

Control de generación de la onda de choque y medición de sus tiempos característicos

La generación y medición de las ondas de choque, que simulan las sobretensiones de corta duración debidas básicamente a descargas atmosféricas, son fundamentales para comprobar experimentalmente el cumplimiento de los requisitos de control de calidad que exigen las normas de fabricación del equipo eléctrico.

En el presente artículo, se tratan estos dos aspectos —generación y medida— mediante el desarrollo de un generador de pulsos para sincronizar el osciloscopio con la producción de la onda de choque y la construcción de un sistema de medida consistente en un divisor resistivo, impedancias de acople y la cabina apantallada para aislar el osciloscopio de las interferencias electromagnéticas./1/

Las construcciones se realizaron en los laboratorios de metalurgia y mecánica del IEI (Instituto de Ensayos e Investigaciones) y en los laboratorios de física de la Universidad Nacional, siendo los primeros desarrollos en el campo de mediciones de alta tensión que adelanta el grupo de investigación en alta tensión GIAT del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional.

FRANCISCO ROMAN CAMPOS

Ingeniero

Profesor asistente

Estudios de Postgrado en Alta Tensión, RFA.

Miembro del Grupo de Investigación en Alta Tensión de la UN — GIAT.

RAFAEL MELO,

CRISANTO PONCE,

NELSON TRIVIÑO

Universidad Nacional

Pag. 33 — 42

Ingeniería e Investigación

Volumen 3 N° 2

Trimestre 1 — 1985

El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Nacional cuenta con un equipo modular para la generación de ondas de choque hasta 140 KV, que se emplea con fines básicamente docentes, aunque permite algunos ensayos de control de calidad a equipos que requieran poca energía, tales como aisladores o pararrayos.

A partir de este equipo básico se construyó un sistema de control y medida para visualizar la onda generada, conocer sus tiempos característicos y observar sus efectos sobre los objetos de prueba.

El proceso para lograr estos objetivos consistió en la construcción de un divisor de bajo valor ohmico, el apantallamiento de osciloscopio, un sistema de electrodos —trigatron— y un generador de pulsos con su sistema de acople para sincronizar el osciloscopio al encendido y corte de la onda.

En el artículo se presenta un análisis global sobre la generación de la onda de choque, sus valores normalizados y posteriormente se describe la forma como se calcularon y construyeron los diferentes elementos.

MONTAJE PARA GENERAR LA ONDA DE CHOQUE

En el Laboratorio de Alta Tensión se dispone de un equipo marca Messwandlerbau para la generación de la onda de choque. Con este equipo y de acuerdo con los elementos que lo conforman —figura 1— se obtiene una onda muy rápida de:

$$T_f = 0.103 \text{ microsegundos}$$

$$T_c = 41.72 \text{ microsegundos.}$$

empleando para este cálculo las fórmulas aproximadas de Roth .

$$T_f = 2.5 * R_d (C_b * C_s)/(C_b + C_s)$$

$$T_c = 0.72 * R_e * (C_b + C_s)$$

Donde:

T_f T_c son los tiempos de frente y de cola en microsegundos.

R_d, R_e : Resistencias de amortiguamiento y de descarga en Ohmios.

C_b, C_s : Capacidades de choque y carga en microfaradios.

La onda generada no es la normalizada, que corresponde a 1,2/50 microsegundos, presentada en la figura 2. En esta se distingue el tiempo de frente (T_f) que está definido como 1,67 veces el intervalo de

