m) para el cual el efecto de saturación se inicia para  $K \sim 1$ . Para un factor de separación mayor de la unidad,  $K > 1$  (campos más homogéneos que la configuración punta-plano), el efecto de saturación se inicia para distancias en aire menores de 1 m. Por lo tanto, la distancia libre en aire elegida en los ensayos de 1,5 m, asegura que los valores obtenidos corresponden a los valores de las funciones de la tensión de ensayo saturadas superiores  $k_s(f)$  asociadas a cada factor de separación  $K$ .

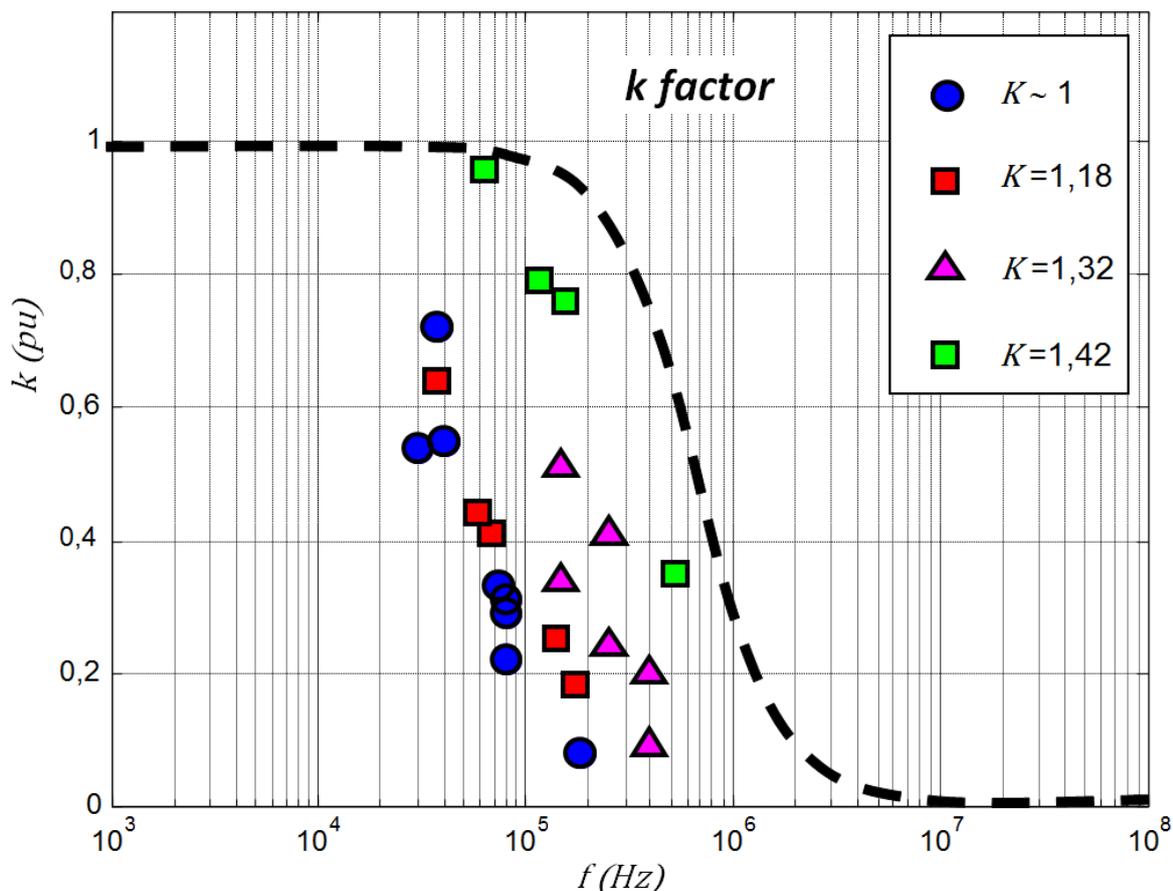


Figura 4-15 – Valores de la función de tensión de ensayo saturada superior, recogidos de la Tabla 4-8, para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ , y la curva  $k$  factor (línea discontinua), establecida por la norma IEC 60060-1.

Analizando la Figura 4-15, puede observarse un comportamiento similar al observado en el apartado 4.4.1 para  $K \sim 1$ , según el cual, cuando la distancia libre en aire disminuía, la descarga se anticipaba. También ahora cuanto más homogéneo es el campo eléctrico, el proceso de descarga es más rápido y por lo tanto la curva se desplaza, de igual manera que con distancias cortas, hacia la derecha. Por lo tanto, para un mismo valor de frecuencia de la sobretensión,  $f$ , los valores de la función de tensión de ensayo  $k_s(f)$ , aumentan cuanto más homogéneo es el campo eléctrico.

Este aspecto queda corroborado por el hecho de que la función de la tensión de ensayo contemplada en las nuevas normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4, representa el comportamiento de las configuraciones de campo homogéneo, ya que la gran mayoría de los ensayos fueron realizados para campo homogéneo {44}.

Utilizando la función matemática (4.9), es posible determinar el coeficiente  $c_s$  asociado a cada factor de separación  $K$  analizado ( $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ ) que mejor se ajusta a los resultados de los ensayos. Los coeficientes  $c_s$  y las expresiones matemáticas de las funciones de tensión de ensayo saturadas superiores,  $k_s(f)$ , que mejor se ajustan a los valores experimentales para diferentes factores de separación  $K$  analizados, se muestran en la Tabla 4-10, que corresponden a las funciones de la tensión de ensayo representadas en la Figura 4-16.

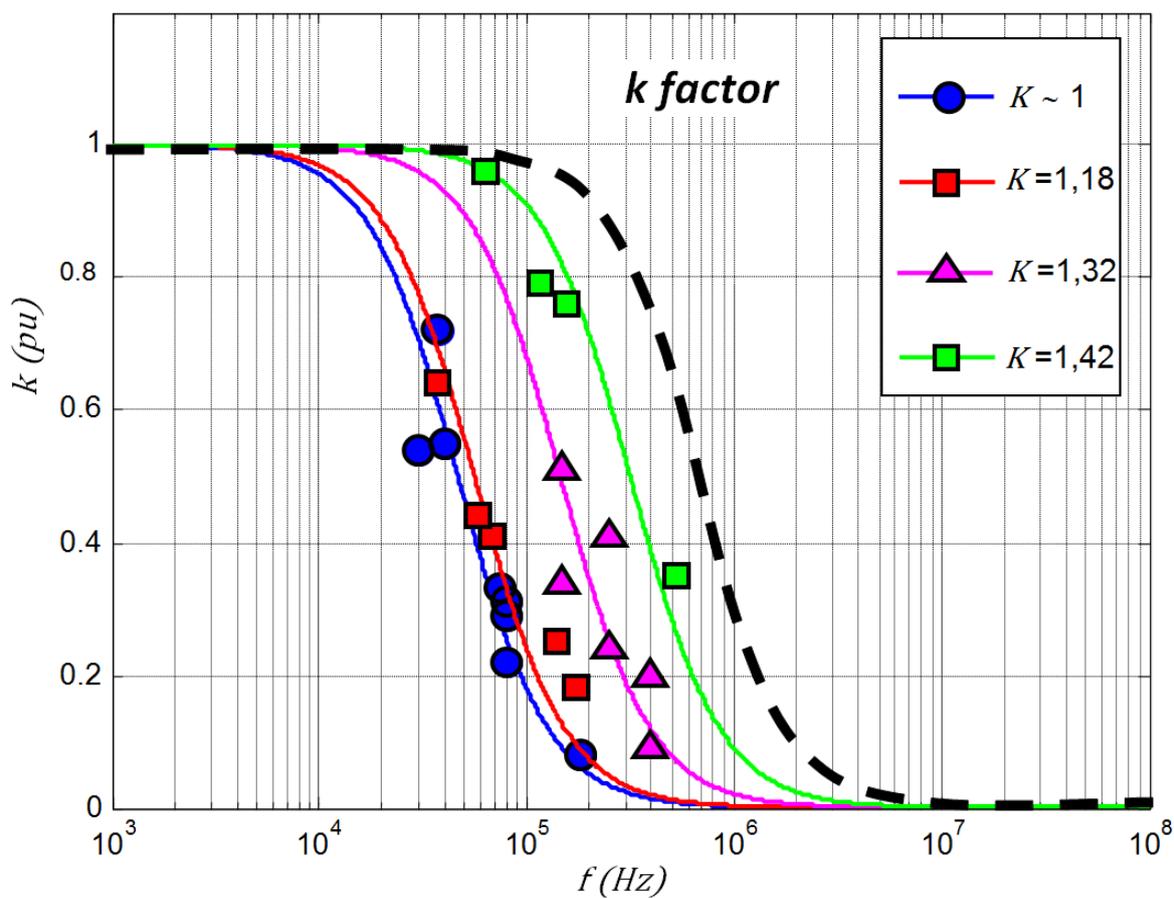


Figura 4-16 - Familia de curvas de la función de tensión de ensayo  $k(f)$  para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ , y la curva  $k$  factor, establecida por la norma IEC 60060-1.

