

Instalación de Ensayo Multidisciplinar para Generar Impulsos de Corriente Tipo Rayo

RESUMEN

En este artículo se presentan distintos generadores de impulsos de alta corriente desarrollados por el LCOE para ensayar aparatos y materiales expuestos a descargas directas de rayos. Los generadores que se presentan corresponden a las ondas 4/10, 8/20, 10/350 y ondas tipo A, B, C y D especificadas en la normativa del sector aeronáutico.

PALABRAS CLAVE

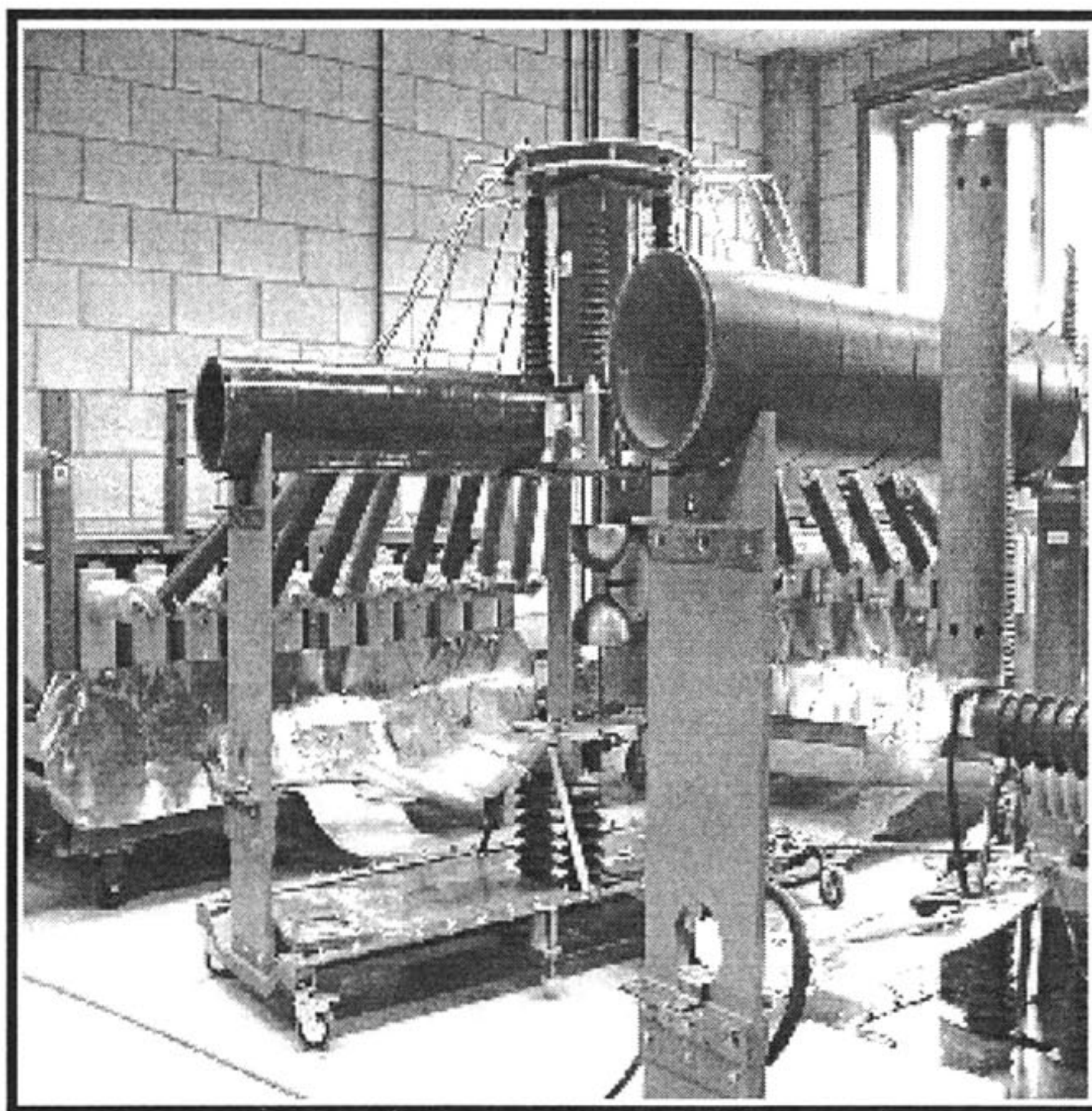
Impulso de corriente, onda 4/10, 8/20, 10/350, descarga atmosférica, sobretensión, pararrayos, protección de aeronaves.

ABSTRACT

This paper presents different high current impulse generators developed by the LCOE for testing apparatus, devices and materials exposed to lightning direct discharges. Generators corresponding to wave shapes 4/10, 8/20, 10/350 and wave shapes type A, B, C and D for aircraft protection are presented.

KEYWORDS

Current surge, 4/10, 8/20, 10/350 wave, atmospheric discharge, overvoltage, lightning arrester, aircraft protection.



□ **Fernando Garnacho Vecino, Ph.D**
Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica Industrial
de la Universidad Politécnica
de Madrid, España.

□ **Abderrahim Khamlichi, Ing.**
Universidad Politécnica
de Madrid, España.

*LCOE de la FFII (Laboratorio Central Oficial de
Electrotecnia de la Fundación para el Fomento
e Innovación Industria). Madrid, España.*

□ **Ignacio Trasmonte, Ing.**
Universidad Politécnica
de Madrid, España.

1. INTRODUCCIÓN

Los pararrayos de protección de las redes eléctricas de alta tensión deben someterse a impulsos de corriente 8/20 de hasta 20 kA y a ondas 4/10 de hasta 100 kA según las normas de la serie IEC 60099 [1] y [2]. Asimismo, los dispositivos de protección contra sobretensiones conectados a las redes de potencia de baja tensión deben ser capaces de soportar impulsos de corriente 8/20 de 20 kA y descargas de hasta 20 C conforme a las exigencias establecidas en las normas de la serie CEI 61643 [3].

El método tradicional para la generación de impulsos de corriente para ensayos de pararrayos de protección de redes está basado esencialmente en la descarga directa de una batería de condensadores a través de un circuito inductivo-resistivo RLC. Esta forma de generación permite alcanzar picos de corriente importantes de hasta 100 y 200 kA con ondas de corta duración pero estos valores de pico están limitados a niveles mucho más bajos (20 kA) si se desean producir ondas de corriente doble exponenciales con tiempos hasta el valor mitad, T_2 , superiores a algunas decenas de microsegundos, debido al bajo rendimiento del generador para producir ondas dobles exponenciales.

Las puntas de captación de los pararrayos, conductores y accesorios metálicos de las instalaciones utilizadas para proteger los edificios frente a las descargas del rayo deben ser concebidos para soportar impulsos de corriente de hasta 100 kA con una energía específica de hasta 2,5 MJ/W según los criterios establecidos en la norma EN 50164-1[4]. En este caso la energía específica a suministrar por el generador debe ser más elevada y en consecuencia deben generarse ondas doble exponenciales con T_2 de centenas de microsegundo. En estas condiciones, el simple circuito RLC presenta un rendimiento bajo y en consecuencia se precisa disponer de grandes capacidades. Una alternativa para mejorar el rendimiento de la instalación consiste en cambiar la topología del circuito del generador durante el proceso de aplicación del impulso, a través de la actuación de un dispositivo de corte (explosores trieléctricos o semiconductores con control de puerta) que permite que toda energía almacenada en forma de corriente en la bobina se descargue por un circuito RL.

Por último, la fabricación de estructuras de aeronaves mediante nuevos materiales compuestos (kevlar, fiberglass y CFC) más ligeros que los convencionales metálicos junto con el aumento progresivo de dispositivos electrónicos digitales en la instrumentación de control de las aeronaves ha conducido a la necesidad

de efectuar ensayos de vulnerabilidad frente a los efectos directos e indirectos del rayo según formas de onda normalizadas [5]. Cuando se precisa configurar estas formas de onda se recurre a instalaciones de ensayo de multigeneradores de impulsos de corriente cuyo disparo se sincroniza mediante un circuito de electrónica digital y transformadores amplificadores de impulso capaces de disparar los explosores de actuación de los generadores.