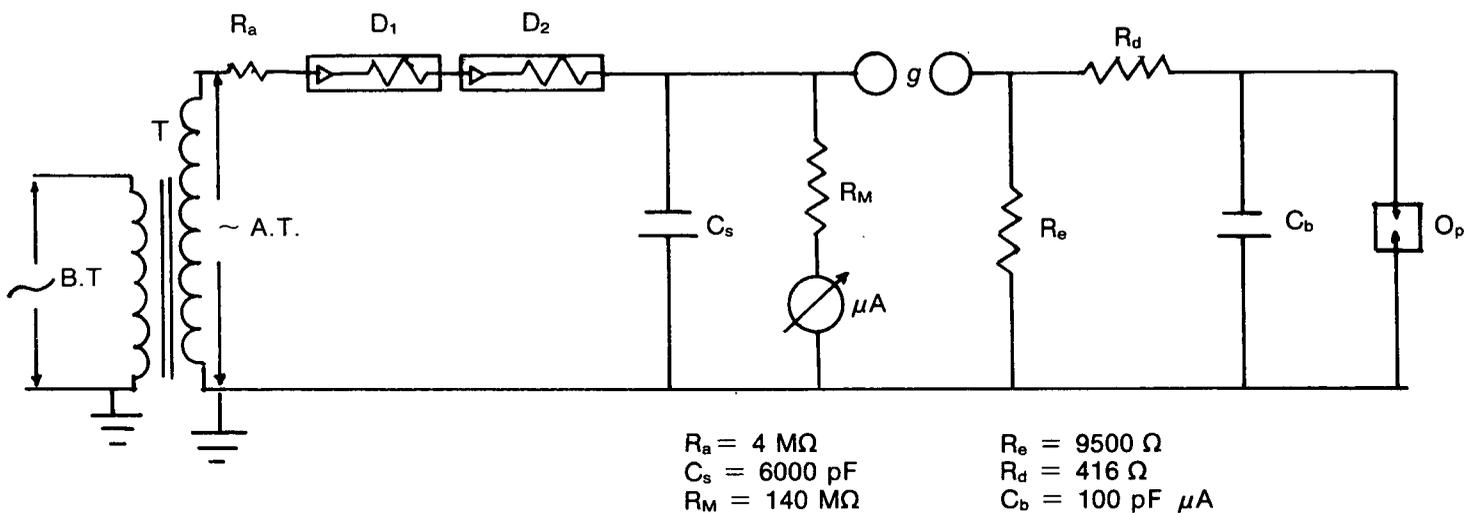


FIGURA 1. Montaje básico para la generación de onda de choque.

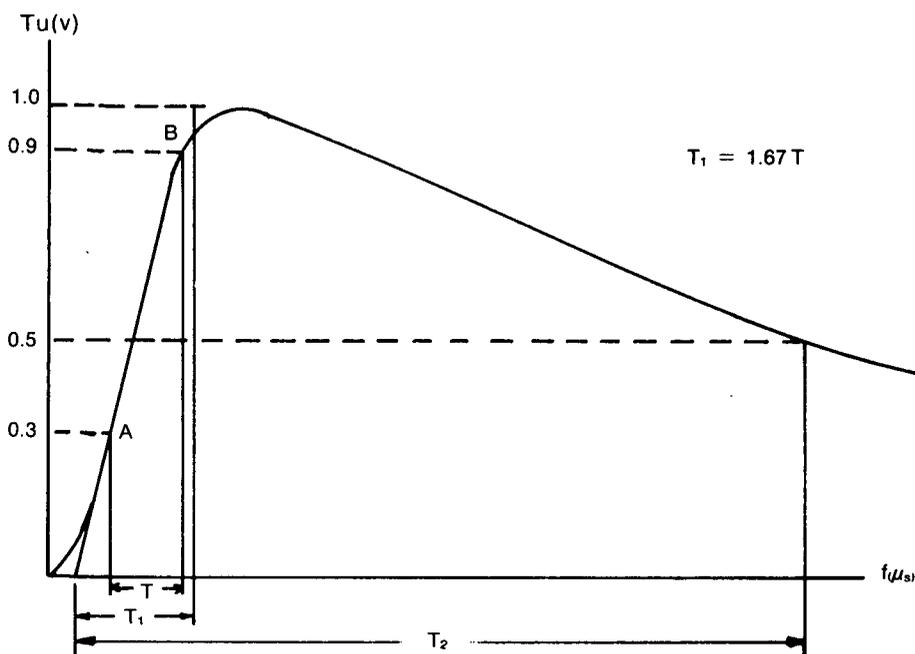


FIGURA 2. Tensión de impulso de onda completa normalizada (1,2/50 s).

tiempo (t) cuando el impulso está entre el 30% y 90% del valor pico y el tiempo de cola (T_c), definido como el intervalo de tiempo entre el origen del impulso y el instante en el cual la amplitud de la

onda cae al 50% de su valor pico. No obstante, las normas dividen en tres ondas típicas las ondas de choque que aparecen en los sistemas eléctricos, a saber:

Onda completa, onda recortada en el frente, onda recortada en la cola, las cuales se aprecian en la figura 3.

Estos tres tipos de ondas pueden presentarse en los equipos durante su operación dentro del sistema de potencia causando serios daños en los devanados de los transformadores, máquinas giratorias u otros aparatos tales como líneas, redes, etc. El daño producido dependería, entre otros factores, del sitio de impacto, del tipo de onda, de la polaridad y de la adecuada coordinación de aislamiento del sistema, entendiéndose este concepto según la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) como: "El proceso de correlacionar la rigidez dieléctrica del equipo, con las características de funcionamiento de los dispositivos de protección de acuerdo con los sobrevoltajes esperados"

