

Construcción de un generador de impulsos de corriente para ensayo de pararrayos y del sistema asociado de medida

El presente artículo describe el cálculo, diseño y construcción de un generador de impulsos de corriente de 5.000 Amperios, el primero de su tipo que se construye en el país, para ensayar resistencias no-lineales de carburo de silicio utilizadas en pararrayos de fabricación nacional.

Se discuten algunos aspectos relativos a la construcción de cada uno de los elementos del circuito de impulso, los resultados y las posibilidades futuras que se derivan de esta experiencia.

El generador fue construido en el Laboratorio de Alta Tensión del Instituto de Ensayos e Investigación de la Facultad de Ingeniería, dentro de los programas del Grupo de Investigación en Alta Tensión — GIAT.

FRANCISCO ROMAN CAMPOS

Ingeniero Electricista

**Profesor Asistente Universidad Nacional
Estudios en Postgrado en Alta Tensión, R.F.A.**

FRANCISCO AMORTEGUI

FILIBERTO BOJACA

CESAR AUGUSTO GOMEZ

El generador de impulsos de corriente, por su amplio campo de acción, se constituye en un equipo básico del Laboratorio de Alta Tensión, puesto que sirve como herramienta de investigación de técnicas de medición de altas corrientes, como equipo de ensayo para pararrayos o de calibración de cápsulas magnéticas en investigaciones sobre descargas atmosféricas; y como complemento docente a la teoría de alta tensión.

En el presente artículo se consideran fundamentalmente los aspectos de su aplicación para ensayo de las resistencias no lineales componentes de los pararrayos y los problemas que fue necesario resolver para construir el generador y medir su respuesta.

Inicialmente se describe la operación del pararrayos y las normas que rigen su ensayo. Posteriormente se presenta el proceso seguido para escoger el circuito utilizado y los elementos que lo constituyen.

Para concluir se anexan los oscilogramas resultantes de los ensayos realizados para demostrar su funcionamiento y se discuten futuros desarrollos a partir de este equipo básico.

El pararrayos: elemento básico de protección

El lenguaje común ha extendido el nombre de pararrayos —empleado inicialmente para designar el dispositivo de protección contra descargas atmosféricas ideado por Franklin— a los técnicamente llamados "Descargadores de Sobretensión", que son los aparatos destinados a proteger el equipo eléctrico contra las sobretensiones de carácter externo o interno que aparecen en los sistemas eléctricos.

Los descargadores de sobretensión, que llamaremos sencillamente pararrayos, contienen dos partes activas fundamentales para ejercer su función de protección: 1) los explosores y 2) la resistencia no-lineal o varistor, también llamada pasta o elemento del pararrayos. (Véase Figura 1).

Los explosores, presentes en pararrayos de fabricación nacional —tipo carburo de silicio—, son los encargados de reaccionar cuando se sobrepasan valores definidos de tensión, evacuando a tierra a través de la resistencia no-lineal la energía transitoria causante de la sobretensión. Al entrar en conducción, por el pararrayos circula la corriente de

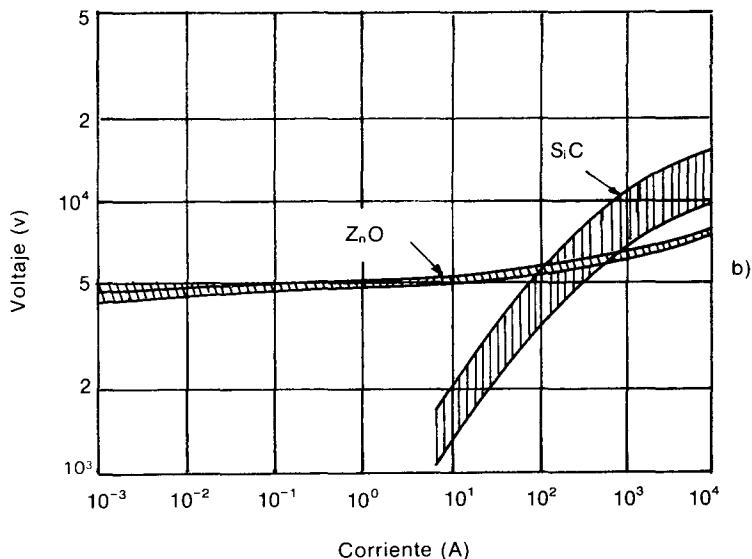
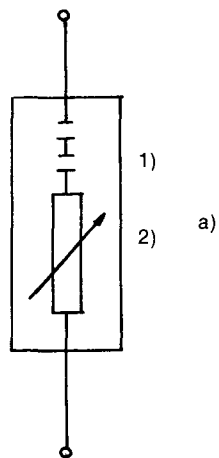


FIGURA 1. a. Elementos activos del pararrayos: 1) explosores 2) resistencia no-lineal. b. Curvas voltaje-corriente de elementos de SiC y ZnO (10)

descarga la cual es interrumpida por los explosores a más tardar en el primer paso por cero de la corriente de 60 ciclos. Adicionalmente estos limitan la circulación de la llamada corriente de control en su operación normal. En el caso de los nuevos pararrayos —de óxido de zinc— los explosores se eliminan por su corriente de control extremadamente baja, como se deduce de la Figura 1b.

La resistencia no-lineal se caracteriza por la reducción exponencial del valor óhmico a tensión creciente, y el caso inverso a tensión decreciente, ya que su objeto es limitar la corriente residual a valores que puedan ser extinguidos por los explosores. En la característica tensión (corriente de la Figura 2a) puede apreciarse que la resistencia no es sólo dependiente de la tensión, sino que varía inversamente con la temperatura (11).

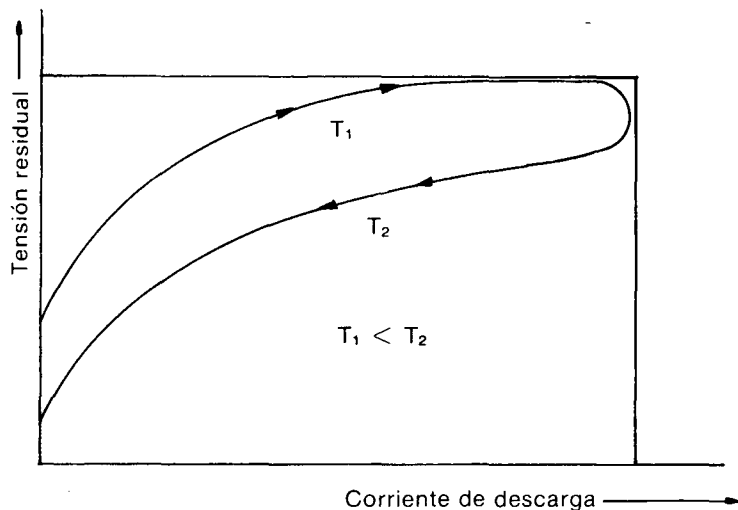


FIGURA 2a. Tensión en la resistencia no lineal de SiC, como función de la corriente de descarga. T_{12} : Temperatura.