2. INSTALACIÓN DE ENSAYO DE IMPULSOS DE CORRIENTE PARA ENSAYOS DE PARARRAYOS DE REDES ELÉCTRICAS

Los pararrayos de protección contra sobretensiones de las redes eléctricas deben cumplir las especificaciones IEC 60099-1 y IEC 60099-2, en las que se describen los ensayos de impulsos de corriente 8/20 y 4/10. En la *Figura 1* se presenta el circuito genérico RLC de un generador de impulso de corriente habitualmente utilizado y en la *Figura 2* se muestran los tres posibles regímenes de funcionamiento: subamortiguado, críticamente amortiguado o sobreamortiguado. La corriente que circula por el objeto de ensayo en los distintos regímenes de funcionamiento evoluciona según las ecuaciones siguientes:

Funcionamiento en régimen subamortiguado:

$$\frac{1}{LC} - \alpha^2 > 0 \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

$$\text{donde} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}$$

Funcionamiento en régimen críticamente amortiguado:

$$\frac{1}{LC} = \alpha^2 \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$i(t) = \frac{U_0}{L} \cdot t \cdot e^{-\alpha t} \quad (2)$$

Funcionamiento en régimen sobre amortiguado:

$$\frac{1}{LC} - \alpha^2 < 0 \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sinh(\omega \cdot t) \quad (3)$$

donde $\omega = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{LC}}$

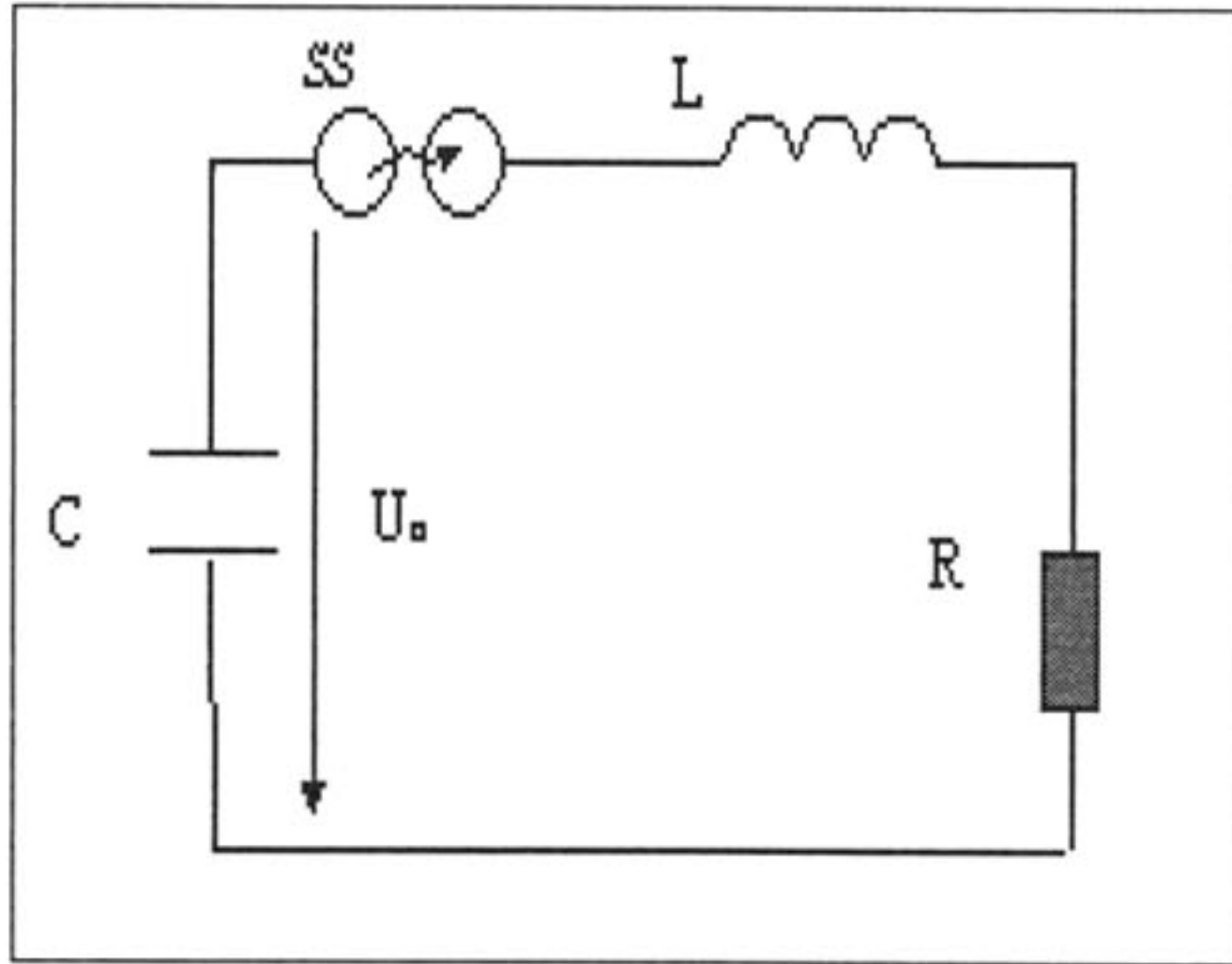


Figura 1 Circuito del Generador 8/20 y 4/10

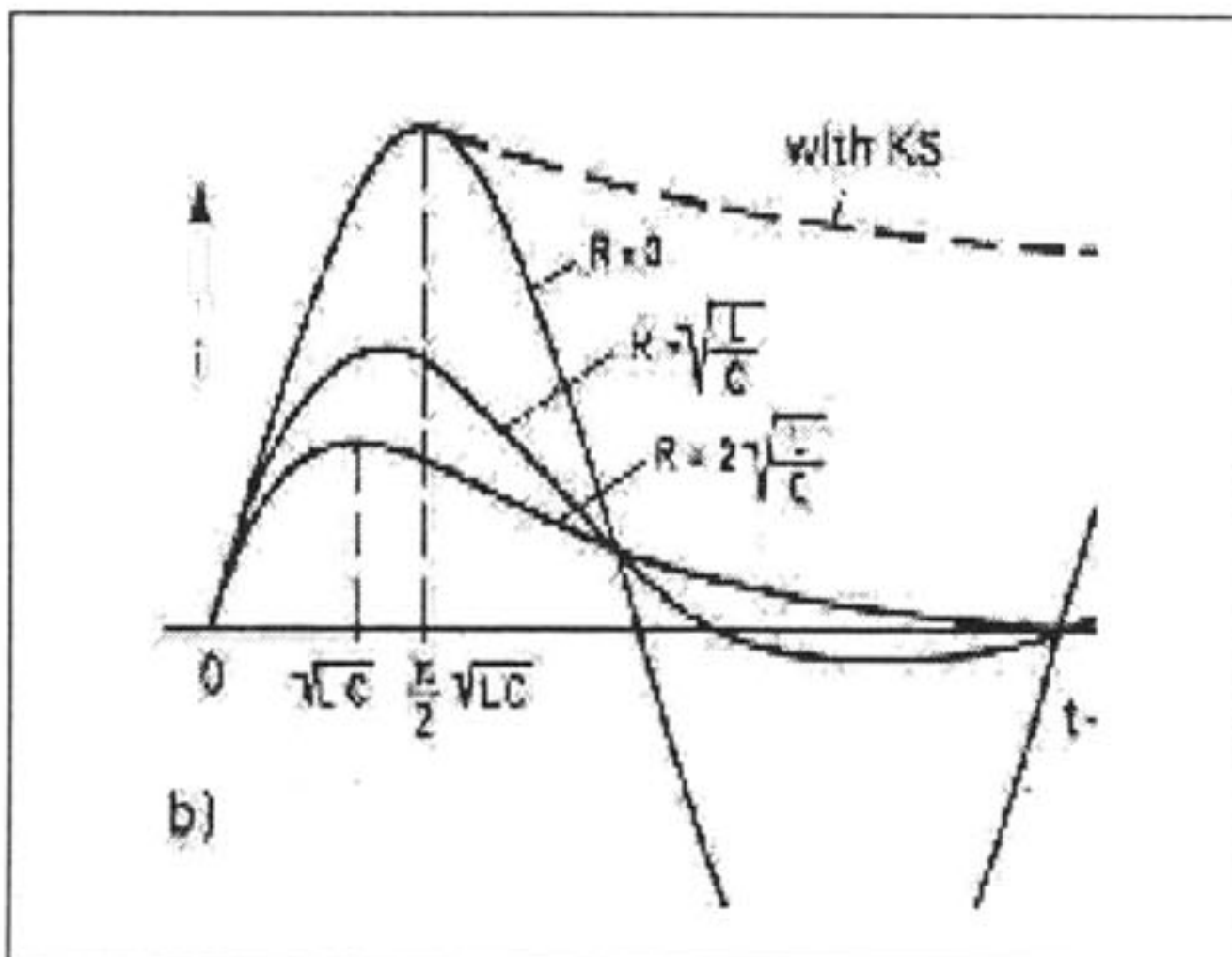


Figura 2. Regímenes de funcionamiento subamortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado.