Factor de separación $K$	$c_s(K)$	Función de tensión de ensayo saturada superior $k_s(f)$
$0,9 \div 1$	446	$k_s(f)[K \sim 1] = \frac{1}{1 + 446 \cdot f^2}$
1,18	316	$k_s(f)[K = 1,18] = \frac{1}{1 + 316 \cdot f^2}$
1,32	47	$k_s(f)[K = 1,32] = \frac{1}{1 + 47 \cdot f^2}$
1,42	10	$k_s(f)[K = 1,42] = \frac{1}{1 + 10 \cdot f^2}$

Tabla 4-10 - Expresión de la función de tensión de ensayo que se ajustan a los valores experimentales obtenidos para diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

También se observa una fuerte discrepancia entre los valores dados para la función de tensión de ensayo de la norma,  $k(f)$ , denominado *k factor* y los valores obtenidos de los ensayos. Debe indicarse que la curva  $k(f)$  establecida en la norma se corresponde de forma muy próxima con la función de la tensión de ensayo de campo cuasi-homogéneo (esfera-esfera) para aire.

En la Figura 4-17, se muestra gráficamente las diferencias entre los valores de las funciones de tensión de ensayo obtenidos por las nuevas curvas saturadas superiores  $k_s(f)$  y el valor de la función de la tensión de ensayo  $k(f)$  establecida en las normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4.

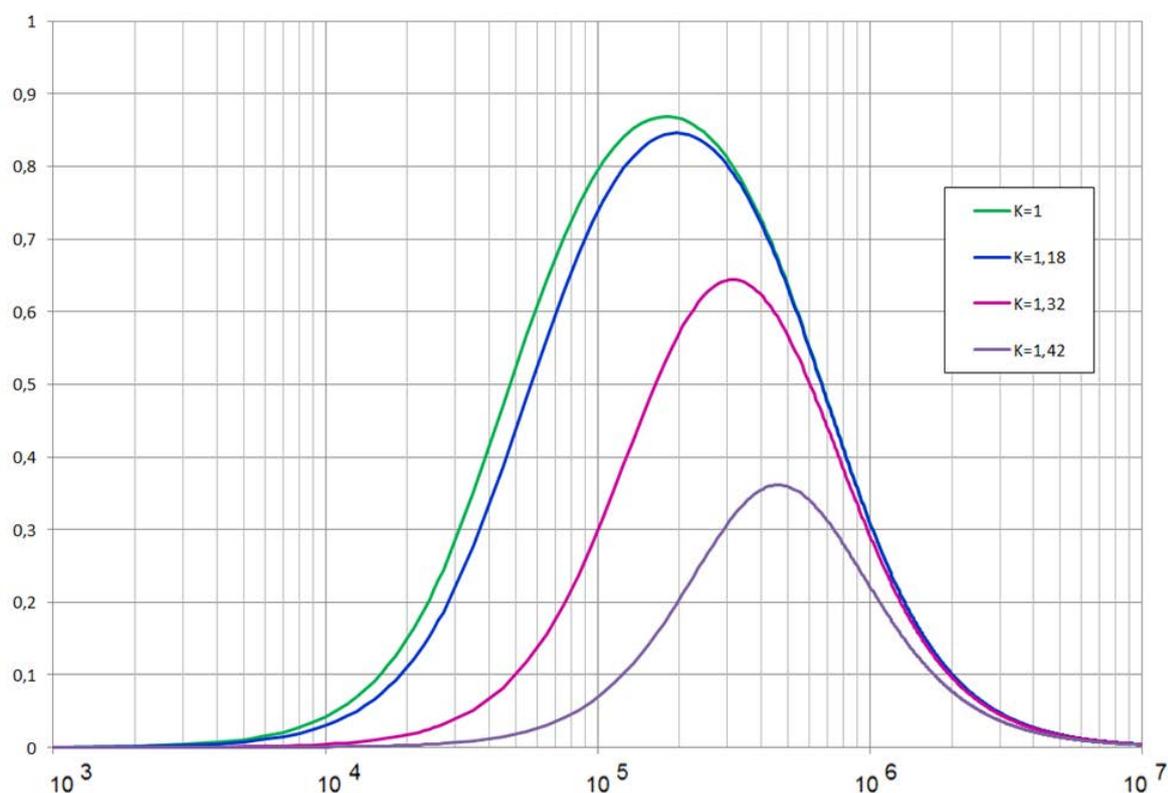


Figura 4-17 – Diferencias entre los valores de la función de tensión de ensayo en función de la frecuencia de la sobretensión aplicando las curvas de la función de tensión de ensayo saturadas superiores  $k_s(f)$  y los valores de la función de tensión de ensayo de la norma  $k(f)$ , para diferentes valores de factor de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

Para el valor más elevado del factor de separación utilizado en los ensayos  $K = 1,42$ , la discrepancia fue de  $0,36 p.u.$  que correspondió a una frecuencia de la sobretensión de aproximadamente,  $f \approx 0,45 MHz$ . Esta discrepancia se acentúa según el campo eléctrico se hace menos homogéneo, hasta la máxima, que se obtiene para un factor de separación de valor unidad,  $K \sim 1$ , en donde la diferencia alcanza el valor de  $0,86 p.u.$ , para una frecuencia de sobretensión de unos 180 kHz. Como ya se indicó en el apartado anterior, esta discrepancia supone un error del 8,6 % en la evaluación de la tensión de ensayo de un impulso, cuando la frecuencia de la sobretensión es del 180 kHz y la sobretensión relativa del 10%.

#### 4.5 GENERALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TENSIÓN DE ENSAYO

Teniendo presente los resultados obtenidos de la función de la tensión de ensayo para diferentes distancias libres en aire,  $d$ , y factores de separación,  $K$ , se ha demostrado que conforme aumenta la distancia libre en aire o el campo es menos homogéneo, la función de la tensión de ensayo,  $k(f)$ , la transición de 1 a 0 a frecuencias inferiores, la curva se desplaza hacia la izquierda (véase Figura 4-18).

Cuando las distancias de aislamiento son mayores a las consideradas en la norma IEC 60060-1 o el campo es fuertemente in homogéneo, el mecanismo de la descarga se hace más lento, es decir, la descarga se produce más avanzada la cola del impulso, lo que se traduce en un desplazamiento de la curva de la función de tensión de ensayo,  $k(f)$ , hacia la izquierda. Por el contrario, para distancias libres en aire cortas o campos eléctricos más homogéneos, el proceso de la descarga es más rápido (tiempos de cebado más próximos a la cresta), lo que supone el desplazamiento de la curva  $k(f)$  hacia la derecha.