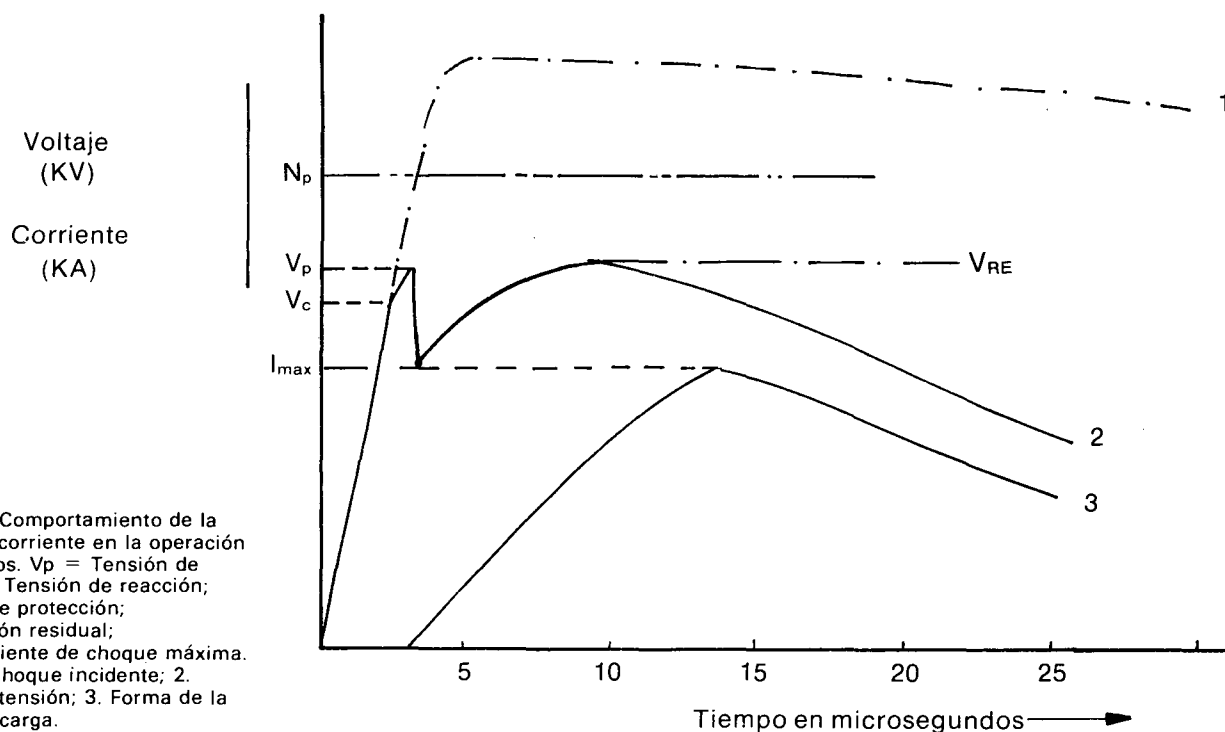


FIGURA 2b. Comportamiento de la tensión y la corriente en la operación del pararrayos. V_p = Tensión de punta; V_c = Tensión de reacción; N_p = Nivel de protección; V_{re} = Tensión residual; I_{max} = Corriente de choque máxima. 1. Onda de choque incidente; 2. Forma de la tensión; 3. Forma de la corriente de carga.

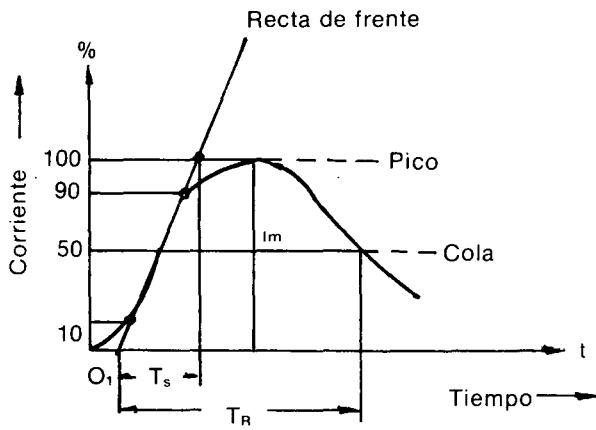


FIGURA 3. Onda normalizada de impulsos de corriente. T_s = Tiempo de frente. T_r = Tiempo de cola, I_m = Valor pico de la corriente, O_1 = Origen de la onda.

FUNCIONAMIENTO

Al incidir sobre el pararrayos una onda de choque (Curva 1 Figura 2b) y superar la tensión de reacción V_c , éste conduce al presentarse el arco en los explosores y la resistencia ofrece un camino para la descarga. La reacción de los explosores toma un tiempo, en el que la tensión alcanza un valor ligeramente superior a V_c , es el valor de punta V_p , momento en el cual la resistencia no-lineal se hace conductora e inicia la circulación de la corriente de descarga (Curva 3 Figura 2b). Existe un punto en el cual la tensión (Curva 2 Figura 2b) alcanza su valor máximo, después de empezar la conducción y éste es el valor de la tensión residual V_{RE} . La tensión residual equivale al máximo voltaje que aparece sobre el pararrayos después de entrar en conducción y es aproximadamente igual a la tensión V_c . Este valor debe encontrarse siempre por debajo del nivel de protección del equipo - N_p -. La tensión V_{RE} es entonces la que en últimas define el nivel de protección del dispositivo para efectos de coordinación del aislamiento (7).

De igual forma la corriente de descarga que circula por el elemento del pararrayos alcanza en un tiempo más lento que el de la señal de choque incidente su valor pico I_{max} , y su forma es la que debe simularse experimentalmente en el laboratorio para reproducir las condiciones a que se ve sometido el pararrayos en su operación normal.

La forma de la onda de choque de corriente ha sido normalizada (1) para los ensayos de pararrayos de distribución en una onda de relación de tiempo de frente a tiempo de cola 8/20 microsegundos (véase Figura 3) con las siguientes tolerancias:

- De 7 a 9 microsegundos para la duración virtual del frente.
 - De 18 a 22 microsegundos para la duración virtual del valor medio de cola.
- Para ésta relación de tiempos 8/20 microsegundos y para un valor pico de corriente de 5.000 amperios se construyó el Generador de Impulsos, del cual se muestra a continuación el proceso de cálculo.

CALCULO DEL CIRCUITO DE IMPULSO

Los circuitos teóricos analizados que permiten generar el impulso de corriente son los siguientes:

- El Circuito Dual del Generador de Impulsos de Tensión.
- El Circuito R L C Serie.

A pesar de la independencia de la corriente que presenta el primer circuito, los inconvenientes que origina su construcción, tales como son el obtener una fuente de 5.000 amperios permanentes, que sea abierta en un tiempo muy corto por un interruptor de esta capacidad, obligaron a desechar esta alternativa.

Se escogió el circuito R L C de la Figura 4a, del cual se aprovecha su respuesta subamortiguada. (Figura 4b).