La instalación de ensayos de pararrayos para las redes eléctricas funciona en régimen subamortiguado utilizando como batería de condensadores 10 unidades de 1 uF/ 100 kV, cada uno, que pueden disponerse en distintas configuraciones serie-paralelo. La inductancia externa de 20 mH es también regulable, lo que permite utilizar este generador para los ensayos de tensión residual con onda 8/20 y corrientes de descarga de hasta 20 kA, también para ensayos de impulsos de corriente de gran amplitud 4/10. En este último caso el generador de impulso de corriente 8/20 se dispone con inductancias de bajo valor.

3. INSTALACIÓN DE ENSAYOS DE IMPULSOS DE CORRIENTE 10/350

En la Figura 3 se muestra el circuito eléctrico del generador 10/350 como variante del simple circuito RLC presentado anteriormente y cuya principal ventaja es su mejor rendimiento (superior a cuatro veces). Consta esencialmente de una batería de condensadores, simbolizada por C, un conjunto resistivo-inductivo serie R_1-L_1 , un explosor SS para el inicio del impulso, una inductancia principal L'_2 con su resistencia propia R'_2 , y un explosor especial trielectródico CS. El objeto de ensayo caracterizado por su componente resistiva R_{load} e inductiva L_{load} . U_o representa la carga inicial de la batería de condensadores.

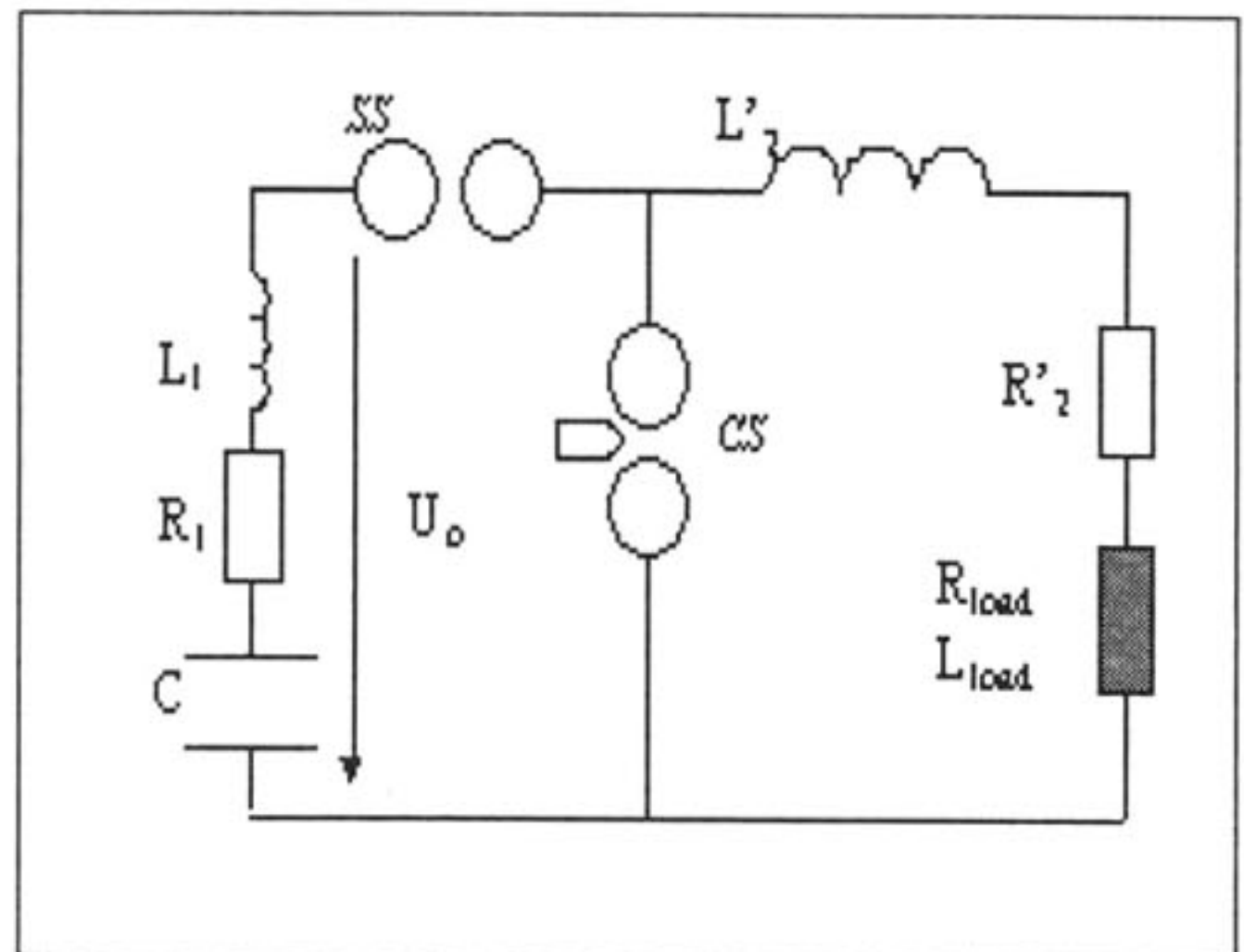


Figura 3 Circuito del Generador 10/350

El circuito se diseña para que funcione en régimen subamortiguado cuando el explosor SS se dispara. Una vez la corriente ha alcanzado su cresta I_{max} , instante en el que prácticamente toda la energía almacenada inicialmente en la batería de condensadores $1/2 \cdot C \cdot U_o^2$ se ha transferido a la inductancia L'_2 , $1/2 \cdot L'_2 \cdot I_{max}^2$ se dispara el explosor trielectródico CS.

Por lo tanto, la rama de la izquierda compuesta por C, R_1 , L_1 y SS se cortocircuita y la corriente queda atrapada en la rama de la derecha (inductancia L'_2 - R'_2 y la carga R_{load} - L_{load}) y el explosor trielectródico. A partir de este instante, la corriente de descarga a través de la carga seguirá una ecuación de primer orden según una simple exponencial. Conviene que L'_2 sea significativamente mayor que L_{load} a fin de que el objeto en ensayo no afecte sensiblemente la forma de onda proporcionada por el generador. En la Figura 4 se muestra gráficamente la evolución teórica de la co-

riente así como de la tensión en bornes de la batería de condensadores para este circuito.