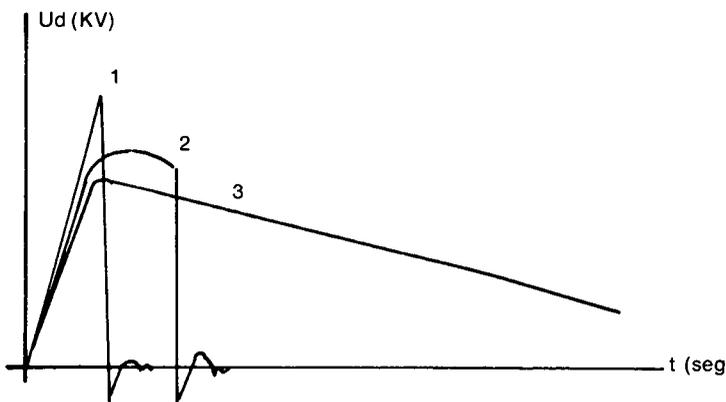


FIGURA 3. Formas típicas de onda de choque. /1/ Recortada en el frente. /2/ Recortada en la cola. /3/ Onda completa.

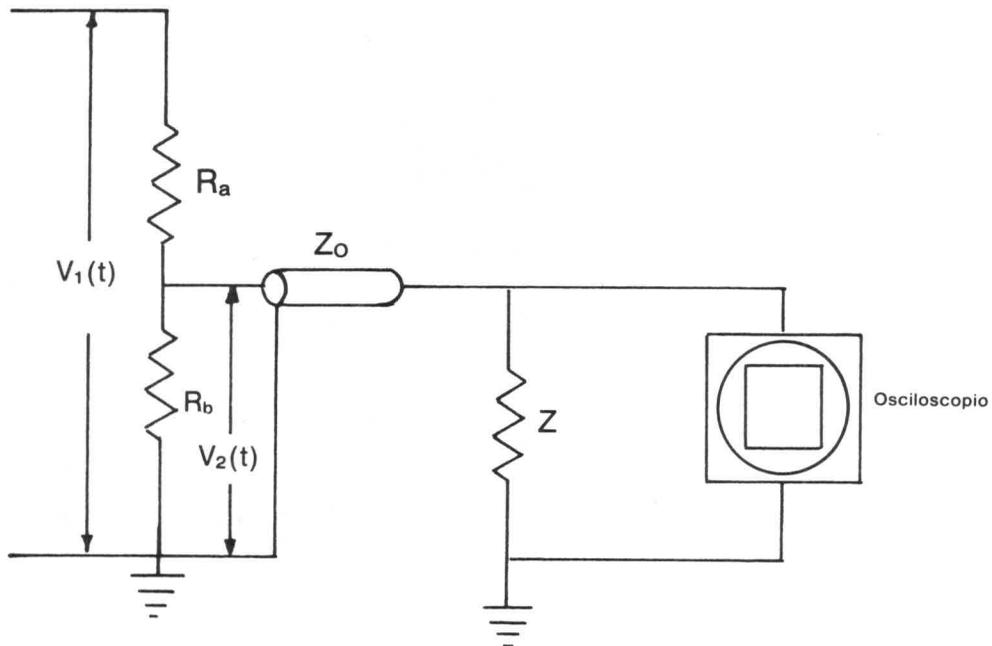


FIGURA 4. Divisor ohmico acoplado mediante cable coaxial al osciloscopio.

El generador de impulsos de tensión es el equipo con el cual se simulan las ondas mencionadas para la realización de ensayos a los prototipos de los aparatos eléctricos que estarán sometidos a su influencia. Por lo tanto, en la correcta medición de las ondas generadas está la garantía de un ensayo, ya que permitirá conocer defectos en la fabricación de los equipos y exactitud en la ejecución de la prueba.

CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDIDA. DIVISOR DE TENSION

El divisor escogido para este trabajo fue el Ohmico por las razones que se exponen a continuación:

- La construcción del divisor Ohmico es relativamente sencilla comparándola con el divisor capacitivo.
- La construcción resulta muy económica.
- Según algunos autores, entre ellos lanovici el divisor resistivo se usa para onda de choque de hasta 2 MV

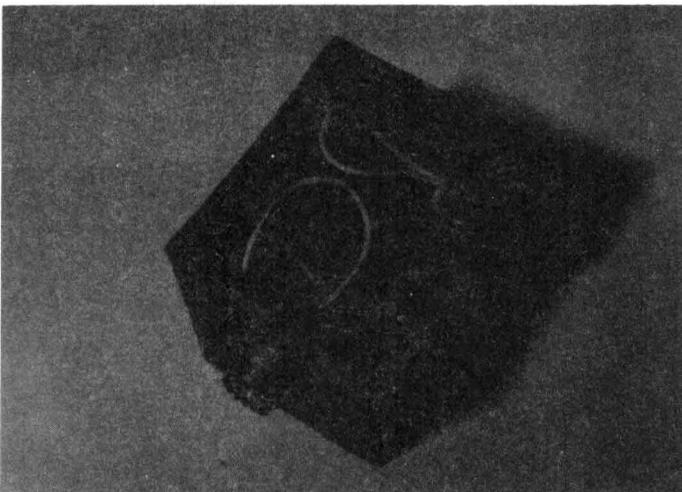


FIGURA 5. Resistencia de acople de 75 ohmios.