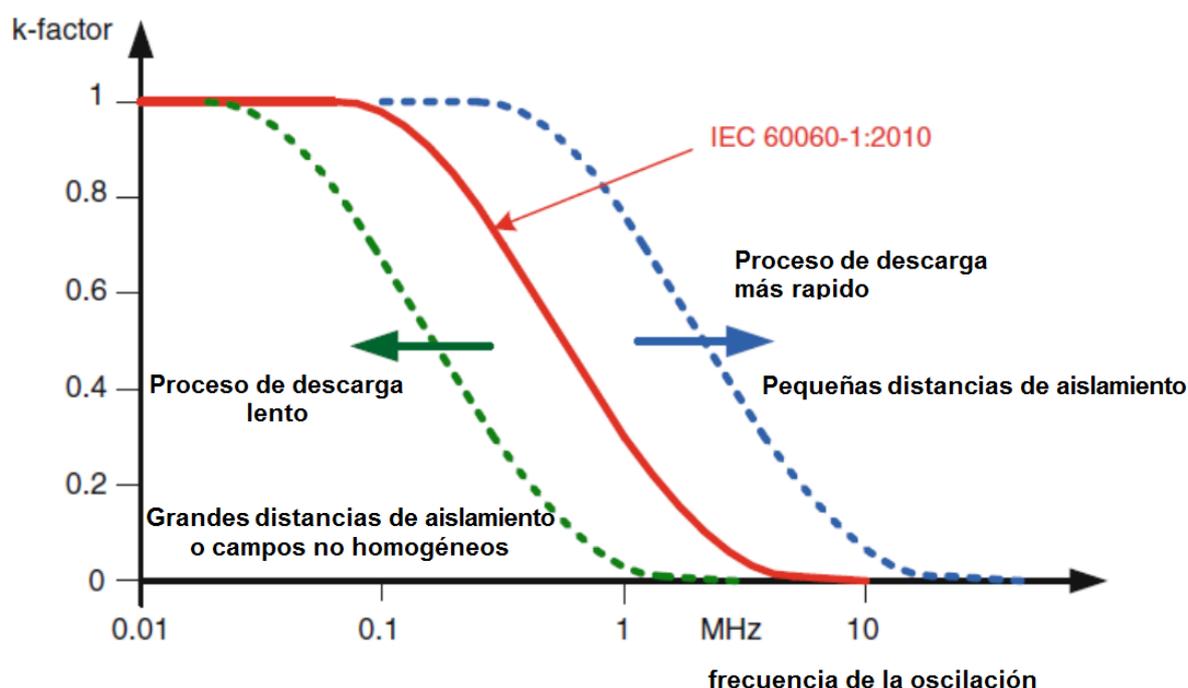


Figura 4-18 – Representación del desplazamiento de las curvas de la función de tensión de ensayo tomada de la referencia {16} cuando las configuraciones ensayadas varían de las consideradas en las normas IEC 60060-1 e IEEE Std 4.

Cabe indicar que la función de tensión de ensayo, curva  $k(f)$ , establecida en la norma, es muy próxima a la correspondiente a campos homogéneos (donde el corte se produce en la cresta) por lo que un desplazamiento de la curva más hacia a la derecha correspondería a impulsos cortados en el frente, cuyos valores experimentales serán motivo de futuras investigaciones.

Los ensayos realizados han demostrado que la función de la tensión de ensayo para distancias libres en aire con campo no homogéneo depende, no sólo de la frecuencia de oscilación  $f$ , como justifica la norma IEC 60060-1, sino también de la distancia libre en aire,  $d$ , y del factor de separación  $K$ , es decir,  $k = k\{f, d, K\}$ .

Consecuentemente, teniendo presente las expresiones deducidas de la función de la tensión de ensayo en el apartado 4.4, puede expresarse una función genérica de la tensión de ensayo, mediante la siguiente ecuación:

$$k\{f, d_{p.u.}, K\} = \frac{1}{1 + c\{d_{p.u.}, K\} \cdot f^2} \quad (4.10)$$

donde:

- $f$ : frecuencia de la sobretensión.
- $c\{d_{p.u.}, K\}$ : parámetro dependiente del valor normalizado de la distancia libre en aire  $d_{p.u.}$  y del factor de separación,  $K$ .

La distancia normalizada  $d_{p.u.}$ , se expresa de la siguiente forma:

$$d_{p.u.} = \frac{d - d_i}{d_{is} - d_i} \quad (4.11)$$

donde:

- $d$ : distancia libre en aire entre dos electrodos, expresada en metros.
- $d_i$ : distancia libre en aire  $d$ , para la que se cumple que el parámetro  $c\{d_{p.u.}, K\} = c_i = 4,46$  de la saturación inferior
- $d_{is}$ : distancia de saturación donde se inicia el efecto de saturación superior:  $c(d=d_{is}) \sim 0,865 p.u.$

La distancia normalizada  $d_{p.u.}$ , se utiliza para tener en cuenta, de forma genérica, el efecto de variación de la distancia libre en aire,  $d$ , para cualquier factor de separación  $K$ , considerando que la variación demostrada para el factor de separación próximo a la unidad ( $K \sim 1$ ), afecta de la misma manera para otros factores de separación. Esto significa que, para distancias inferiores a un cierto valor  $d_i$  ( $d_{p.u.} = 0$ ), el coeficiente  $c$  se saturará a un valor inferior  $c_i = 4,46$ , valor muy próximo al coeficiente dado por la norma IEC 60060-1, que es de  $c = 2,2$  y para distancias superiores a una cierta distancia de saturación  $d \geq d_s$  (que

---

corresponde a valores  $d_{p.u.} \geq 2$ ), el coeficiente  $c$  alcanzará el valor de saturación superior  $c_s\{K\}$  dependiente de  $K$ , según se determinó en apartado 4.4.2 (véase la Tabla 4-10). Los valores de las distancias  $d_i$  y  $d_s$  para los diferentes factores de separación  $K$ , serán objeto de investigaciones futuras, debiendo ser determinados análogamente a como se desarrolló en el apartado 4.4.1 para el factor de separación  $K \sim 1$

El coeficiente  $c\{d_{p.u.}, K\}$  puede expresarse por dos sumandos, uno que corresponde con el valor mínimo de saturación  $c_0$  y el otro que corresponde con el efecto combinado de la distancia libre en aire y el factor de separación expresado como producto de factores  $c_s^*\{K\}$  y de la distancia de aire de la configuración considerada  $c_s\{d_{p.u.}\}$ :

$$c\{d_{p.u.}, K\} = c_0 + c_s^*\{K\} \cdot c_s\{d_{p.u.}\} \quad (4.12)$$

de forma que para distancias superiores a  $d_s$ , se cumple:  $c_s\{d_{p.u.}\} = 1$ , quedando la expresión (4.12), de la siguiente forma:

$$c\{K\} = c_0 + c_s^*\{K\} \quad (4.13)$$

En el caso particular de campo no homogéneo  $K \sim 1$ , se conocen los valores experimentales siguientes:

- $c_0 = 4,46$
- $d_i = 0,15$  m
- $d_{is} = 1$  m
- $d_s = 2$  m

Teniendo en cuenta los valores de los coeficientes  $c\{d_{p.u.}, K\}$  de la función de la tensión de ensayo determinados mediante ajuste de las curvas a los valores obtenidos experimentalmente según los apartados 4.4.1 y 4.4.2 y cuyos valores se expresan en la Tabla 4-9 y Tabla 4-10, respectivamente, se pueden determinar las expresiones matemáticas de los factores  $c_s^*\{K\}$  y  $c_s\{d_{p.u.}\}$ , que logran el mejor ajuste, resultando las siguientes expresiones:

$$c_s\{d_{p.u.}\} = 1 - e^{-2d_{p.u.}^{2,78}} \quad (4.14)$$

$$c_s^*\{K\} = \frac{442,5}{1 + 4,15 \cdot 10^{-3} \cdot K^{27,9}} \quad (4.15)$$

Gráficamente, en la Figura 4-19 se representa el ajuste a los coeficientes calculados en el apartado 4.4.1 y la Tabla 4-9 realizado por la fórmula (4.14) y en la Figura 4-20, el ajuste realizado por la fórmula (4.15) a los coeficientes calculados en el apartado 4.4.2 y la Tabla 4-10

Considerando que el valor de  $c_0$  es 4,46 para el caso de campos no homogéneos ( $K \sim 1$ ), que es cuando se produce la saturación inferior y sustituyendo las expresiones (4.15) y (4.14) en la ecuación (4.12), resulta el coeficiente propuesto para el cálculo de la función de tensión de ensayo:

$$c\{d_{p.u.}, K\} = 4,46 + \frac{442,5}{1 + 4,15 \cdot 10^{-3} \cdot K^{27,9}} \left[ 1 - e^{-2d_{p.u.}^{2,78}} \right] \quad (4.16)$$