A partir de las ecuaciones básicas del circuito RLC Serie se obtiene la respuesta general subamortiguada:

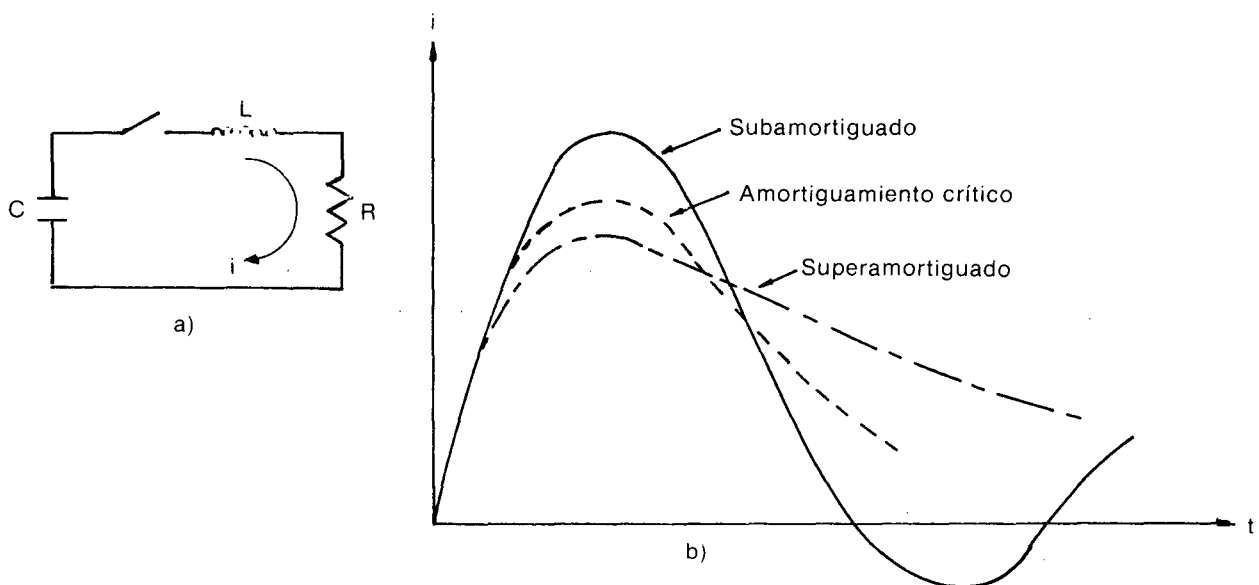


FIGURA 4. a. Circuito R, L, C. b. Respuestas del circuito. Se considera la respuesta subamortiguada para el diseño.

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \cos \omega dt + A_2 \sin \omega dt)$$

Donde: A_1, A_2 son constantes dependientes de las condiciones iniciales

$$\omega d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad \text{Frecuencia resonante natural}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad \text{Frecuencia de resonancia}$$

$$\alpha = R/2L \quad \text{Amortiguamiento exponencial}$$

$t =$ Tiempo

Al considerar almacenamiento de energía únicamente en el condensador las condiciones iniciales son:

$$V_c(O^+) = V_0$$

$$i(O^+) = 0$$

$V_c(O^+) =$ Tensión de carga del condensador en el tiempo cero más.

$i(O^+) =$ Corriente inicial

Estas condiciones varían la respuesta subamortiguada a:

$$i(t) = Ae^{-\alpha t} \text{ Sen}(\omega d.t)$$

la que se aprecia en la figura 4b comparativamente con otras respuestas generales del circuito.

El cálculo de los valores prácticos del circuito RCL presupone gran dificultad, no obstante, empleando la técnica desarrollada por F. Imo y A. Schwab (4) se puede determinar rápida y fácilmente los valores de los elementos requeridos para cualquier tipo de onda.

El método de Imo y Schwab se basa en el empleo de parámetro D, definido como:

$$D = 1 - \frac{4L}{R^2 \cdot C}$$

y en la normalización de las ecuaciones, expresándolas con base en el valor I_{max} de la corriente.

$$i^*(t) = \frac{i(t)}{I_{max}} = \sqrt{\frac{1+D^*}{D^*}} \cdot \exp\left(\frac{tg^{-1}\sqrt{D^*}}{\sqrt{D^*}}\right)$$

$$\exp\left(\frac{-t}{2L/R}\right) \cdot \text{Sen}\left(\frac{t\sqrt{D^*}}{2L/R}\right)$$

con,

$$I_{max} = \frac{2V_0}{R\sqrt{1+D^*}} \cdot \exp\left(\frac{-tg^{-1}\sqrt{D^*}}{\sqrt{D^*}}\right)$$

igualando entre si las ecuaciones de I_{max} dadas, resolviendo para la resistencia R y escribiendo esta última con relación a la resistencia R_0 del amortiguamiento crítico, se llega a la función de resistencia que para el caso subamortiguado es:

$$R^* = \frac{R}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{1+D^*}} \cdot \exp\left(1 - \frac{tg^{-1}\sqrt{D^*}}{\sqrt{D^*}}\right)$$

la función de inductancia puede ahora calcularse para el caso subamortiguado siendo de la forma:

$$L^* = \frac{L}{L_0} = \exp\left(2 - \frac{2tg^{-1}\sqrt{D^*}}{\sqrt{D^*}}\right)$$

De las funciones normalizadas para la Resistencia y

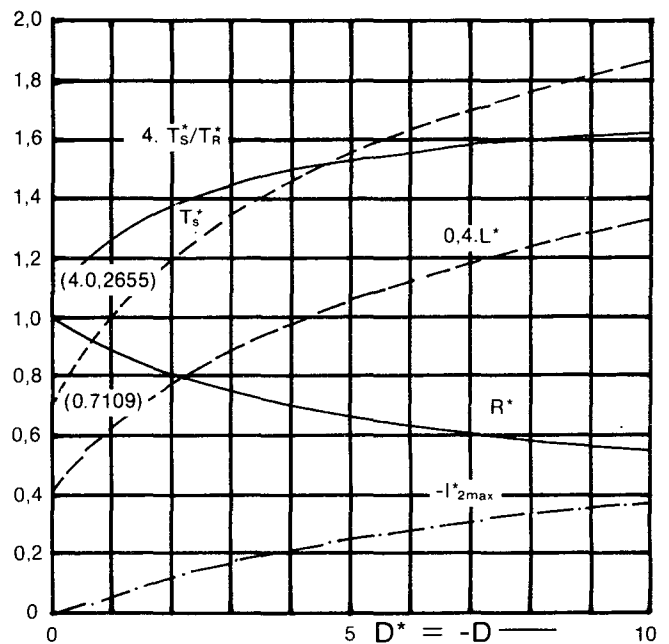


FIGURA 5. Región periódica amortiguada. R^* Resistencia L^* Inductancia, T_s^* Tiempo de Frente, T_s^*/T_R^* Relación de tiempos y la primera amplitud de oscilación de la corriente $-i_{2max}$ como funciones normalizadas del Discriminante D^* .

la Inductancia se despejan los valores de R y L, los cuales se reemplazan en las ecuaciones de i^* .

Si el tiempo se normaliza para el Tiempo Máximo de Amortiguamiento Crítico, se obtienen las funciones de $i^*(t^*)$.

Empleando una normalización para los tiempos de acuerdo a la definición en la Norma IEC 99-1 se llega a las ecuaciones normalizadas de los tiempos de frente y de cola TR^* y TS^* como función de D o D^* . De las relaciones mencionadas (4) pueden obtenerse las gráficas de la Figura 5 que permiten determinar un valor de T_s^* , R^* , L^* y I_{2max}^* .