- El divisor resistivo escogido para ser construido es de bajo valor ohmico, lo cual hace que el error capacitivo pueda ser despreciable, aunque su efecto sobre la fuente puede ser significativo.
- Según Kuffel este tipo de divisor es aceptable para registrar impulsos normalizados de $1.0/50 \mu s$.

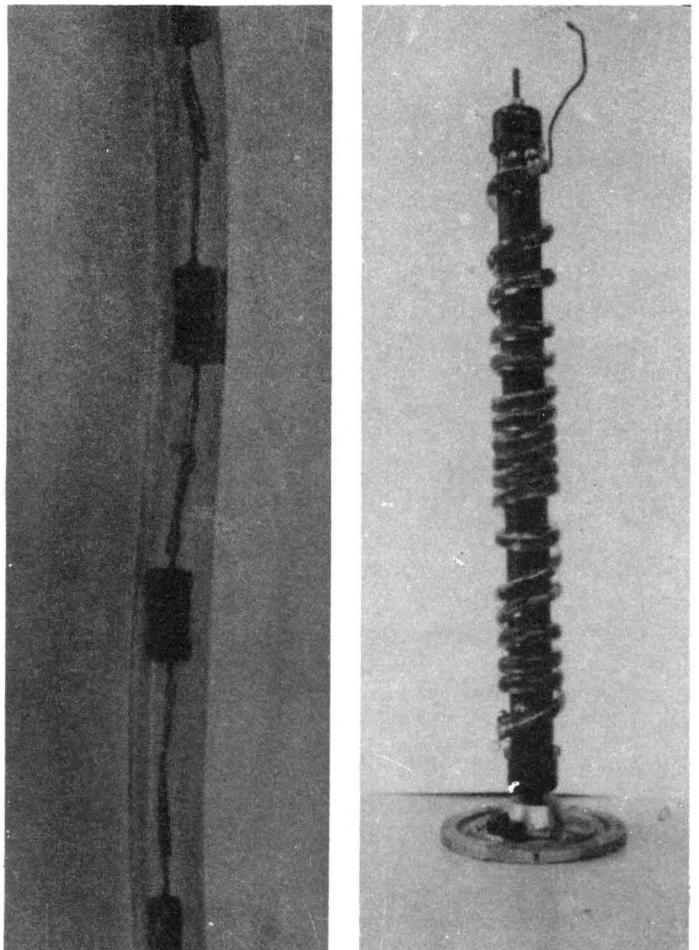


FIGURA 6. Aspectos de la construcción de la Resistencia de Alta Tensión.

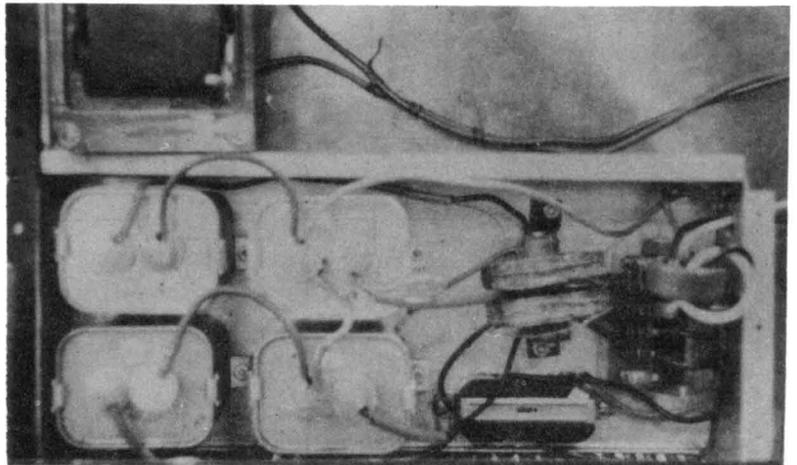
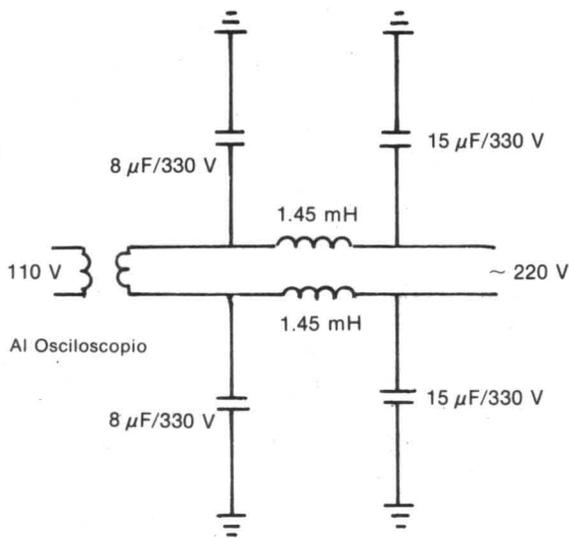


FIGURA 7. Diagrama del filtro intercalado en la línea de alimentación del osciloscopio y su aspecto físico.