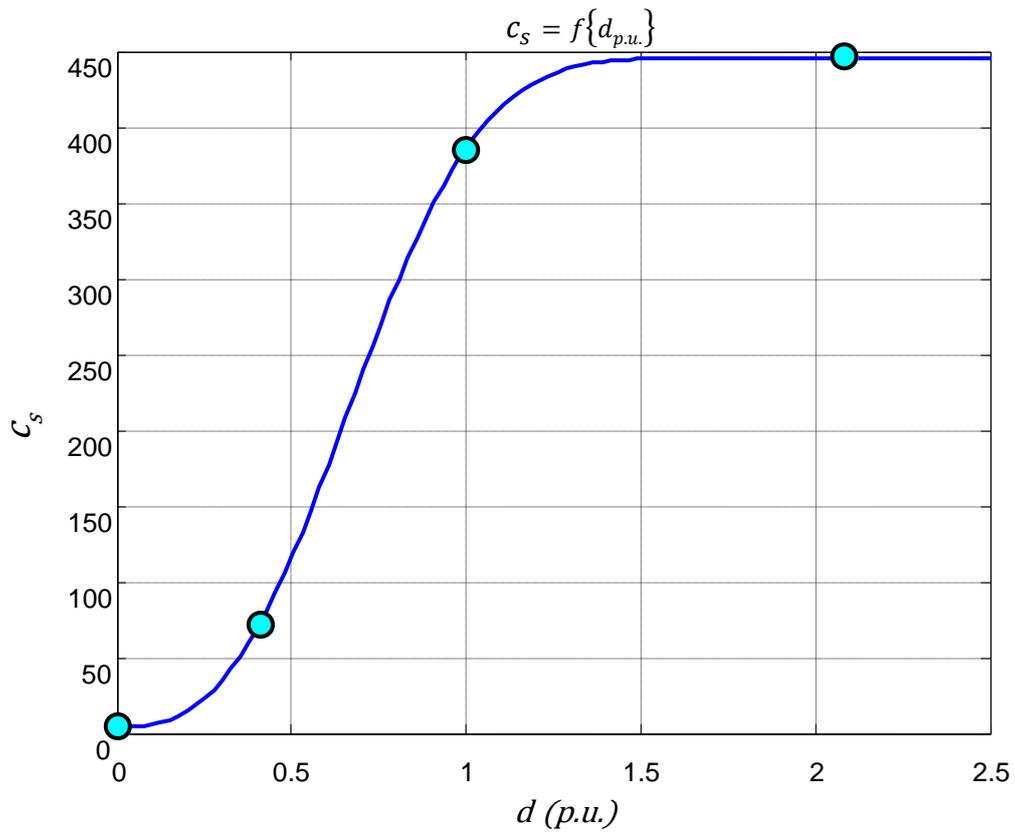


Figura 4-19 –Ajuste de la ecuación (4.14) asociada al parámetro  $c_s$  que se deriva de la Figura 4-13 para diferentes distancias libre de aire

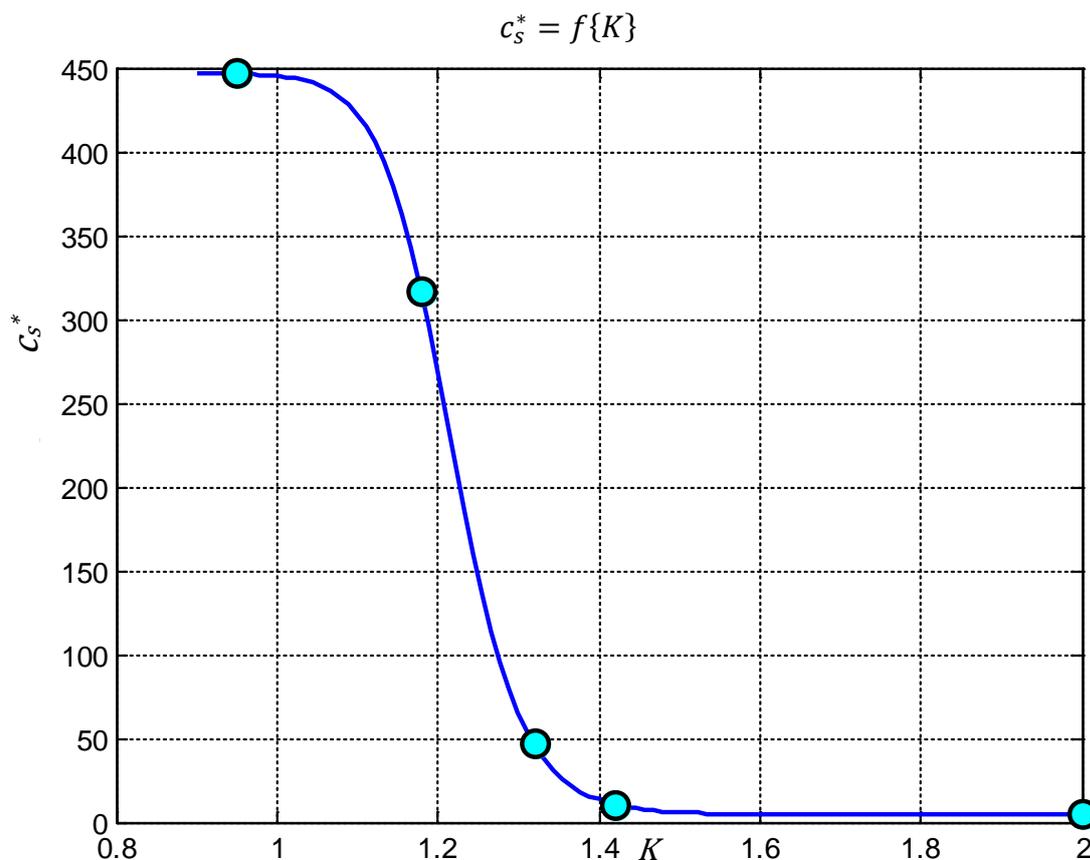


Figura 4-20 - Ajuste de la ecuación (4.15) asociada al parámetro  $c_s^*$  que se deriva de la Figura 4-16 para los diferentes factores de separación  $K \sim 1$ ;  $K = 1,18$ ;  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ .

En la Figura 4-21 se muestran varias familias de curvas de las funciones de la tensión de ensayo derivadas de la ecuación (4.16) para diferentes distancias libre en aire y para factores de separación comprendidos entre  $K=1$  y  $K=2$ .

Analizando las representaciones gráficas de estas curvas se deduce que, a medida que el factor de separación de la configuración de ensayo es mayor, es decir, el campo es más homogéneo, la componente del coeficiente  $c\{d_{p.u.}, K\}$  dependiente de la distancia tiene menos importancia, siendo el factor de separación  $K$  el que define el valor del coeficiente  $c$ . Por el contrario, cuando la configuración a ensayar presenta

un factor próximo a la unidad ( $K \sim 1$ ) la función de la tensión de ensayo, depende fuertemente de la distancia, saturándose para distancias grandes. ( $d \geq 2$  m).