Elementos componentes

Las condiciones iniciales para cálculo de los elementos del circuito de impulso son las siguientes:

- Tensión de carga : 20 Kilovoltios
- Valor pico del impulso : 5 kiloamperios
- Tiempo de frente T_s : 8 microsegundos
- Tiempo de cola T_R : 20 microsegundos

La relación de tiempos normalizados es:

$$\frac{T_s^*}{T_R^*} = \frac{T_s}{T_R} = 0,4$$

De la figura anterior se obtienen las siguientes cantidades normalizadas:

$$\begin{aligned} D &= 8,0 \\ -i_{2max}^* &= 0,35 \\ R^* &= 0,59 \\ L^* &= 3,1 \\ T_s^* &= 1,75 \end{aligned}$$

A partir de estos valores se calcula el circuito de impulso de corriente:

$$R_0 = \frac{2V_0}{i_{max}^* \cdot e} = \frac{2 \cdot (20KV)}{(5KA) \cdot (2,718)} = 2,943 \text{ Ohmios}$$

$$C = \frac{2 \cdot T_s}{R_o \cdot T_s^*} = \frac{2 \cdot (8\mu s)}{(2,943) (1,75)}$$

$$= 3,1 \text{ Microfaradios}$$

$$L_o = \frac{R_o^2 \cdot C}{4} = \frac{(2,943)^2 (3,1\mu F)}{4}$$

$$= 6,713 \text{ Microhenrios}$$

$$R = R^* \cdot R_o = (0,59) (2,943\Omega) = 1,736 \text{ Ohmios}$$

$$L = L^* \cdot L_o = (3,10) (6,713 \mu H) = 20,81 \text{ Microhenrios}$$

Las magnitudes teóricas necesarias para construir el circuito R, L, C, son entonces:

$$C = 3,1 \text{ Microfaradios}$$

$$L = 20,81 \text{ Microhenrios}$$

$$R = 1,73 \text{ Ohmios}$$

CONDENSADOR

El problema fundamental en la construcción del generador lo constituye éste dispositivo. Se planteó inicialmente la posibilidad de construirlo localmente, pero se encontraron dificultades por los intensos campos eléctricos que aparecen en altas tensiones.

Considerando otras alternativas, se llegó a la más viable, consistente en el uso de unidades de condensadores ya construidas, de las empleadas en el control de reactivos en los sistemas de distribución. Las características de los condensadores de que se dispuso son:

Capacidad nominal	: 6 Microfaradios
Tensión RMS	: 6,6 KV
Tensión DC	: 9,4 KV
Energía	: 265 Julios
Potencia	: 100 KVAR
Marca	: Sangamo

Con estos equipos se formó un banco de dos ramas en paralelo, cada una con cuatro condensadores en serie, como se aprecia en las Figuras 6 y 12, para obtener el condensador del Generador con los siguientes valores:

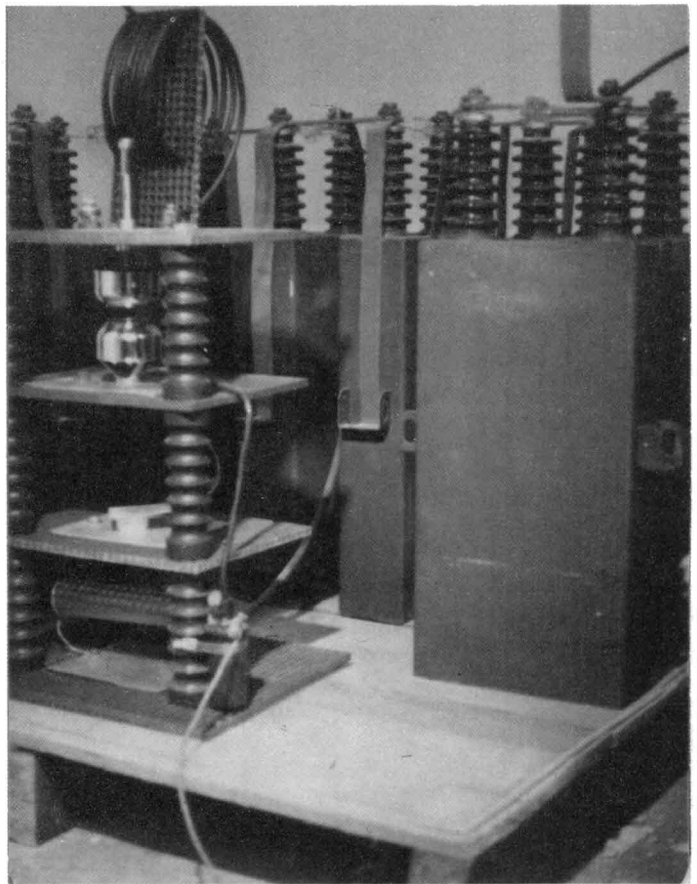


FIGURA 6. Aspecto general del banco de condensadores. Puede apreciarse la plataforma de madera colocada para aislar el banco del piso.

Capacidad	: 3,0 Microfaradios
Tensión DC	: 37,5 kV
Energía	: 2,109 Kilojulios

Una vez constituido el banco fue necesario implementar algunos sistemas de protección del equipo, como son el empleo de explosores para proteger los condensadores individualmente (véase Figura 7) evitando que por una eventual distribución irregular de la tensión entre las unidades pudiesen sobrecargarse unas más que otras. Como complemento a esta medida se unió uno de los bornes de cada

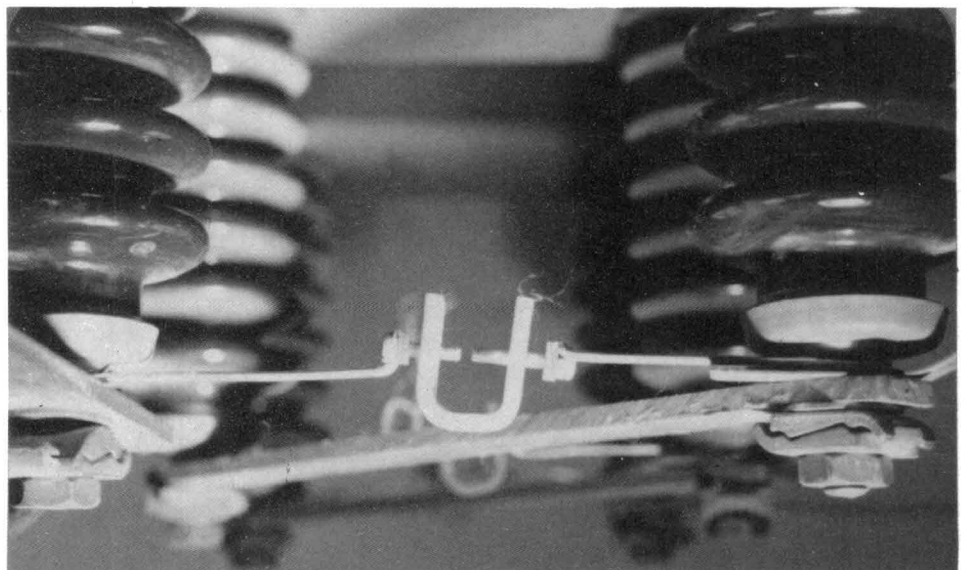


FIGURA 7. Aspecto de los explosores de protección de los condensadores.