Estas y otras razones de carácter práctico tales como rapidez y facilidad de ensamblaje con materiales de fácil consecución en el mercado, tales como tubo PVC y resistencias de carbón, nos decidieron por este tipo de divisor.

El divisor consta de dos (2) resistencias — Véase figura 4— R_a y R_b en serie. La razón de transformación —a— es la relación del voltaje a ser medido $V_1(T)$ y la señal de medida $V_2(t)$ que aparece en los terminales de baja tensión del divisor. En este dispositivo la relación de transformación está dada por:

$$a = \frac{V_1(T)}{V_2(T)} = \frac{(R_a + R_b)}{R_b}$$

Donde:

- R_a es la resistencia de alta tensión.
- R_b es la resistencia de baja tensión.

Para la escogencia de los valores de R_a y R_b , se partió del valor de baja tensión R_b , el cual se igualó al valor de la impedancia característica Z_0 del cable coaxial, que de acuerdo a fórmulas conocidas se determinó en 75 ohmios. Una vez definido este valor y luego de realizar un análisis de ondas viajeras, se decidió acoplar el extremo terminal del cable en el osciloscopio con una impedancia z de igual valor, como se muestra en la figura 4.

La resistencia se construyó con resistencias de precisión de carbón, montadas en una caja metálica de cobre, construida para evitar los problemas de interferencia y con los terminales necesarios para acoplar a la resistencia de alta tensión y al cable coaxial, como se aprecia en la figura 5.

Para el cálculo de la resistencia de alta tensión, fue necesario considerar los siguientes aspectos:

El valor de R_a se determinó a partir de la tensión máxima del divisor ($V_1 = 140$ KV) de la tensión máxima esperada en R_b ($V_2 = 100$ V) y realizado el cálculo que aparece en el anexo 1 se obtuvo el valor de 53 kiloohmios para R_a .

— La potencia disipada y la variación de R_a fue otro

valor de cálculo desarrollado —véase anexo 2—, para escoger el número de resistencias en paralelo y su potencia de diseño.

El tiempo de respuesta del divisor se calculó aproximadamente, ya que se desprecian factores tales como la inductancia del divisor y el efecto de la rama de baja tensión. Este tiempo está dado por la relación:⁹

$$T_t = R * C/6$$

Donde:

- T_t Tiempo de respuesta del divisor (nanosegundos).
- R Resistencia total del divisor (kiloohmios)
- C Capacidad de dispersión a tierra (picofaradios)

Los valores para R de 53.075 $K\Omega$ C de 15 a 20 pf/m se obtiene para T_t un valor entre 0,133 y 0,177 microsegundos.

Considerando que el divisor mide aproximadamente un metro. Este tiempo está dentro de la exactitud requerida para visualizar la cola de la onda de choque y es del mismo orden del frente, lo cual no garantiza exactitud para la señal generada en el laboratorio pero sí para una onda normalizada. Los aspectos constructivos de la Resistencia de Alta Tensión se aprecian en la figura 6.

APANTALLAMIENTO DEL OSCILOSCOPIO

Una de las principales causas de generación de ruido son los campos electromagnéticos que penetran el apantallamiento imperfecto del osciloscopio. Con el fin de controlar la gran interferencia que causa el arco que salta en el explosor de esferas al producirse la onda de choque, se procedió a apantallar el osciloscopio, colocándolo en el interior de una caja metálica construida en lámina de cobre. La interferencia captada por la red de alimentación del osciloscopio se controló con un filtro de RFI y el conductor se arrolló a un núcleo de ferrita, además de separarse la acometida de la red con un transformador de relación de transforma-