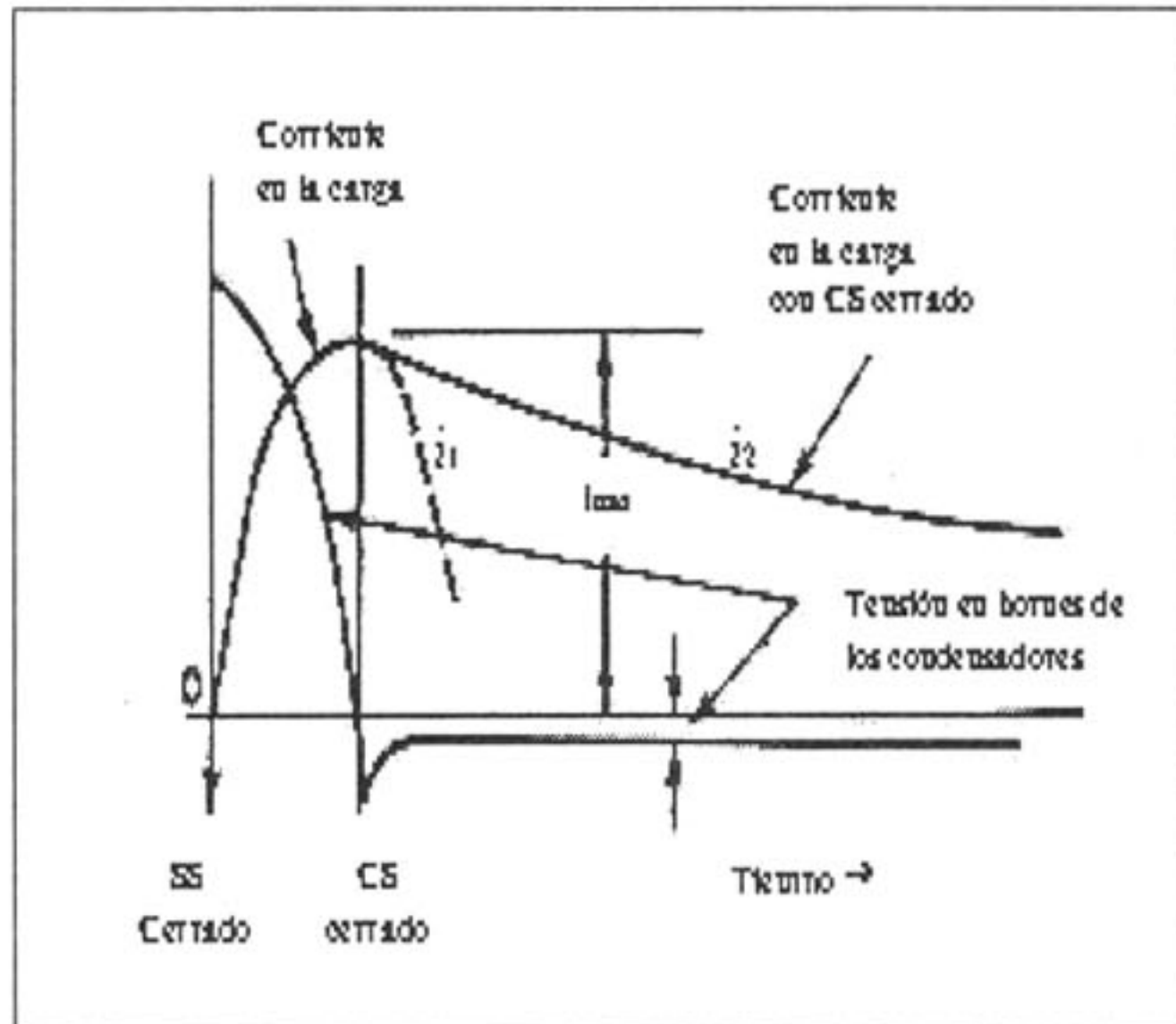


Figura 4 Proceso teórico de funcionamiento del generador 10/350.

La instalación de ensayos del LCOE para generar impulsos 10/350 de hasta 100 kA ha sido diseñada considerando una resistencia de arco en el explosor trielectrónico de unos 7,5 mW aproximadamente para un objeto de ensayo de unos 8 mW de resistencia, R_{load} y de unos 1,5 mH de inductancia L_{load} .

El circuito lo componen un banco de 20 condensadores de 1mF/100 kV cada uno con una resistencia serie R_1 de 1,2 W e inductancia propia de L_1 1,5 mH. La inductancia L'_2 serie es de 7 mH y la resistencia propia R'_2 de 2 mW. Para disparar el explosor de esferas trielectrónico se dispone un generador de impulsos de tensión de 100 kV. La batería de condensadores se carga a una tensión de 70kV. En la Figura 5 se muestra un registro de la onda de corriente de salida.

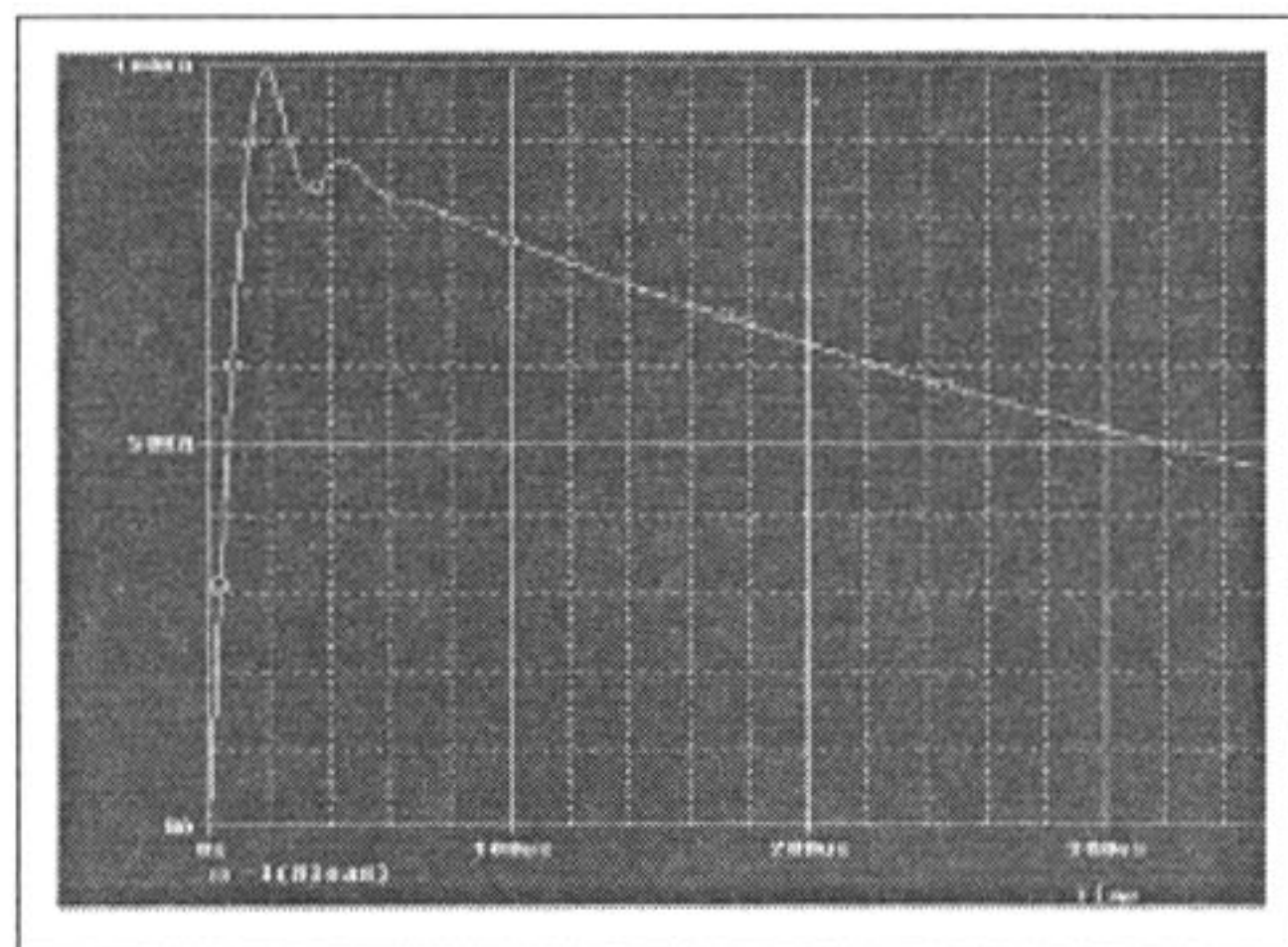


Figura 5. Impulso de 101 kA, 15/342 y de $2,4 \times 10^6 A^2s$

El circuito de la Figura 3 es válido para generar impulsos de corriente 10/350 de cresta de corriente de hasta 100 kA, pero para poder alcanzar valores de 200 kA es preciso disponer de dos instalaciones idénticas en una disposición paralelo y funcionando sincronizadamente (véase Figura 6). Ambos circuitos descargan simultáneamente un pulso 10/350 de hasta 100 kA sobre la muestra bajo ensayo, sumándose ambas corrientes para alcanzar impulsos de 200 kA.