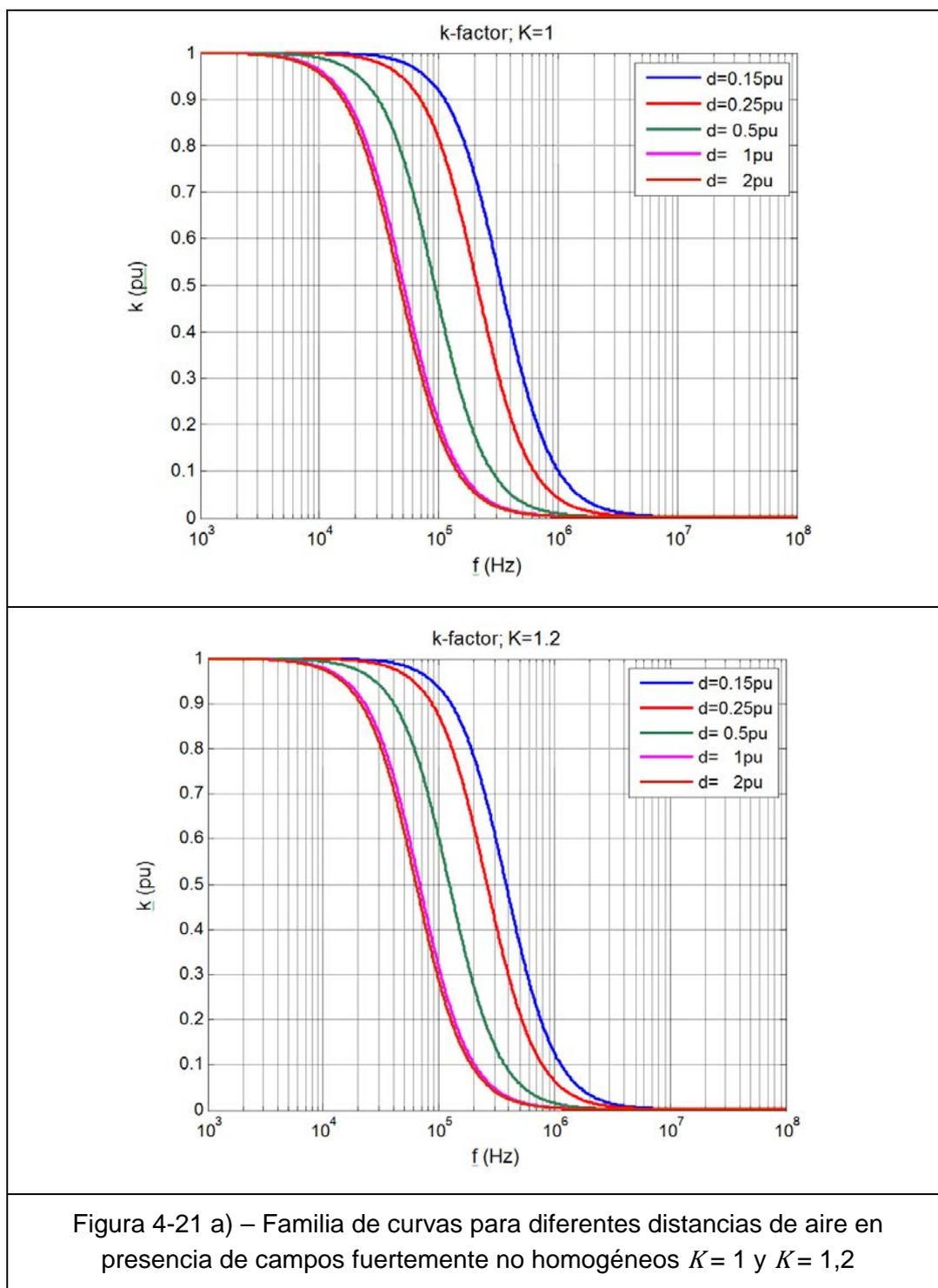
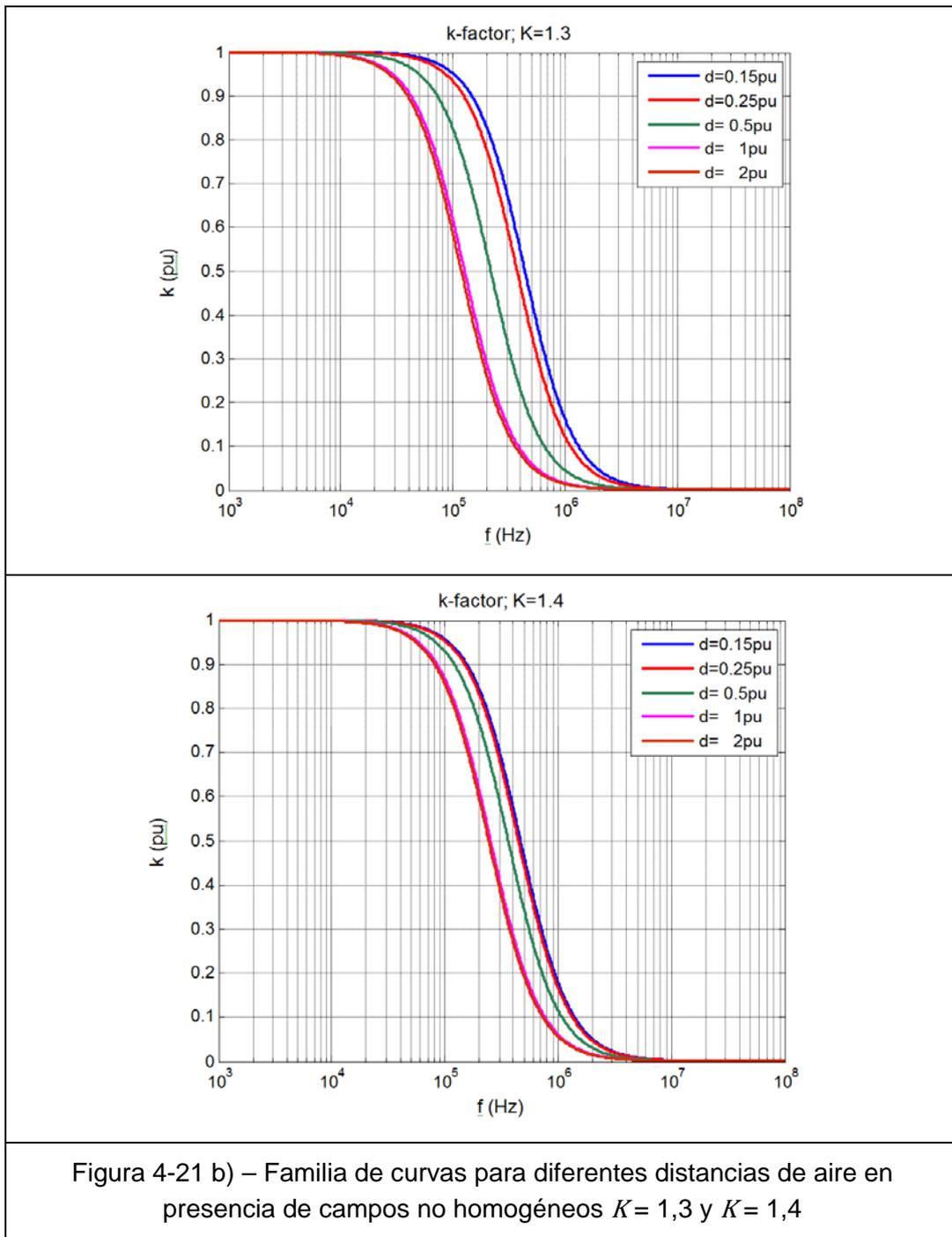
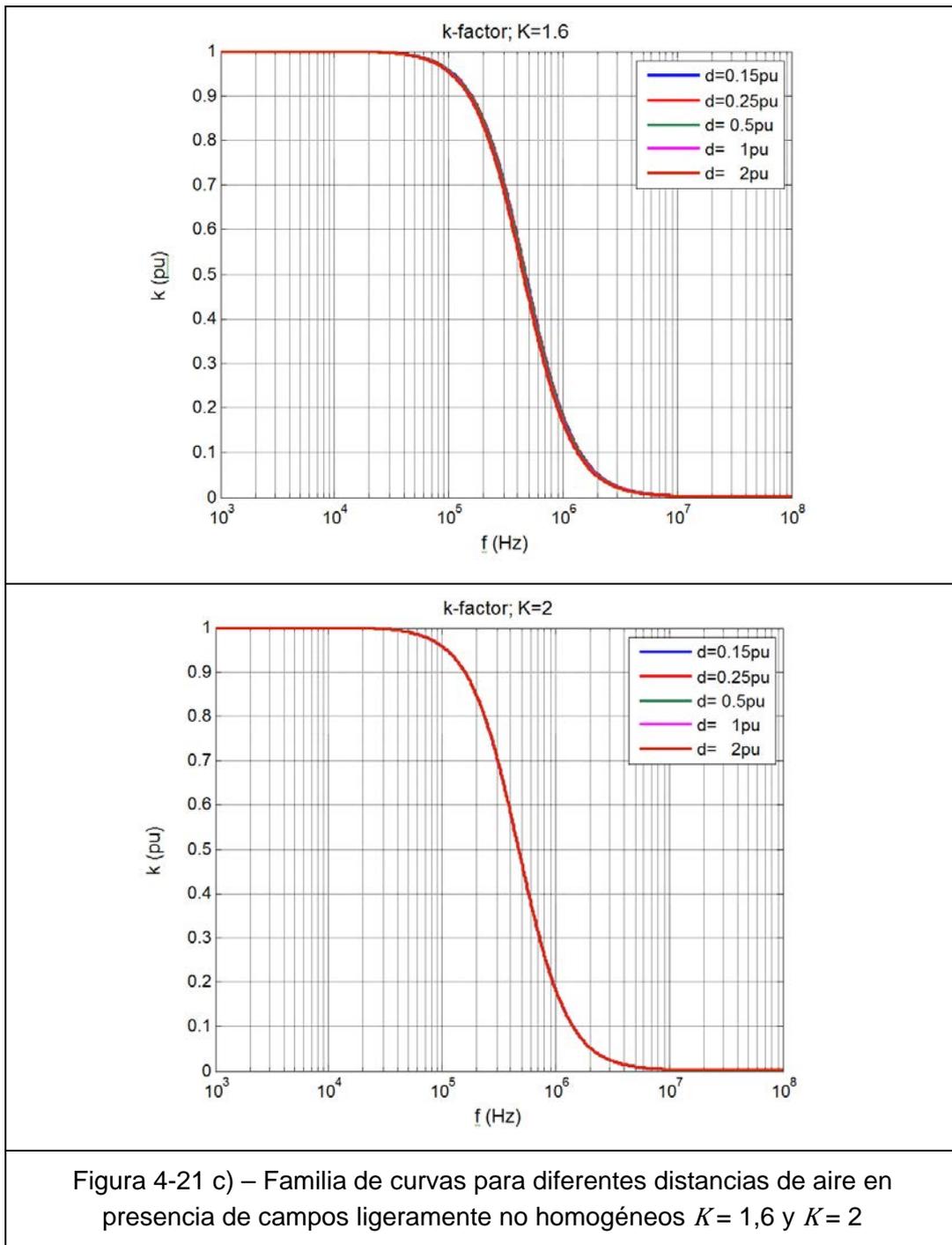