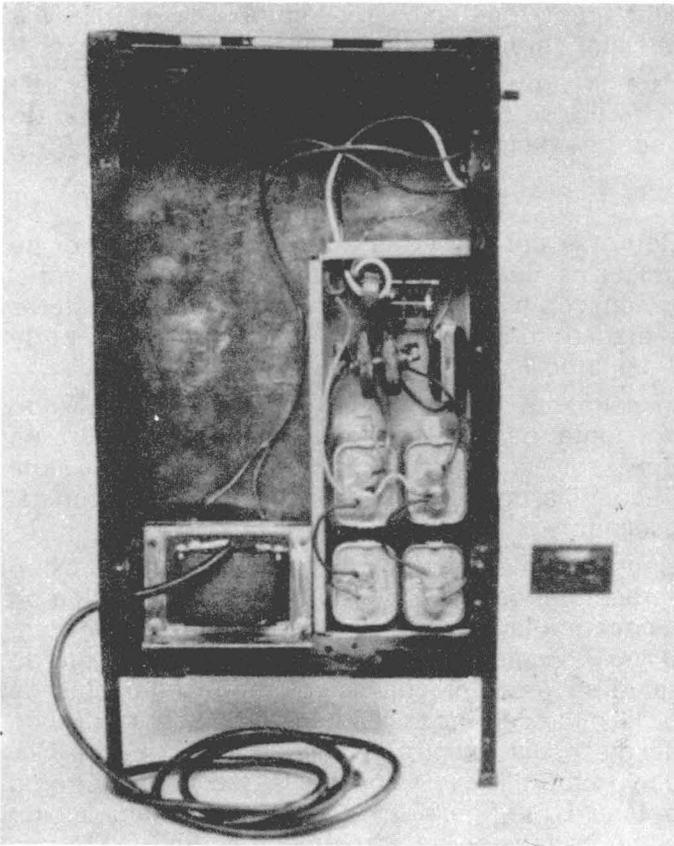


FIGURA 8. Apantallamiento del osciloscopio.



FIGURA 10. Aspecto de los explosores de recorte y encendido. El de la izquierda se fabricó en este proyecto. El derecho es el original de la firma alemana Messwandlerbau.

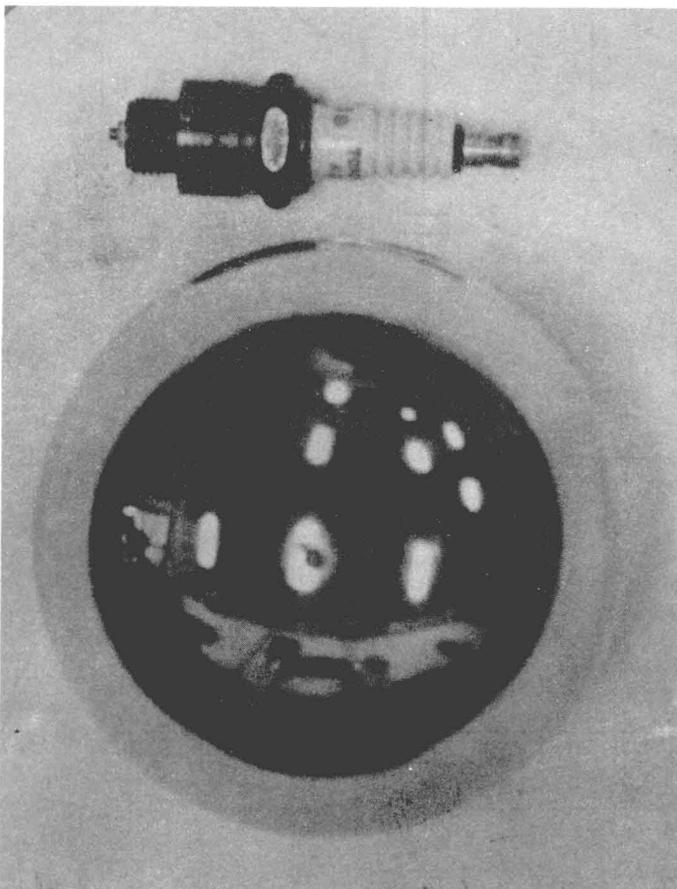


FIGURA 9. Trigatrón. Se observa el hemisferio que aloja la bujía de automóvil.

ción 2:1. Estos detalles del filtro y el apantallamiento concluido se aprecian en las figuras 7 y 8.

SISTEMA DE ELECTRODOS PARA LA DESCARGA

De los diferentes sistemas que se recomiendan para iniciar la descarga se escogió el llamado sistema Trigatron.

El trigatron es un descargador de chispa con excitador constituido por tres (3) electrodos, uno de los cuales es totalmente esférico y el otro puede ser un hemisferio, en cuyo centro se aloja un tercer electrodo de varilla que para el presente caso se formó con el electrodo central de una bujía de automóvil —figura 9.

Para el caso de los explosores de recorte, fue también necesario construir un trigatron, lo cual obligó al desarrollo del sistema mecánico de separación y todo el soporte necesario para las

esferas. Se empleó nuevamente tubería PVC de dos dimensiones, 4" y 6" y los terminales se fabricaron, en fundición de aluminio.