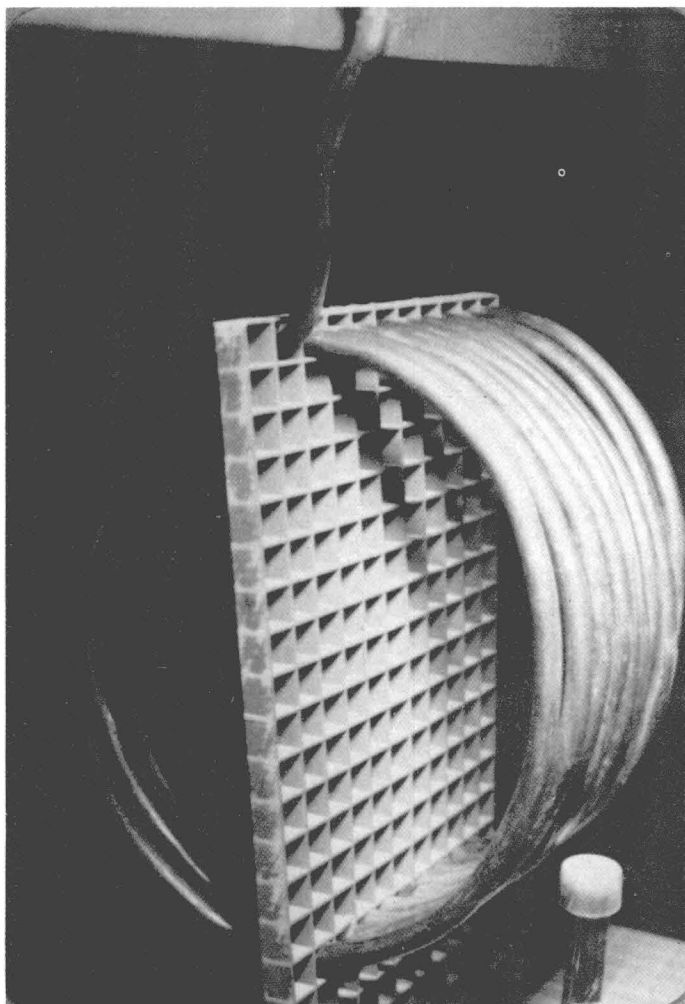


FIGURA 8. Aspecto de la inductancia construida para ajustar la respuesta de los tiempos normalizados de la onda de corriente.

condensador a su carcasa metálica para igualar potenciales entre el cuerpo del condensador y una de sus placas. Esta necesaria medida de protección

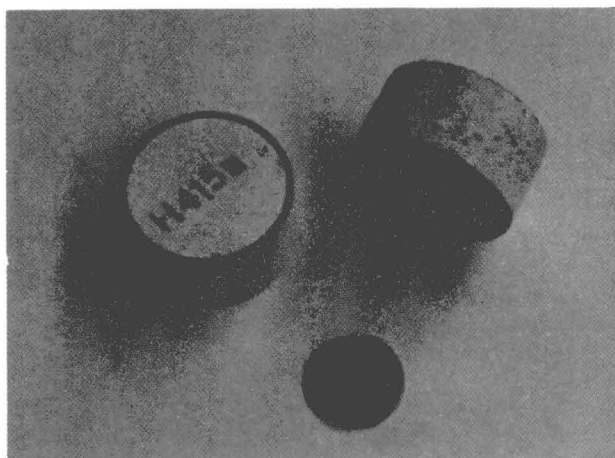


FIGURA 9. Resistencia no-lineal. Aspecto físico y montaje para su ensayo.

trajo como consecuencia que cada carcasa quedó elevada a un potencial respecto de la siguiente y respecto a tierra. Esto se sorteó colocando el banco sobre una plataforma de madera y una lámina de acrílico. (Véase Figura 6).

A partir del valor real de la capacidad del banco, se recalcularon los elementos del circuito:

$L = 21,59$ Microhenrios

$R = 1,79$ Ohmios

Voltaje inicial de carga de los condensadores: 20, 71 KV.

INDUCTANCIA

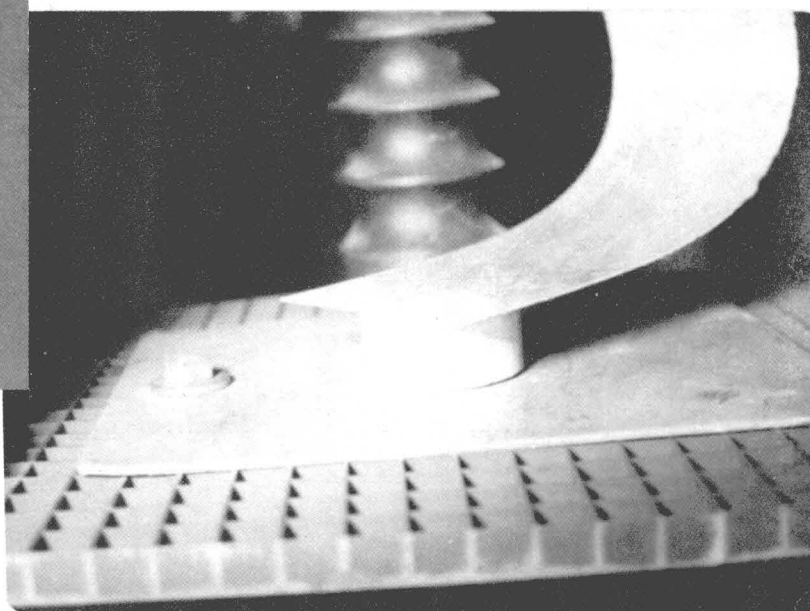
Es el elemento del circuito encargado de definir los tiempos característicos de la respuesta. Se esperaba que el valor fuese alcanzado por la inductancia de los conductores de alimentación y de la columna de disparo y medida. Sin embargo, fue necesario adicionar una bobina con núcleo de aire que en una primera aproximación se calculó con las fórmulas para un solenoide infinito y se ajustó a su valor final mediante ensayo y error hasta obtener los tiempos normalizados.

El aspecto de la bobina concluida se parecía en las Figuras 8 y 13.

RESISTENCIA

El componente resistivo del circuito lo constituye la suma de las resistencias de los conductores, la resistencia de medida y la del objeto de prueba. Las dos primeras mencionadas pueden considerarse despreciables, ya que la que define el circuito es la no-lineal del objeto de prueba. Como se mencionó anteriormente éste valor debe ser muy bajo, lo cual se logra en la parte superior de la característica, donde por efecto de la tensión la resistencia decae a su valor mínimo, que es el requerido por el circuito en la condición subamortiguada.