Figura 4-21 a) – Familia de curvas para diferentes distancias de aire en presencia de campos fuertemente no homogéneos  $K = 1$  y  $K = 1,2$







## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

---

### 5 CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

#### 5.1 CONCLUSIONES

La función de la tensión de ensayo, *k factor*, establecida en la actual edición de la norma IEC 60060-1 para los ensayos de tensión soportada a impulsos tipo rayo con oscilaciones superpuestas en la cresta, presenta una transición gradual de 1 a 0, en función únicamente de la frecuencia de las oscilaciones. La norma considera que esta expresión es aplicable de forma generalizada, a todos los tipos de aislamientos (aire, XLPE, aceite, papel-aceite, SF6, etc.) sin tener en consideración la configuración de campo eléctrico del aislamiento, ni la distancia de separación o el espesor del aislamiento.

Los resultados experimentales obtenidos en la presente tesis han demostrado que, para el caso aislamiento de aire con distancias libres superiores a 0,5 m en configuraciones de campo eléctrico no homogéneo, la transición gradual de la función de la tensión de ensayo obedece a otros parámetros de influencia, además de la frecuencia de la sobretensión. Las discrepancias encontradas entre los resultados

obtenidos aplicando la fórmula considerada en la norma con los obtenidos experimentalmente mediante ensayos, son tanto mayores, cuanto mayor es la no homogeneidad del campo eléctrico y mayor es la distancia libre disruptiva en aire.

Al aplicar la norma actual, pueden obtenerse valores de tensiones soportadas erróneos derivados de evaluar la tensión de ensayo en un aislamiento de aire sometido a un campo eléctrico no homogéneo con distancias libres superiores a 0,5 m. Este puede ser el caso de un seccionador que hubiese sido ensayado en laboratorio con impulsos tipo rayo con amplitudes relativas de oscilaciones superpuestas en la cresta del 10%. El valor realmente soportado a impulsos tipo rayo lisos podría resultar hasta un 8,6 % inferior al valor obtenido al aplicar el valor indicado por la norma, si la distancia libre hubiera sido igual o superior a 2 m y la frecuencia de la oscilación fuese de unos 180 kHz. Consecuentemente, el ensayo sería menos exigente de lo requerido por la normativa, pudiendo llegar a aprobar equipos con una tensión soportada inferior al valor exigido, de forma que los criterios de coordinación de aislamiento establecidos en los reglamentos específicos de las instalaciones, se verían comprometidos y la fiabilidad de las redes eléctricas con aislamiento en aire sería cuestionada.

Además, se ha comprobado que la amplitud o el amortiguamiento de las oscilaciones tienen cierta influencia en la función de la tensión de ensayo, que resulta tanto más acusada cuanto mayor es la amplitud relativa o mayor es el amortiguamiento de las sobretensiones. Por consiguiente, resulta necesario limitar el valor máximo admisible de la amplitud y del amortiguamiento de las sobretensiones para que la función de la tensión de ensayo pueda ser aplicable.

Se formula una nueva expresión generalizada de la función de tensión de ensayo para aislamiento de aire con campo no homogéneo y distancias de varios metros ( $d \leq 3$  m), a través de una expresión matemática  $k\{f, d, K\}$ , que tiene en cuenta la distancia libre en aire,  $d$ , el factor de separación normalizado,  $K$ , y la frecuencia de la sobretensión,  $f$ .

Otro importante problema y causa de discrepancia de resultados en estudios efectuados por diferentes laboratorios de institutos y centros de investigación, para la determinación de valores de la función de la tensión de ensayo, ha sido la dispersión de los resultados, incluso aunque hayan sido realizados por el mismo laboratorio, en días diferentes. Con el fin de lograr resultados reproducibles, es fundamental definir un procedimiento sistemático, fiable y robusto que tenga en cuenta y minimice los parámetros de influencia del resultado.

Por tal motivo, se ha propuesto un nuevo procedimiento experimental para determinar valores de la función de la tensión de ensayo, aplicable a distancias libres en aire superiores a 0,5 m y cualquier configuración de campo eléctrico a ensayar, basados en resultados de los ensayos. El procedimiento requiere el uso de métodos de evaluación estadística adecuados en cada caso. El método de los niveles múltiples es aplicable para aquellas configuraciones con campo no homogéneo, en los que la descarga se produce después de la cresta del impulso. Al producirse el cebado varios microsegundos después de la cresta, es posible determinar, para los impulsos cortados, el valor extremo de la curva base,  $U_b$ , de cada uno de los impulsos aplicados en cada nivel de tensión. No así para las configuraciones de campo uniforme, en las que la descarga se produce en la cresta del impulso, siendo imposible determinar el valor de extremo de la curva base y, por lo tanto, inviable evaluar el valor de  $U_b$ , en los niveles con alta probabilidad de cebado. En tales casos es necesario recurrir al método de subidas y bajadas de tensión para determinar el nivel de 50% de probabilidad,  $U_{50}$ . Aunque sólo podrá ser determinado el valor de  $U_b$ , para la mitad de los impulsos aplicados (los impulsos plenos que no produjeron descarga disruptiva), el método incluye una corrección del resultado para tener en cuenta la influencia de los impulsos cortados.

Otro factor de influencia detectado y resuelto por el procedimiento propuesto, es la inexactitud, para los ensayos con impulsos oscilantes, de aplicar las correcciones atmosféricas definidas en la norma IEC 60061-1. El procedimiento propuesto tiene presente que la corrección de la tensión de ensayo en función de las condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad establecido por la IEC 60060-1, es aplicable únicamente a impulsos lisos y no a impulsos con oscilaciones

---

superpuestas en la cresta. Por tal motivo, en los ensayos a realizar para determinar la función de la tensión de ensayo, no se deben aplicar ninguna corrección atmosférica a los impulsos oscilantes, sino que deben corregirse sólo los valores de las tensiones extremas correspondientes a los impulsos lisos, para referirlas a las condiciones ambientales locales existentes durante el ensayo con impulsos oscilantes. Adicionalmente, se limitan las variaciones máximas admisibles de presión, humedad y temperatura ambientales en los tres conjuntos de ensayos requeridos para determinar un valor experimental de la función de la tensión de ensayo.

Asimismo, el procedimiento propuesto permite, mediante el análisis de los niveles múltiples, determinar la función de probabilidad para cada valor de la función de la tensión de ensayo, en función de la tensión aplicada. El procedimiento que proporciona la función de probabilidad al aplicar los múltiples niveles de tensión para determinar el valor experimental de la función de la tensión de ensayo, es mucho más robusto que determinar el valor experimental a través de un sólo nivel de probabilidad.

En los ensayos y análisis realizados en la presente tesis, se ha evidenciado que el método propuesto por la norma IEC 60060-1 para calcular la curva base, consistente en buscar la curva diferencia de dos funciones exponenciales que mejor se ajuste a los datos del impulso registrado entre los instantes en que se alcanza en el frente, el 20% del valor extremo  $U_e$ , y en el que disminuye en la cola, por debajo del 40% de  $U_e$ , resulta inexacto. Otras publicaciones también evidenciaron este error [OKABE {37} & UETA {47}]. Las imprecisiones de la norma pueden ser obviadas si se reducen ambos niveles al 10% de  $U_e$ . Los resultados aplicando el procedimiento de la norma conducen a valores de la tensión extrema de la curva base,  $U_b$ , superiores a los obtenidos en los ensayos. La demostración de estos errores pudo realizarse experimentalmente, gracias al uso de la instalación de ensayo con dos generadores, en la que uno de ellos directamente genera la tensión extrema base,  $U_{b\ ref}$ , y por lo tanto es la referencia de la comparación con el valor  $U_b$ , obtenido al aplicar cualquier procedimiento a la onda superpuesta de los dos generadores.