El aspecto terminado de los explosores de recorte se aprecia en la figura 10.

ACOPLE DEL GENERADOR DE PULSOS CON EL TRIGATRON

Para que se presente la disrupción en el espacio q_2 se requiere que la tensión sea del orden del "Voltaje 50% disruptivo" con esferas de 10 cms. de diámetro, que son las aquí empleadas. Como no se desea un encendido aleatorio, debe ordenarse el disparo con un pulso de tensión que asegure la preionización de la zona q_2 y supere el valor crítico de campo eléctrico disruptivo. Lo anterior se logra con una señal del orden de 20 KV de igual polaridad al de la esfera con trigatron, el cual obliga al salto del arco en el espacio disruptivo q_1 —electrodo central de la bujía a la esfera— garantizando la preionización y el encendido del arco en q_2 .

La señal de 20 KV corresponde a un pulso de 5 voltios de amplitud proveniente del generador de pulsos, el cual es amplificado en la bobina B_a y guiado hacia q_1 , a través del condensador C_M de 100 pf y 140 KV.

El potencial de q_1 se fija con la resistencia R_f de 100

kiloohmios que a su vez asegura la carga de C_M a un valor cercano al de C_s .

Para la protección del sistema de control y del operario, se coloca un pararrayos de gas (tubo de neón) paralelo al primario de la bobina.

GENERADOR DE PULSOS

Como se aprecia en la figura 11 el generador de pulsos es el dispositivo encargado de sincronizar el osciloscopio con el encendido de las esferas —disparo del trigatron T_1 — y el posterior corte —Trigatron T_2 .

Inicialmente se produce el disparo del barrido horizontal del osciloscopio; para esto se utiliza un pulso de cinco (5) voltios de amplitud y una frecuencia de 20 MHz provenientes de un cristal oscilador.

La señal a medir se envía a las placas de deflexión vertical del osciloscopio con un retardo de tiempo respecto a la primera señal, que puede variar entre 0.1 y 0.45 microsegundos. Figura 12. Este retardo se logra mediante un selector con intervalos de 0,05 microsegundos. La señal aparece a la salida del dispositivo electrónico con una amplitud de 12 v dc y una polaridad selectiva, la que, al pasar por la bobina B_a —figura 11— es transformada en un pulso de tensión de aproximadamente 20 KV, que