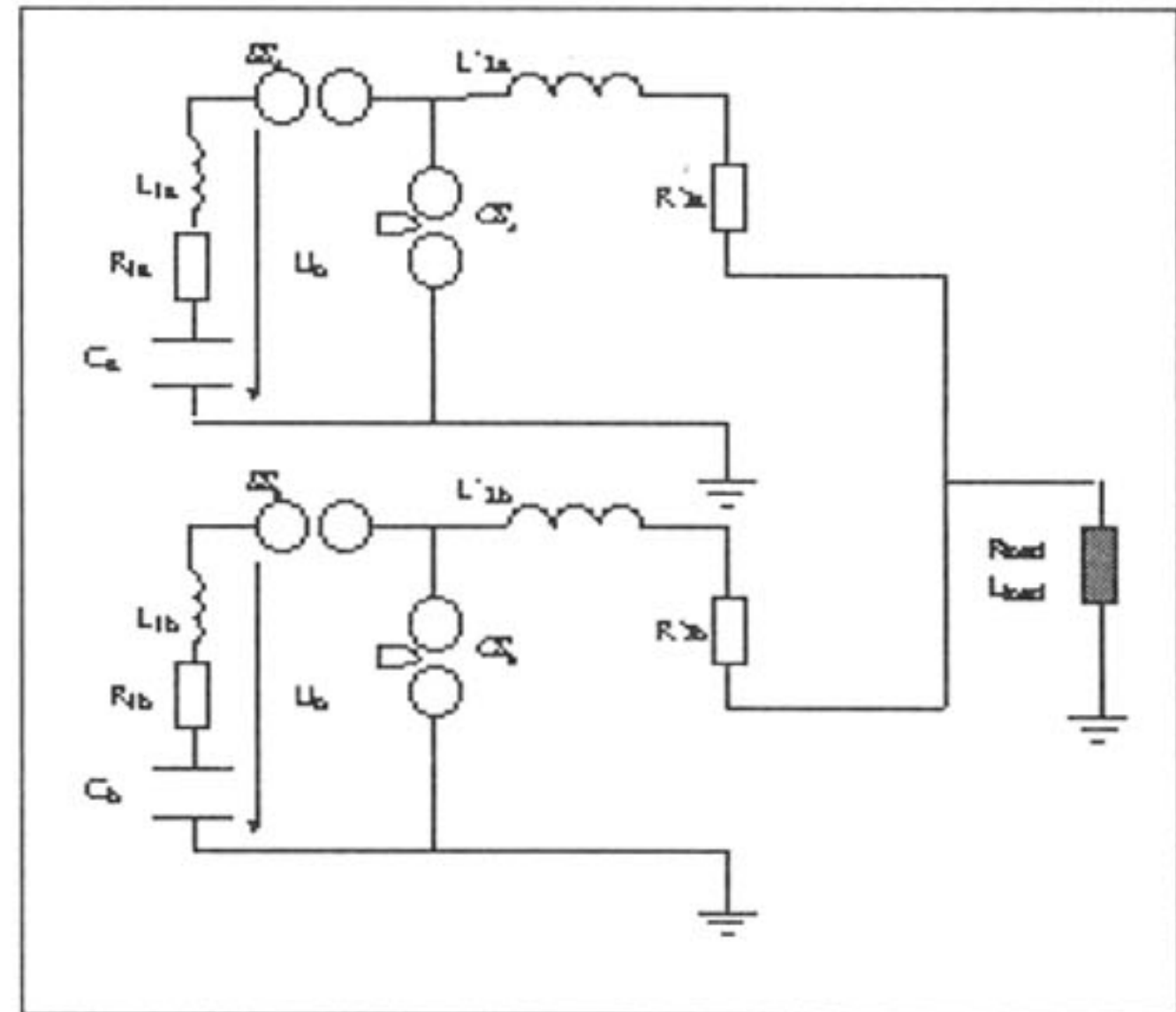


Figura 6. Generador de pulso 10/350 de 200 kA

Para el análisis de la respuesta transitoria del circuito de la figura 6 debe prestarse una atención especial al modelo transitorio de sus componentes. En particular, el explosor de esferas trielectrónico, CS, debe considerarse su componente propia inductiva y el valor de la resistencia de arco en función de la corriente de ensayo.

4. INSTALACIÓN DE IMPULSOS DE CORRIENTE PARA ENSAYOS DE ESTRUCTURAS DE AERONAVES

La forma de onda de los impulsos normalizados para los ensayos de aeronaves corresponden a cuatro componentes normalizadas, denominadas A, B, C y D según la referencia [5]. En la Figura 7 se muestran los parámetros característicos de cada componente descritos en la referencia indicada.

La instalación de ensayo diseñada por el LCOE está concebida para que la componente A sea conformada haciendo funcionar sincronizadamente y en paralelo los dos generadores que originen

formas de onda tipo D. Los generadores para producir las componentes B y C son independientes. El control de la sincronización de los disparos de los cuatro generadores (dos generadores D, uno B y otro C) se efectúa a través de un dispositivo electrónico gobernado por un PC. En la figura 8 se muestra la disposición en diagramas de bloques del circuito utilizado.

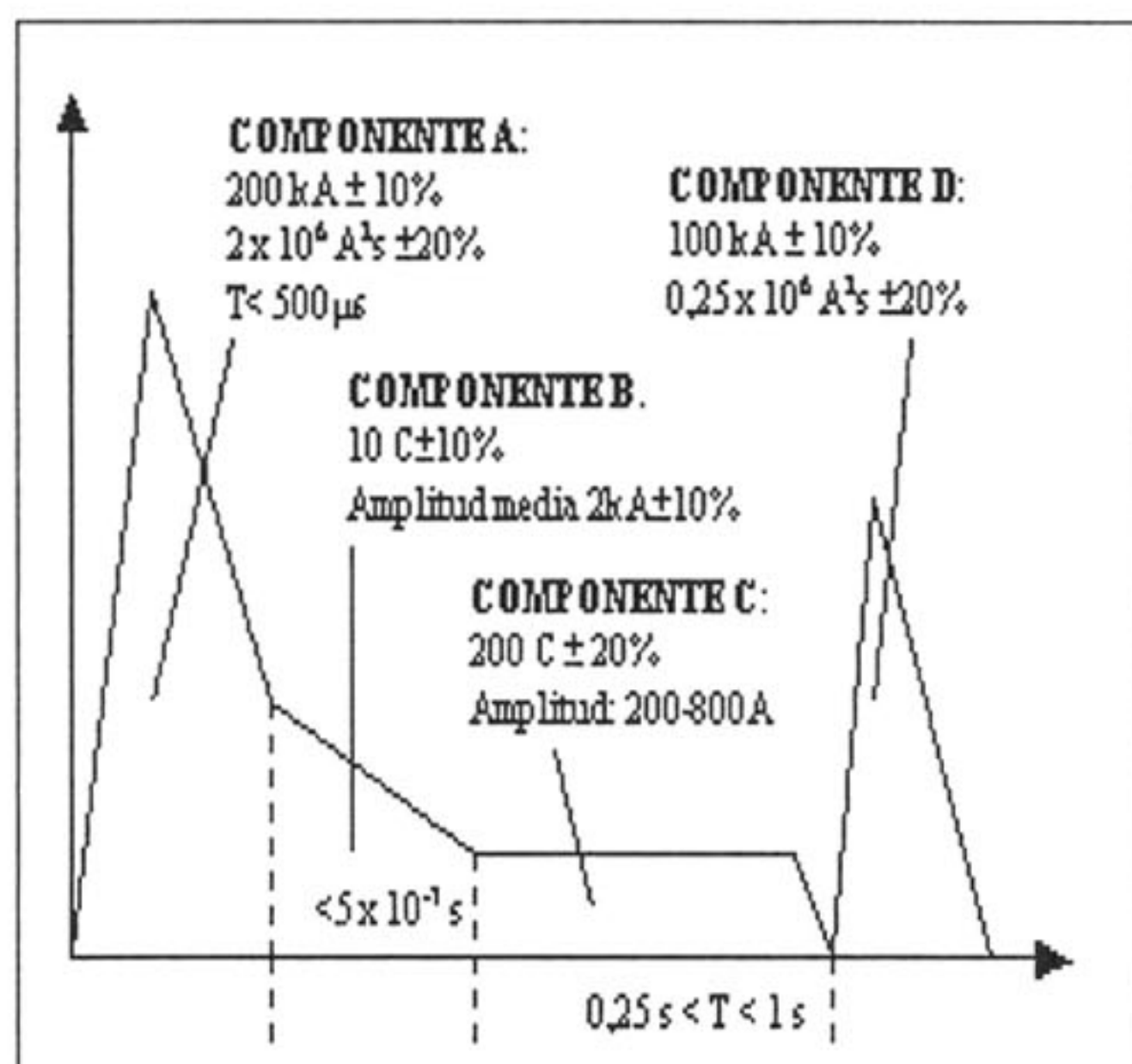


Figura 7. Formas de ondas normalizadas A, B, C y D.