La forma general de la característica no-lineal se mostró en la Figura 1b. En la Figura 16 se aprecia



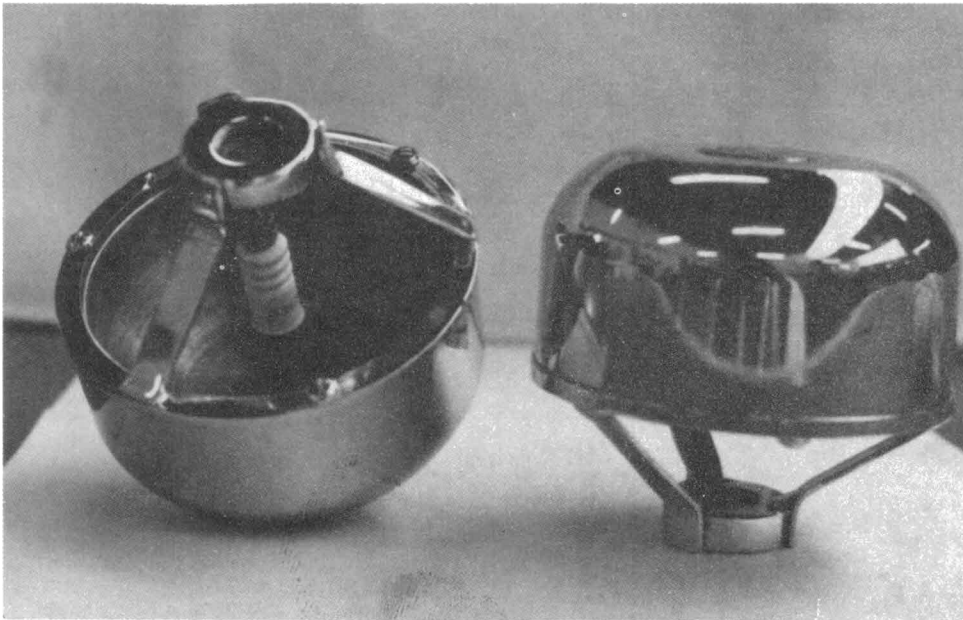


FIGURA 10. Aspectos generales de los explosores.

una parte de la característica obtenida en el laboratorio con el equipo terminado.

El aspecto físico de la Resistencia no-lineal y su montaje se aprecian en la Figura 9.

ENCENDIDO DEL GENERADOR DE IMPULSOS

Para lograr el disparo controlado del generador fue necesario diseñar y construir un circuito electrónico de pulsos, cuya salida es amplificada por una bobina de automóvil y que actúa como iniciador de la descarga en los explosores especialmente concebidos para este propósito (9).

El sistema de explosores consiste en dos semiesferas, una de las cuales recibe la señal amplificada del circuito de disparo y se produce una chispa en una bujía de automóvil alojada en la semiesfera. En la Figura 10 se aprecian estos detalles y las incrustaciones de Wolframio que garantizan un bajo deterioro de la superficie de descarga al circular las altas corrientes.

MEDIDA DEL IMPULSO DE CORRIENTE

Para la comprobación de la correcta operación del generador es necesario garantizar una buena medida de la señal de corriente producida.

El impulso de corriente se mide y visualiza con un osciloscopio de persistencia que se acopla a la resistencia tubular de medida (5) diseñada dentro de este trabajo para tal fin.

Las ventajas de la resistencia tubular frente a otros dispositivos de medida, tales como la bobina de Rogowski, son su forma sencilla de construcción y su calibración. Su principal desventaja radica en la necesidad de referenciar a tierra el circuito en uno de sus extremos (Figura 12).

La construcción de la resistencia tubular se desarrolló según el esquema de la Figura 11, empleando un cilindro de PVC como soporte y como elemento resistivo papel aluminio comercial, con el cual se pudo asegurar una resistencia muy baja de 5,57 miliohmios aproximadamente, que es la adecuada para no cargar el circuito de corriente y para obtener una tensión de medida del orden de 30 voltios.

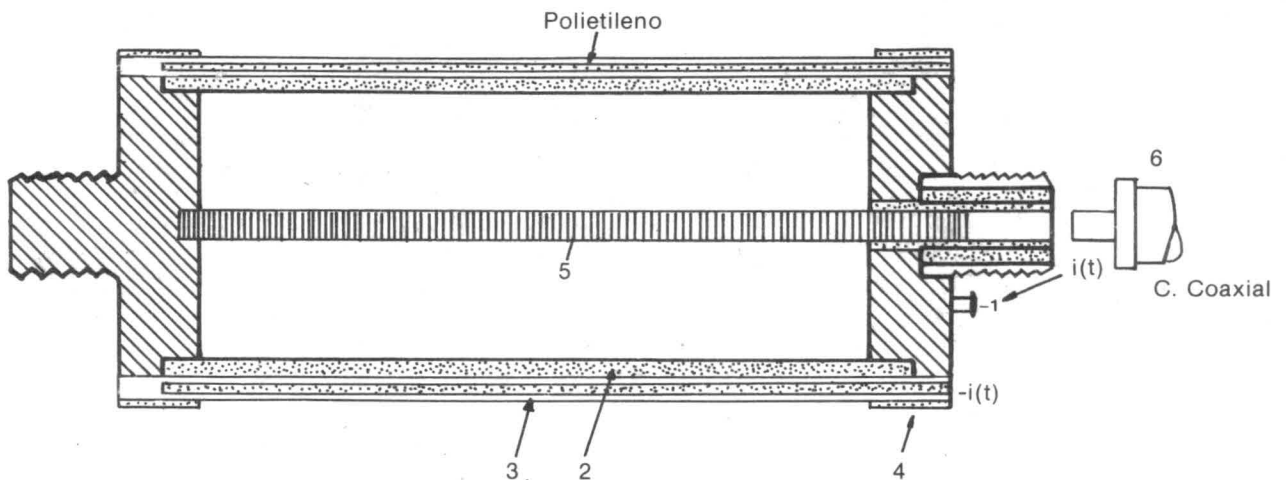


FIGURA 11. Resistencia tubular de medida. 1- Entrada de la corriente. 2- Cilindro interior de papel aluminio. 3- Cilindro exterior. 4- Anillo colector. 5- Conductor interno para la medida de la señal entre los puntos 1 y 5.

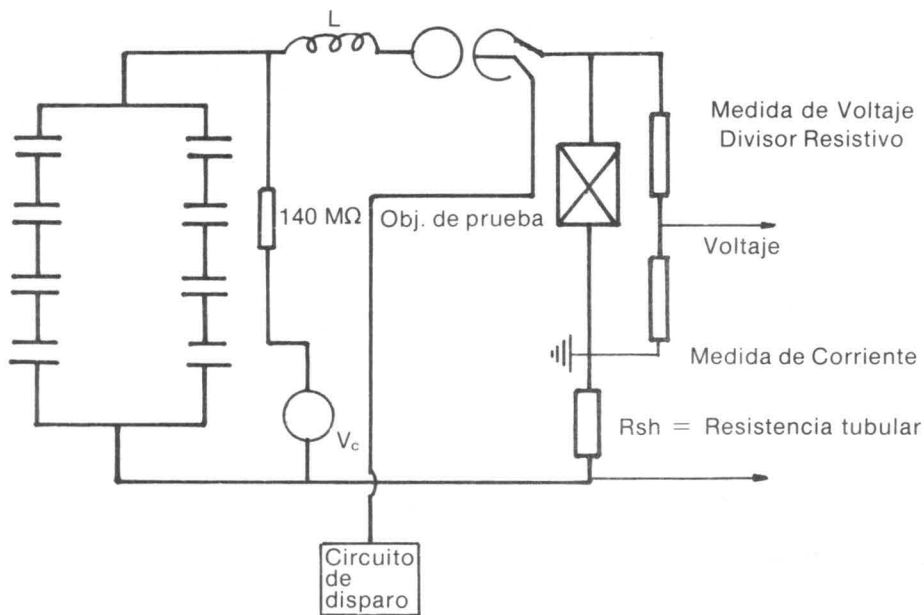


FIGURA 12. Aspecto esquemático del generador de impulso de corriente. Se aprecian sus elementos constitutivos y el sistema de medida.