El nuevo procedimiento experimental propuesto permite seguir un método sistemático y estructurado de forma que se mejora la consistencia de los resultados obtenidos, permitiendo alcanzar una incertidumbre expandida mejor del 0,05 p.u., lo que redundará en una mejor reproducibilidad de los ensayos realizados en diferentes laboratorios.

Por último, los ensayos e investigaciones desarrolladas en la presente tesis, ha evidenciado que la relación que liga el factor de separación,  $K$ , obtenido como relación entre tensiones de impulso tipo maniobra en dos configuraciones de campo eléctrico y el factor de separación frente a impulsos de frente rápido (tipo rayo) de polaridad positiva,  $K_{ff}^+$ , establecida en la norma IEC 60071-2, no es aplicable con plena generalidad. Esta circunstancia ha sido evidenciada en el desarrollo de los ensayos experimentales y ha sido soslayada mediante la determinación de la relación específica entre ambos factores,  $K$  y  $K_{ff}^+$ , aplicable a los ensayos realizados para distancias libres de algunos pocos metros. Esta evidencia abre una línea de investigación entre la verdadera relación de las tensiones disruptivas frente a impulsos rápidos y lentos.

## 5.2 APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS

Las contribuciones originales más importantes de esta tesis han sido las siguientes:

- La elaboración de un nuevo procedimiento que permite realizar, de una forma sistemática y reproducible, el cálculo de valores experimentales de la función de la tensión de ensayo para diferentes configuraciones, a través de los siguientes aportaciones:
  - a) aplicar el método de los niveles múltiples, para determinar las funciones de probabilidad de descarga a impulsos lisos e impulsos oscilantes,
  - b) mitigar los errores al utilizar las correcciones de tensión con las condiciones atmosféricas sólo para los impulsos lisos y no para los impulsos son oscilaciones superpuestas.

- c) establecer los requisitos de los generadores de ensayo (instalación de un generador 1G e instalación de dos generadores 2G) necesarios para generar las formas de onda requeridas para determinar las funciones de la tensión de ensayo.
  - d) establecer los requisitos de los sistemas de medida de la tensión generada por cada generador de ensayo.
  - e) reducir los errores en la determinación del valor extremo de la curva base ampliando el rango de ajuste de los datos obtenidos del valor extremo, desde el 20% en el frente hasta 40% en la cola por el rango ampliado que contiene valores desde el 10% en el frente del impulso hasta el 10% en la cola.
- Propuesta de una nueva función de tensión de ensayo,  $k(f, d, K)$ , que de forma generalizada tenga en consideración, además de la frecuencia de la sobretensión,  $f$ , la distancia libre de aire,  $d$  y la no homogeneidad del campo a través del factor de separación,  $K$ , de las configuraciones ensayadas, que se concreta a través de las siguientes aportaciones:
    - a) determinación de valores experimentales de la función de la tensión de ensayo para distancias libres en aire con campo eléctrico no homogéneo ( $K \sim 1$ ) de 0,15 m, 0,5 m, 0,91 m, 1,92 m, y 2,5 m.
    - b) determinación de valores experimentales de la función de la tensión de ensayo para campos no homogéneos con diferentes valores de no homogeneidad, expresados por los factores de separación ( $K \sim 1$ ,  $K = 1,18$ ,  $K = 1,32$  y  $K = 1,42$ ).
    - c) evaluación de los límites de variación máximos admisibles de la amplitud relativa,  $\beta'$  y del amortiguamiento  $\delta$  de la sobretensión, correspondientes a impulsos con oscilaciones superpuestas en la cresta.
    - d) determinación de los coeficientes de las funciones de la tensión de ensayo asociadas a los valores experimentales de la función de tensión de ensayo, correspondientes a la variación con la distancia,  $d$ , y con el factor de separación,  $K$ .

- e) evaluación del desplazamiento de la función de la tensión de ensayo hacia frecuencias más bajas, para mayores distancias libres en aire y campos menos homogéneos.
  - f) establecimiento de la función matemática general que se ajusta a las funciones de la tensión ensayo determinadas.
  - g) determinación de una función generalizada con un coeficiente  $c$ , que desplaza la curva hacia mayores o menores valores de frecuencia de la sobretensión (desplazamiento hacia la izquierda o derecha de la función de la tensión de ensayo).
- La estimación de una nueva relación entre  $K$  y  $K_{ff}^+$ , que relaciona el comportamiento de distancias libres en aire ante sollicitaciones de frente lento (tipo maniobra), dado por el factor de separación  $K$  y ante sollicitaciones de frente rápido (tipo rayo), dado por el factor  $K_{ff}^+$ , a través de los siguientes aportaciones:
    - a) determinación de valores experimentales  $K$  y  $K_{ff}^+$ , para diferentes configuraciones de campo eléctrico ensayadas en el laboratorio ( $K \sim 1$ ,  $K = 1,18$ , y  $K = 1,42$ ).
    - b) determinación de expresión lineal que relaciona  $K$  y  $K_{ff}^+$ .
    - c) discusión de las diferencia entre la expresión calculada y al establecida en la norma IEC 60071-2.

### 5.3 SUGERENCIAS PARA FUTUROS DESARROLLOS

Las investigaciones desarrolladas sugieren realizar futuras investigaciones en las siguientes líneas de trabajo:

- Determinación de las distancias de saturación inferior y superior de configuraciones de ensayo con diferentes factores de separación  $K$ , comprendidos entre  $K = 1$  y  $K = 1,8$ .
- Determinación de función de la tensión de ensayo para distancias libres en aire superiores a 3 m.

- Determinación experimental del factor de separación de la configuración de la referencia {48}.
- Determinación de una nueva función de la tensión de ensayo  $k(f, d, K)$  para aisladores de vidrio y porcelana.
- Determinación de una nueva función de la tensión de ensayo  $k(f, d, K)$ , para aisladores poliméricos.
- Determinación de función de la tensión de ensayo para papel-aceite en configuraciones de campo no homogéneo que puedan existir en transformadores de potencia.
- Análisis en mayor profundidad de la relación entre  $K$  y  $K_{ff}^+$ ,

## BIBLIOGRAFÍA

---

- 
- {1} ALSTAD, K.; HUSE, J.; PAULSEN, H.M.; SCHEI, A.; VOLD, H.; HERIKSEN, T.; REIN, A. Lightning impulse flashover criterion for overhead line insulation. Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan. August 1979.
- 
- {2} BERLIJN, S.; GARNACHO, F.; SIMÓN, P.; GOCKENBACH, E.; WERLE, P.; HACKEMACK, K.; WATTS, M. Final report, digital measurement of parameters used for lightning impulse tests for h. v. Equipment. Contract nº PL-951210-SMT-CT96-2132, 17 Sept.-1999.
- 
- {3} BERLIJN, S.; GARNACHO, F.; SIMÓN, P.; GOCKENBACH, E.; HACKEMACK, K.; WATTS, M.; WONG, P.; KVARNGREN, m. and MUHR, M. Electrical insulation for non-standard wave shape lighting impulses. Proc. CIGRE, Paris Session 2000, 12/33-08.
- 
- {4} CARRARA, G.; HAUSCHILD, W. - Statistical evaluation of dielectric test results. Electra No. 133 (1990), pp. 109-131
- 
- {5} CIGRE GT 33.02 - Coordinación de aislamiento entre fases. Parte 1: Sobretensiones de maniobra en las redes trifásicas, ELECTRA 64 1979, pág. 138-158.
- 
- {6} CIGRE GT 33-07 - Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, CIGRE Technical Report nº 72 - 1992
-