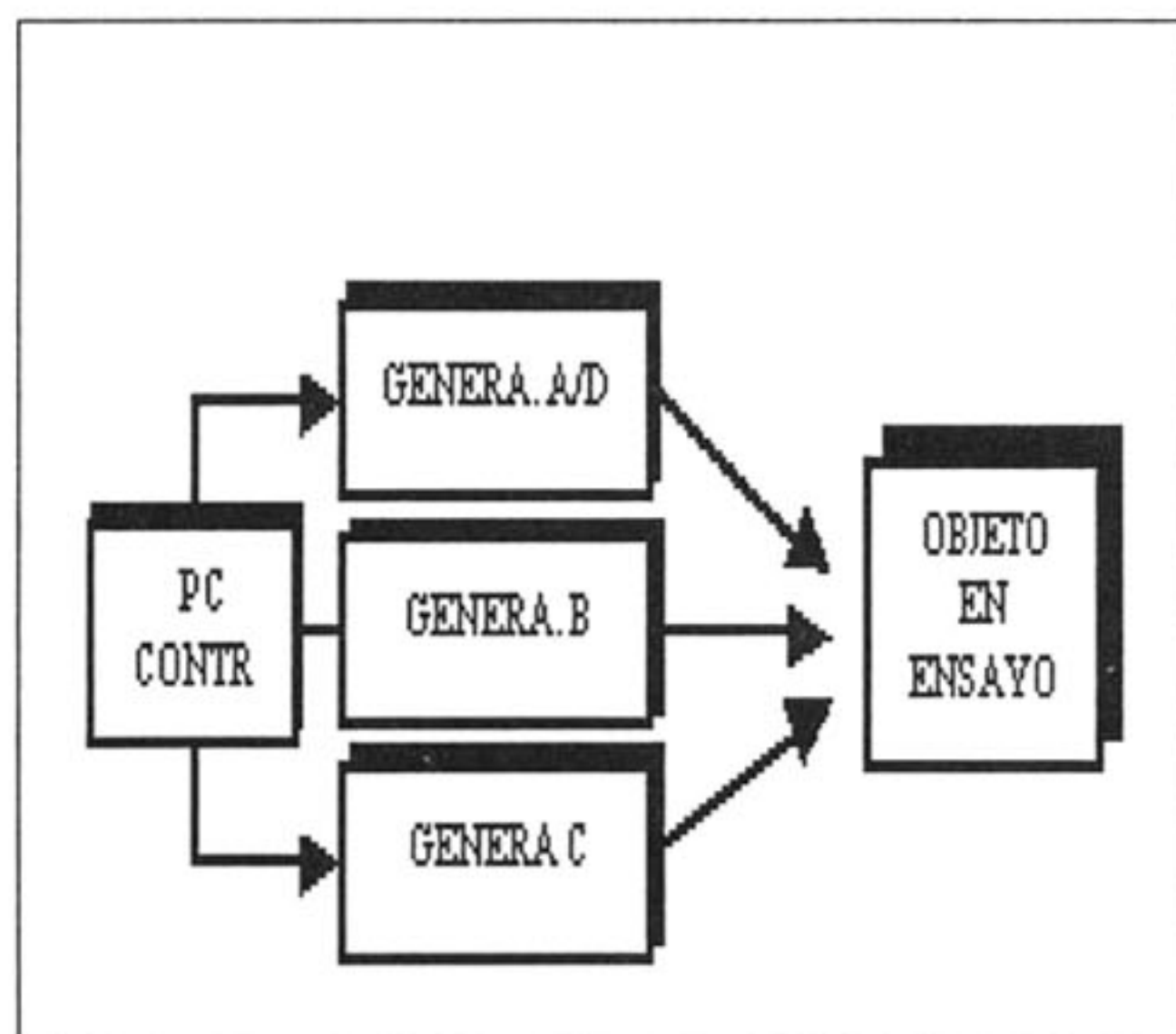


Figura 8. Diagrama de Bloques de la composición de los cuatro generadores

Los generadores se han diseñado considerando un valor de resistencia de $20 \text{ m}\Omega$ con una componente inductiva no superior a $8 \mu\text{H}$ (incluyendo el objeto en ensayo).

Cada generador de la onda D corresponde con un circuito RLC del tipo de la figura 2, en el que se dispone

una batería de condensadores de 20 unidades de $1 \mu\text{F}/100 \text{ kV}$ y una inductancia principal L_2 de $7 \mu\text{H}$ con resistencia interna de $2 \text{ m}\Omega$. Para configurar este generador se inserta en la rama del explosor trielectrónico una resistencia regulable de $250 \text{ m}\Omega$, cuya función es limitar la cola del impulso y, por tanto, adaptar la energía específica de salida al valor requerido. El generador del LCOE genera impulsos de corriente con una I_{max} de 100 kA y con una acción integral de $0,27 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$, cuando sus condensadores se cargan a 72 kV .

Para generar la forma de onda A ambos generadores tipo D se disparan en paralelo y la resistencia serie con la rama del explosor trielectrónico se anula con el fin de transferir la mayor energía específica posible ($3,5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$).

Para valores de cresta inferiores a 100 kA (componente D escalada), en principio, únicamente habría que disminuir la tensión de carga de los condensadores. Sin embargo, cuando se manejan intensidades de cresta inferiores a 50 kA , es más práctico por motivos de regulación, recurrir a un circuito RLC que genere un impulso de corriente críticamente amortiguado.

El generador B está constituido por un circuito del tipo de la figura 1 funcionando en régimen críticamente amortiguado con una batería de ocho condensadores de $135 \mu\text{F}/12 \text{ kV}$ con una inductancia de $1,04 \text{ mH}$ y una resistencia interna de $1,97 \Omega$. Cuando a la batería de condensadores se le carga a $9,3 \text{ kV}$, la forma de la corriente de salida a través del objeto en ensayo corresponde a la mostrada en la figura 9, con un valor medio de corriente de $1,9 \text{ kA}$ en los primeros 5 ms de duración y con una carga transferida de $9,4 \text{ C}$. valores dentro de las tolerancias para la onda B.