MEDIDA DE LA TENSION RESIDUAL

Con un divisor resistivo compuesto de dos elementos en serie con valores de 9.500 ohmios y 75 ohm en los lados de alta y baja tensión respectivamente,

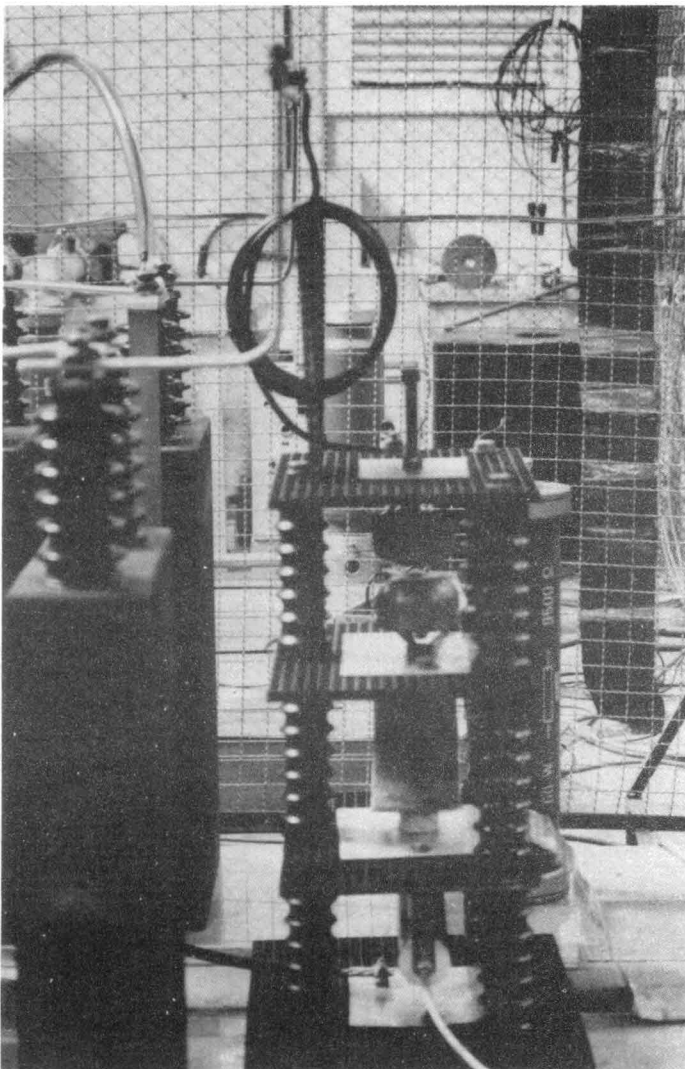


FIGURA 13. Aspecto de la columna con inductancia, explosores objeto de prueba y resistencia de medida.

se logró la lectura de la tensión residual.

Este divisor al igual que la resistencia tubular, se acoplan al osciloscopio mediante un cable coaxial y una resistencia de 75 ohmios que fue necesario construir, a fin de evitar las reflexiones que produce un mal acoplamiento de impedancias.

El sistema de medición puede apreciarse en un diagrama esquemático de todo el generador, incluido en la Figura 12.

RESULTADOS

En las fotografías de las Figuras 6 y 13 se presentan aspectos del generador ya construido donde se reconocen los condensadores que conforman el banco, la bobina, los explosores, el objeto de prueba, la resistencia de medida y el divisor de tensión.

En las Figuras 14 y 15 se incluyen los oscilogramas de corriente y tensión residual resultantes del ensayo de un pararrayos de baja tensión de 250 voltios.

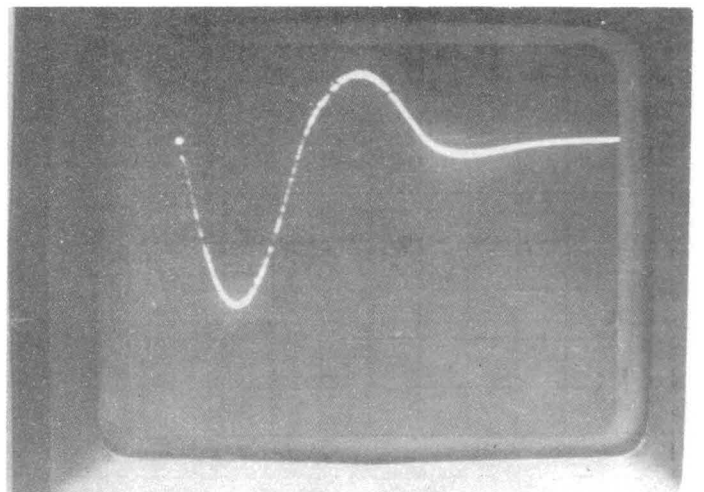


FIGURA 14. Impulso de corriente resultante al ensayar un pararrayos de baja tensión de 250 voltios.

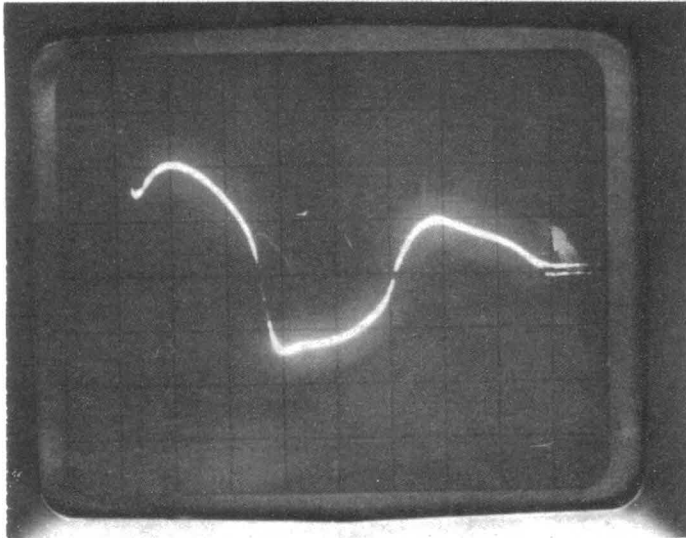


FIGURA 15. Tensión residual resultante al aplicar la onda de corriente de la Figura 15.

La característica oscilante de las señales se debe a la respuesta subamortiguada del generador.

Se anota igualmente que las señales cumplen con los tiempos característicos de 8/20 microsegundos.