- {7} GARNACHO, F.; ARO, M.; SCHON, K. – Evaluation procedures for lightning impulse parameters in case of waveforms with oscillations and/or overshoot, IEEE Trans. On Power Delivery, vol 12, no.2, pp. 640-649, Apr. 1997.
- 
- {8} GARNACHO, F.; SIMÓN, P. Validación del software “Parameters”. Document P2/16. EC Project. Contract nº PL –95120-SM4-CT-96-2132. March 1998.
- 
- {9} GARNACHO, F.; SIMÓN, P. Measuring system for damping oscillation and overshoot. Document P2/19. Report. EC Project. Contract nº PL–95120-SM4-CT-96-2132. September 1998.
- 
- {10} GARNACHO, F.; SIMÓN, P. Proposal of the trigger delays to be used for the project. Document P2/26. Rev. 2. EC Project. Contract nº PL – 95120-SM4-CT-96-2132. November 1998.
- 
- {11} GARNACHO, F.; SIMÓN, P.; Digital Measurement of parameters used for lightning impulse tests for high voltage equipment. Document P/27. Progress report. EC Project. Contract nº PL –95120-SM4-CT-96-2132. December 1998.
- 
- {12} GARNACHO, F.; SIMÓN, P.; KHAMLICH, A. Software para la evaluación de los parámetros de los impulsos tipo rayo. CIGRE. Congreso de Coordinación de Aislamiento-Madrid. Noviembre, 1999.
- 
- {13} GARNACHO, F., SIMON, P., GOCKENBACH, E., HACKEMACK, K., BERLIJN, S., WERLE, P. Evaluation of lightning-impulse voltages based on experimental results. Electra No. 204, October 2002.
- 
- {14} GARNACHO, F.; SIMON, P.; MORENO, J.; GONZÁLEZ, A. – Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión y sus fundamentos técnicos, Garceta Ediciones, Madrid - 2014
- 
- {15} HÄLLSTRÖM, J.; BERLIJN, S.; GAMLIN, M.; GARNACHO, F.; GOCKENBACH, E.; KATO, T.; LI, Y; RUNGIS, J. – Applicability of different implementations of factor-k filtering schemes for the revision of IEC 60060-1 and -2. Proceedings of the XIV<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005, paper B-32, p 92.
-

- {16} HAUSCHILD, W; LEMKE High Voltage Test and Measuring Techniques - Springer, Berlin Heidelberg, 2014. 1<sup>st</sup> Edition.
- 
- {17} IEC 60052:2002. Edition 3. - Voltage measurement by means of standard air gaps. International Electrotechnical Commission. October – 2002
- 
- {18} IEC 60060-1:2010. Edition 3. - High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements. International Electrotechnical Commission. September – 2010
- 
- {19} IEC 60060-2:2010. Edition 3. - High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems. International Electrotechnical Commission. November – 2010
- 
- {20} IEC 60071-1:2006. Edition 8. - Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules. International Electrotechnical Commission. January 2006.
- 
- {21} IEC 60071-2:1996. Edition 3. - Insulation co-ordination - Part 2: Application guide. International Electrotechnical Commission. December – 1996.
- 
- {22} IEC 61083-1:2001. Edition 2.0 - Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests - Part 1: Requirements for instruments. International Electrotechnical Commission. June – 2001
- 
- {23} IEC 61083-2:1996. Edition 1.0.- Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms. International Electrotechnical Commission. July – 1996
- 
- {24} IEEE Std 4-2013. IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. IEEE Standards Association. May – 2013.
- 
- {25} KIND, D. Die Aufbufläche bei Stoßspannungsbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft. ETZ-A vol.79, pp.65-69. 1958.
- 
- {26} KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFEL, J. - High Voltage Engineering – Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000. 2<sup>nd</sup> Edition
-

- {27} LEWIN, PAUL L., TRAN, TRUNG N., SWAFFIELD, DAVID J., AND HÅLLSTRÖM, JARI K. Zero Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A Factor-k Filter for the Revision of IEC 60060-1 and -2. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pages 3-12, January 2008.
- 
- {28} MARTÍNEZ, S. Identificación y calibración de sistemas de medida de impulsos tipo rayo mediante la aplicación del filtro del Kalman. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2001.
- 
- {29} MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT-01 a 23 – REAL DECRETO 337/2014, de 9 de mayo de 2014
- 
- {30} MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT-01 a 09 – REAL DECRETO 223/2008, de 15 de febrero de 2008
- 
- {31} OKABE, S.; KOTO, M.; ISHIKAWA, T.; YAMAGIWA, T. Insulation characteristics of GIS for non-standard lightning surge waveforms. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Montreal, Québec, Canada. ISH 1997.
- 
- {32} OKABE, S.; KOTO, M. Evaluation of Non-standard Lightning surge waveforms in GIS. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Montreal, Québec, Canada. ISH 1997.
- 
- {33} OKABE, S.; KOTO, M.; KAWASHIMA, T.; ISHIKAWA, T.; YAMAGIWA, T. Insulation characteristics of GIS for non-standard lightning surge waveforms. N°2: Gas gaps and spacer surface. High Voltage Engineering Symposium.. Conference Publication N° 467. August 1999. IEE 1999.
-

- {34} OKABE, S.; KOTO, M.; KAWASHIMA, T.; INOUE, T.; TERANISHI, T.; NAGAOKA, S. Dielectric characteristics of oil-filled transformers insulation models under non-standard lightning impulse voltages. High Voltage Engineering Symposium. Conference Publication N° 467. August 1999. IEE 1999.
- 
- {35} OKABE,S.; YUASA,S.; SUZUKI, T.; ROKUNOHE, T.; YAMAGIWA, T. Insulation characteristics of GIS for non-standard lightning impulse waveform, flashover phenomena with scale effect. 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Bangalore, India. ISH 2001.
- 
- {36} OKABE, S; TSUBOI, T.; UETA, G.; TAKAMI, J.; HIROSE, H. Basic study of fitting Method for Base curve extraction in Lightning impulse test techniques; – IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation – Vol 17, No 1; Feb 2010 – pp 2-4
- 
- {37} OKABE S., TSUBOI T., UETA G., YAMAGATA Y., and ZAIMA E., Study of lightning impulse test waveforms for UHV equipment, Proc. CIGRE Paris Session 2012, D1-204.
- 
- {38} PARIS, L.; CORTINA, R. Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulators strings. IEEE Trans. PAS vol. 87, pp 947-957. April 1968.
- 
- {39} PIGINI, A.; RIZZI, G.; GARBAGNATI, E.; PORRINO, A.; BALDO, G.; PESAVENTO, G. – Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods. IEE paper 88 SN 592-8. IEEE Transactions on Power Delivery Vol.4 N°2, pp. 1379-1392. April 1989.
- 
- {40} RAETHER, H. Electron avalanches and breakdown in gases. Butterworths Advanced Physics Series. London 1964.
- 
- {41} SCHNEIDER, K.H; WEEK, K.H. – ELECTRA, n° 35 – 1974. P.25-32
- 
- {42} SCHRÖDER, G.; Discharge development in SF6-N2 mixtures under fast oscillating impulse conditions. High Voltage Engineering Symposium. August 1999. Conference Publication N° 467. IEE 1999.
-

- {43} SEGUR, P. Gaz isolants. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique. D2530-D2531. 1990.
- 
- {44} SIMÓN COMÍN, P.; Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión. – Tesis Doctoral, ETSII- Universidad Politécnica de Madrid - 2004
- 
- {45} SRIVASTAVA, K.D.; VANDERMAAR, A.J.; WANG, M.G.; NEILSON, J.B. Breakdown characteristics of oil-polymer film insulation under steep-front impulse voltages. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Montreal, Québec, Canada. ISH 1997.
- 
- {46} SUZUKI, T.; MIYAKE, K. Experimental study of the breakdown voltage time characteristics of large air gaps with lightning impulses. IEEE transactions on PAS. Vol.96, pp. 227-233. 1977.
- 
- {47} UETA, G; TSUBOI, T.; OKABE, S. Evaluation of overshoot rate of lightning Impulse withstand voltage test waveform based on new base curve fitting methods – Study on Overshoot waveform in an actual test circuit; IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation – Vol 18, No 3; Jun 2011 – pp 783-791
- 
- {48} UETA, G., TSUBOI, T., OKABE, S., SHIMIZU, Y., and HINO, E. - k-factor Value and Front Time Related Characteristics of UHV-class Air Insulation for Positive Polarity Lightning Impulse Test, IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 19, pp. 877-885, 2012.
- 
- {49} VENKATASESHIAH, C.; SIVA SARMA, D.V.S.S. Impulse Voltage Generator Characteristics using a PC. 7<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Dresden, Germany. Aug. 26-28.1991, 51.13.
- 
- {50} WOLF, J.; WOIGT, G. A new solution for the extension of the load of impulse voltage generators. Montreal ISH 1997.
- 
- {51} YASHIMA, M.; SHINKAI, H.; GOSHIMA, H. Discharge development in SF6 under quasi-uniform field gaps for steep-front square impulse and fast oscillating impulse voltages. 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Bangalore, India. ISH 2001.
-

- {52} YUASA,S.; SUZUKI, H.; OKABE,S. Insulation characteristics of GIS under oscillatory waveforms of non-standard lightning impulse. 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Bangalore, India. ISH 2001.
- 
-