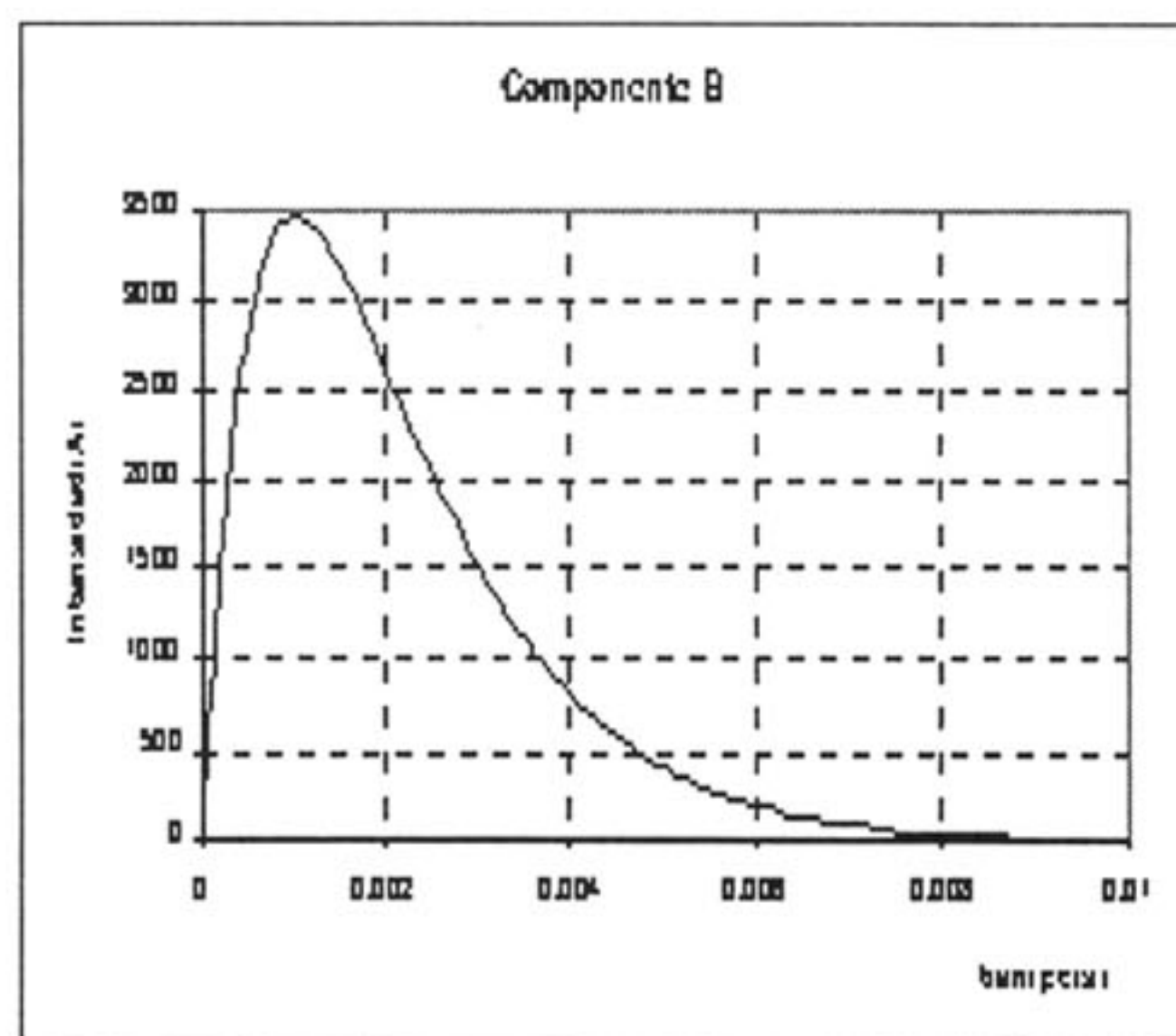


Figura 9. Forma de la Onda B.

Para la componente C se han desarrollado dos generadores distintos, uno a través de baterías con un circuito electrónico de potencia controlado electrónicamente y otro a través de un circuito del tipo de la *figura 2* ligeramente modificado (véase la *figura 10*) en el que el dispositivo de corte CS se ha sustituido por uno de tecnología de semiconductores. Además, en paralelo con el objeto en ensayo se ha dispuesto un dispositivo de corte CC para controlar la duración de la corriente a través de la carga.

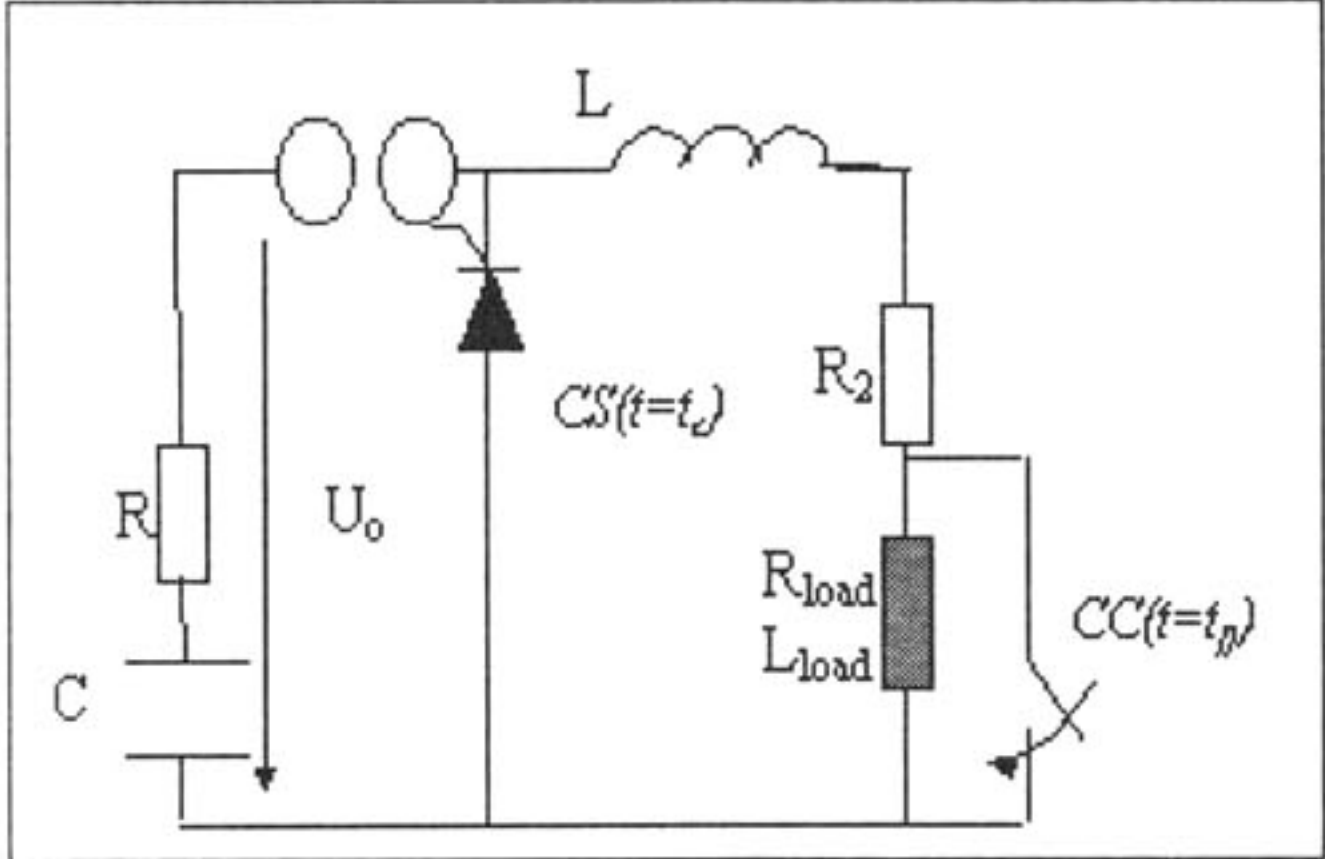


Figura 10. Circuito para la forma de onda C.

El circuito está compuesto por un banco de condensadores de doce unidades de 135 μ F/12 kV con una inductancia de 300 mH y una resistencia de 500 m Ω . Para el instante de cresta entra en conducción el dispositivo CS ($t=t_c$). Para un instante posterior ($t=t_p$) se cortocircuita la muestra mediante CC. Este instante depende de la carga eléctrica total que se quiere hacer circular por la muestra. En la *figura 11* se muestra la forma de onda de la componente C, cuando los condensadores se cargan a 8 kV. El instante de actuación del dispositivo de corte C es de 34 ms y la duración de la onda es de 0,5 s, siendo la carga transferida al objeto en ensayo de 200 C con una corriente máxima de 570 A y un valor de corriente final de 260 A.