Dentro de los resultados se presenta la calibración

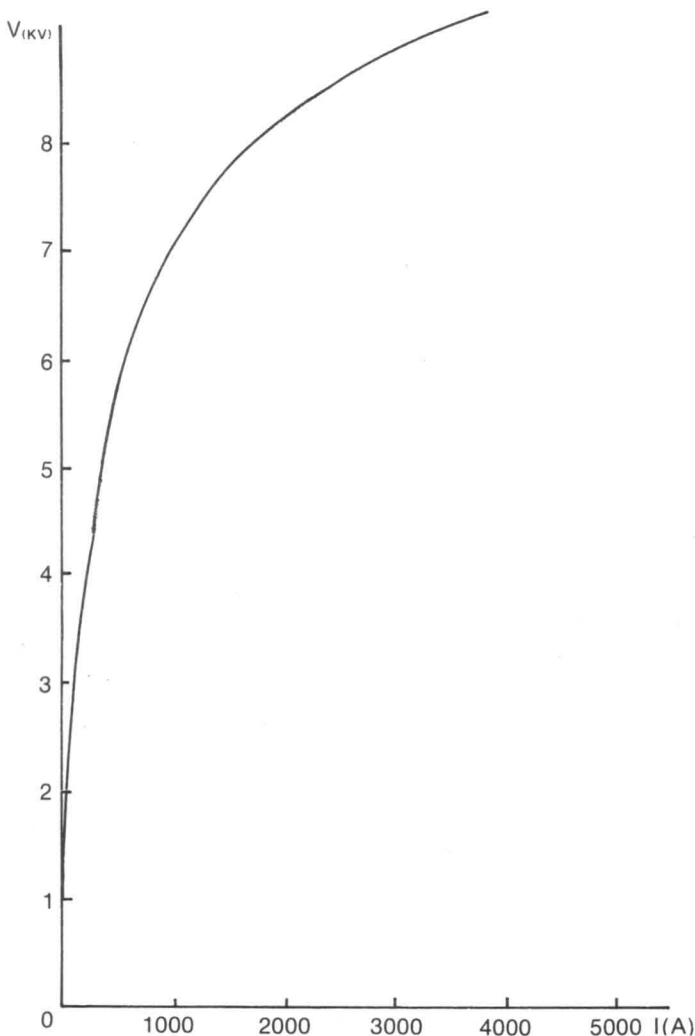


FIGURA 16. Característica no-lineal obtenida para una pasta ensayada en el laboratorio.

de una Resistencia no-lineal de una pasta de pararrayos de 15 KV.

La Figura 16 trae los resultados de este ensayo.

En la Figura 17 se incluyen los oscilogramas de corriente y tensión residual para la pasta de la figura anterior. Puede apreciarse cómo a diferencia de las Figuras 14 y 15 la respuesta aunque es subamortiguada no oscila, por el rápido aumento del valor de la resistencia luego del paso de la corriente por cero.

CONCLUSIONES

El equipo construido puede ser empleado para ensayar parcialmente pastas de pararrayos hasta serie 15 KV y con corrientes hasta 5.000 amperios. Como la tecnología de control y medición está ya desarrollada, puede, en una etapa posterior, ser ampliado para poder llegar hasta los 10.000 amperios que exigen los pararrayos más usados actualmente en el país.

Así, con condensadores de mayor capacidad y voltaje nominal, podría independizarse la respuesta de la resistencia del objeto de prueba.

Con este equipo podrá continuarse una serie de investigaciones en medidas de alta tensión propuestas por el GIAT, como son el desarrollo de una bobina de Rogowski para medida de altas corrientes y el de la calibración de las cápsulas magnéticas empleadas en la investigación de descargas atmosféricas, además de los trabajos de control de la interferencia electromagnética que causaron grandes dificultades en el desarrollo del sistema de medición.

La principal meta que logra este trabajo, es la de constituirse en el primer paso para el desarrollo de los equipos de ensayo de pararrayos y de sistemas de medición en alta tensión en el país, lo cual permitirá garantizar el buen funcionamiento de los

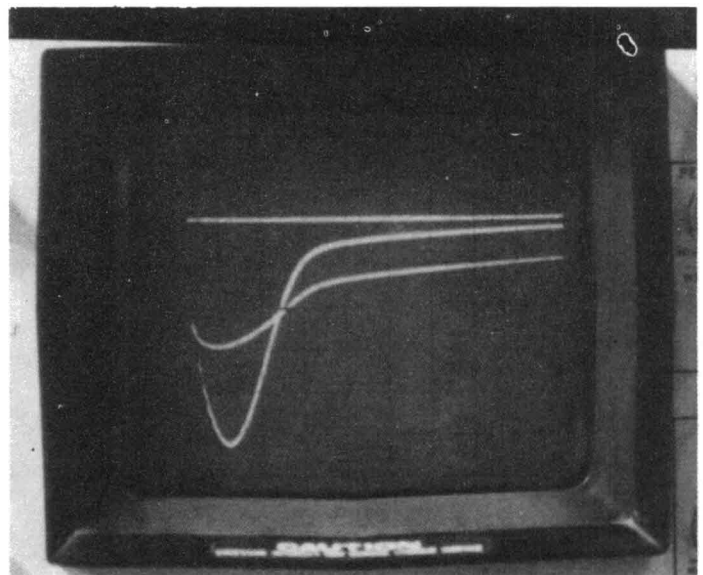


FIGURA 17. Oscilogramas de corriente de choque o descarga (curva con pico más pronunciado) y tensión residual para un ensayo de Pasta de pararrayos con onda de choque de corriente de polaridad negativa. Escala 10 microsegundos/división.

equipos que conforman el sistema eléctrico nacional.

Agradecimientos

Los autores agradecen los aportes de los profesores Dimetri Ivanoff de la Universidad de Sao Paulo Brasil; Keith Cornick de la Universidad de Manches-

ter Inglaterra y del ingeniero diplomado Harmut Lautenschlager de la Universidad de Darmstadt, República Federal de Alemania.

Igualmente agradecen a la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, el préstamo de los condensadores necesarios en la construcción del equipo.

BIBLIOGRAFIA

1. International Electrotechnical Commission, **Lightning Arrester**. Publication 99-1. Part 1: Non-Linear Resistor Type Arrester For a.c. Systems. Ginebra, Suiza, 1970.
2. International Electrotechnical Commission, **High Voltage Test Techniques**. Publication 60. Part 1: General Definitions and test Requeriments. Ginebra Suiza, 1973. Part 2: Test Procedures. Ginebra, Suiza, 1973. Part 3: Measuring Devices. Ginebra, Suiza, 1976. Part 4: Application Guide for Measuring Purposes. Ginebra, Suiza, 1977.
3. Association of German Electrical Engineers, **Generation and Measurement of High Voltages**. Publication 0433. Part 3: Regulations for the Generation and Use of Impulse Voltages and Currents for Testing Purposes. 1967.
4. Schwab A., Imo F., Berechnung Von Stossstromkreisen fuer Exponential Stroeme. (Cálculo de Circuitos de Impulsos de Corriente para Corrientes Exponenciales). Bulletin ASE/UCS Vg 68 (1977) H. 24, S. 1310-1313.
5. Schwab, Adolf. **Hochspannungsmesstechnik (Medidas de Alta Tensión)**. Zweite Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981.
6. Westinghouse Electric Corporation, **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. Pittsburgh, 1950
7. Cotton, H. Barber H. **The Transmission and Distribution of Electrical Energy**. Hodder and Stoughton. London, Sydney, Auckland, Toronto, 1976.
8. Amortegui, F., Bojacá, F., Gómez, C. **Diseño, Cálculos Básicos y Construcción Preliminar de un Generador de Impulsos de Corriente**. Universidad Nacional, Bogotá. Proyecto de Grado 1984.
9. Kind, D. **Einfuehrung in die Hochspannungsversuchstechnik fuer Elektrotechniker**. (Introducción en la Técnica de Ensayos de Alta Tensión para Electricistas). 2o. bearbeitete Auflage Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden 1978.
10. Kobayashi, M.; Mizuno, M.; Aizawa, T.; Hayashi, M.; Mitani, K. **Development of Zinc-Oxide Non-Linear Resistors and their applications to Gapless Surge Arresters**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS 97 N° 4 July/Aug. 1978. pág. 1149-1158.
11. Siemens. **Aparatos de protección contra sobretensiones**. Catálogo HG-21. 1981