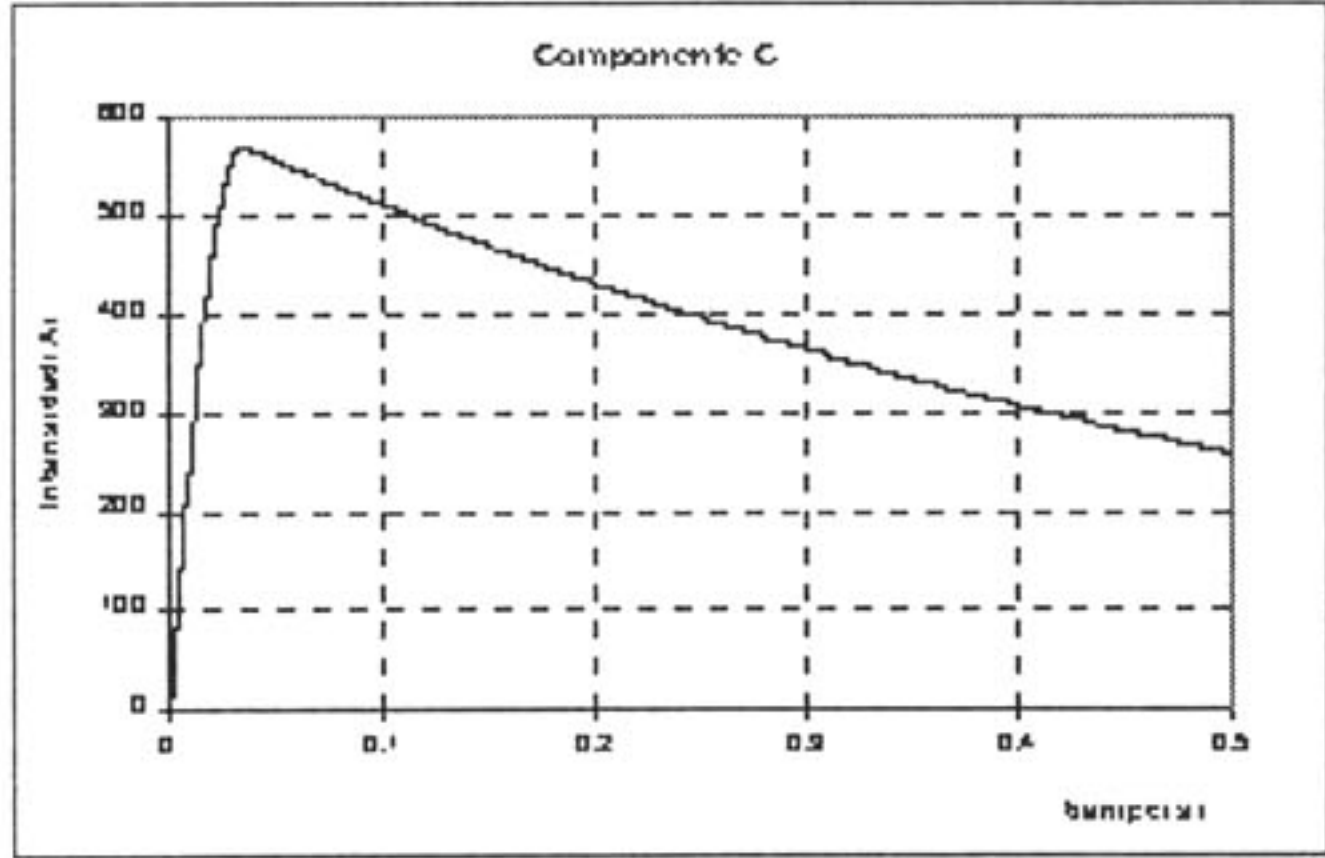


Figura 11. Simulación de la forma de la onda C.

Para la sincronización de los cuatro generadores se ha desarrollado un control digital con una etapa de electrónica de potencia cuya señal de disparo se convierte y transfiere por fibra óptica a transformadores de impulsos dispuestos en el lado de alta tensión de los explosores SS de cada generador. Los transformadores de impulso amplifican la descarga de un condensador cargado a través de una batería hacia la bujía de disparo de los explosores. La precisión en el control de los disparos es mejor que 0,1 μ s.

Para la medida de los impulsos de corriente se utilizan shunts y bobinas Rogowski. Las bobinas se disponen cuando la magnitud de corriente excede algunas decenas de kiloamperios. El ancho de banda utilizado es mejor que 1 MHz. Para la medida de tensiones residuales se utilizan divisores resistivos de valor óhmico de algunos kilo ohmios, con el mejor tiempo de respuesta a 10 ns.

5. CONCLUSIONES

Los generadores RLC funcionando en régimen sobreamortiguado son adecuados para la generación de impulsos de corriente 20 kA 8/20 y 100 kA 4/10 de energía específica limitada ($<0,1 \times 10^6$ A²s). Cuando es preciso recurrir a energías específicas elevadas (3×10^6 A²s) tales como las producidas por las ondas 100 kA 10/350 es más económico recurrir a generadores RLC modificados con explosores trielectrónicos utilizados para cortocircuitar la batería de condensadores del generador cuando la corriente pasa por la primera cresta.

Formas de onda normalizadas según técnicas de ensayo del área aeronáutica se pueden conformar mediante la combinación de formas de onda simples generadas por circuitos de alta corriente independientes, gracias a un control digital de gran exactitud.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1.] IEC 60099-1: 1999 Non-linear resistor type gapped arresters for a.c. systems.
[2.] IEC 60099-4: 20001Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.
[3.] IEC 61643-1 Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems- Part1 Performance requirements and testing methods.
[4.] EN50164-1: 1999Lightning Protection Components (LPC). Part 1: Requirements for connection components.
[5.]Lightning test waveforms and techniques for aerospace vehicles and hardware. Rep. Of SAE Committee AE4L, June 20, 1978

AUTORES



Fernando Garnacho Vecino. Doctor Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid en 1986. En 1981 se incorpora al LCOE y en 1984 se hace cargo de laboratorio de Alta Tensión del mismo. Desde 1988 es Catedrático de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Desde 1992 hasta 1999 dirigió el Departamento de Ingeniería Eléctrica en el que imparte docencia en la especialidad de "Centrales y Redes Eléctricas". Desde 1990 es miembro del grupo de trabajo 33.03 de la CIGRE "High Voltage Testing and Measuring Techniques" y actualmente es representante español del Comité de Estudios 33 de la CIGRE "Coordinación de Aislamiento". Es presidente de la Comisión Sectorial Eléctrica para la acreditación de laboratorios de ensayos eléctricos de la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC). Preside el grupo de normalización de AENOR GT 42 correspondiente a "Técnicas de Ensayo de Alta Tensión" y participa en diversos grupos de trabajo y comisiones de normalización y certificación de AENOR.

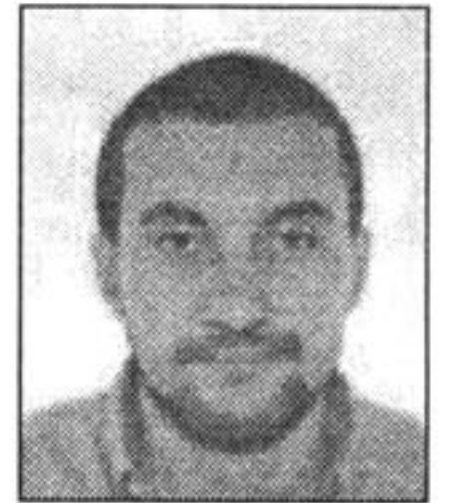
fgarnacho@lcoe.etsii.upm.es
lcoe.fgarnacho@inode.es



Ignacio Trasmonte Gómez. Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid en 2001. En octubre de 2001 se incorpora al Departamento de Alta Tensión del LCOE en el laboratorio de Impulsos de Alta Corriente.

E-mail: itrasmonte@lcoe.etsii.upm.es

Abderrahim Khamlichi. Ingeniero Técnico Industrial por la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid en 1998. Desde 1998 se incorpora al LCOE en el Departamento de Alta Tensión. Actualmente estudia 5º curso de Ingeniería Industrial, especialidad Electricidad de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid.



E-mail: ak@lcoe.etsii.upm.es

"Engrandecerás a tu pueblo, no elevando los tejados de sus viviendas, sino las almas de sus habitantes".

Epicteto