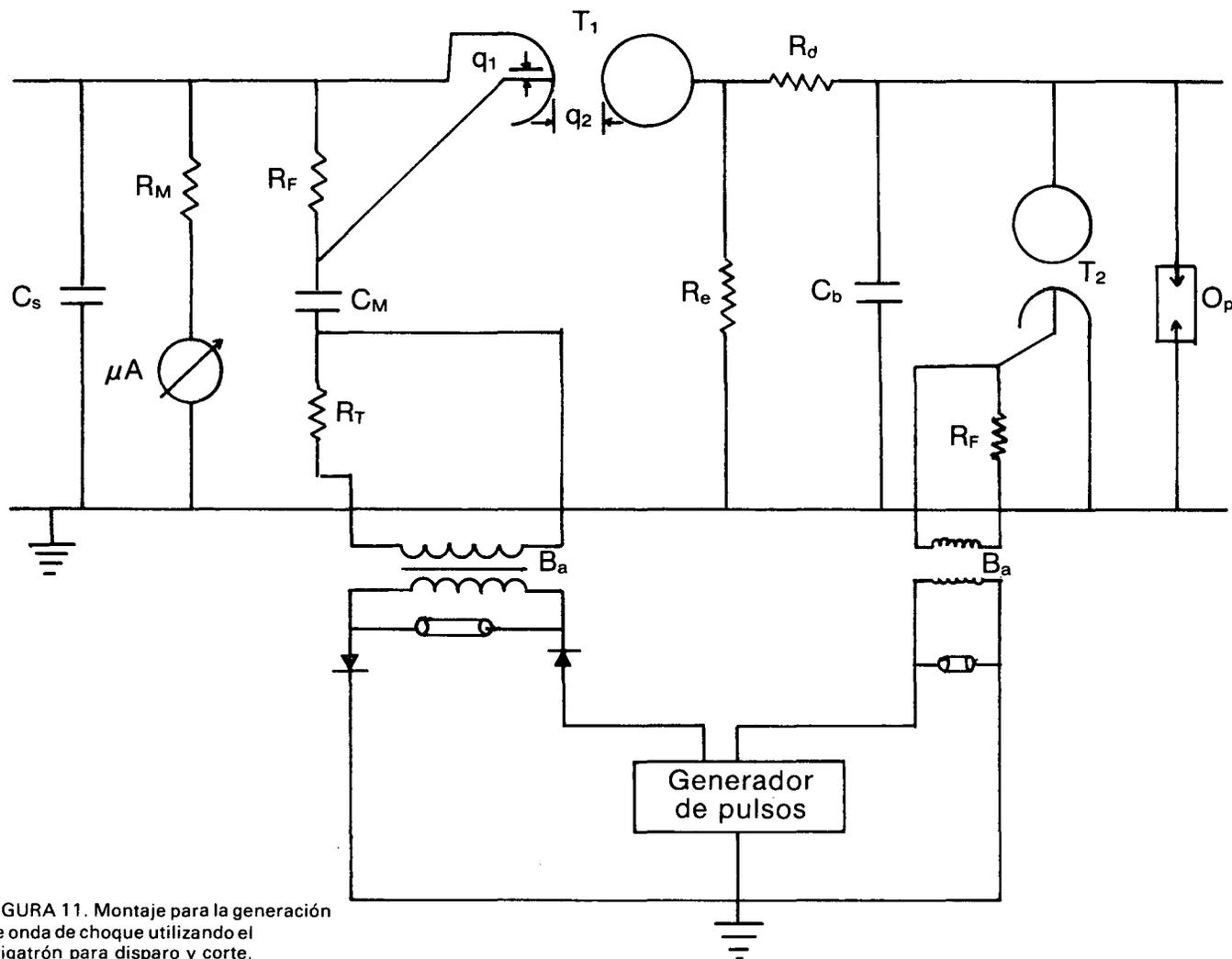


FIGURA 11. Montaje para la generación de onda de choque utilizando el trigatron para disparo y corte.

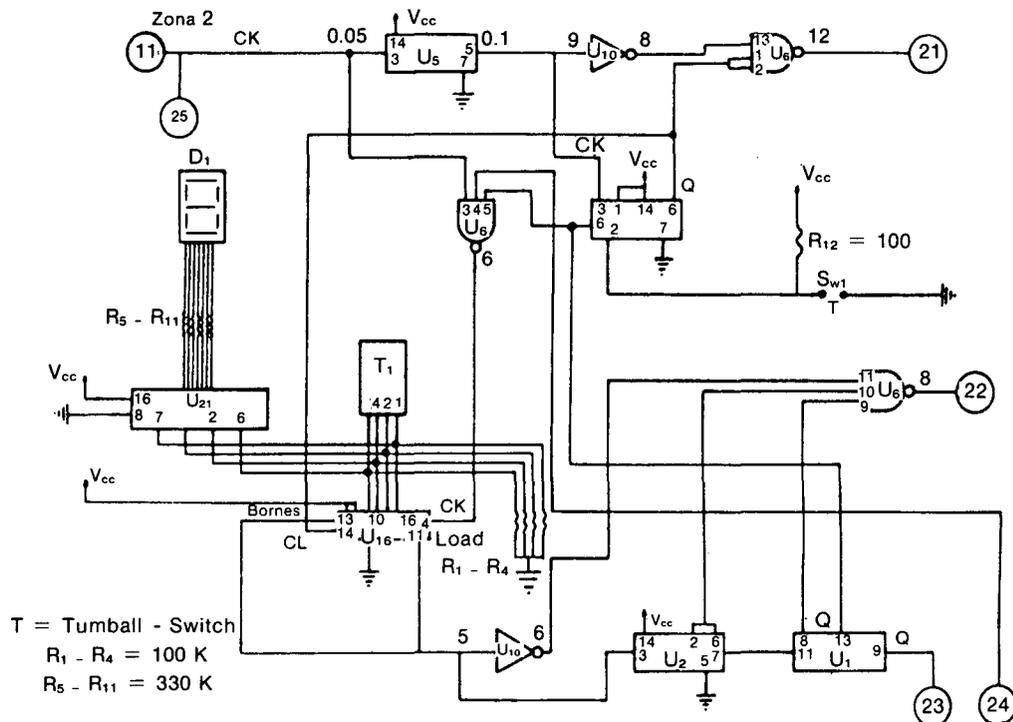


FIGURA 12. Circuito del generador de pulsos que permite obtener el disparo del trigatrón T₁.

produce el encendido del trigatron T₁, para que aparezca en el osciloscopio una onda completa (sin recortes en el frente).

Con este mismo principio de operación actúan el corte de la onda en el frente y en la cola —figura 13.

PRUEBAS

Una vez concluida la construcción del sistema de medida es necesario garantizar que cumpla las siguientes condiciones.

- La tensión que aparece en el lado de baja impedancia debe ser fiel representación de la tensión aplicada.
- El divisor debe ser independiente de la tensión,

de la frecuencia y de la polaridad.

- Su relación de transformación debe ser independiente de las influencias externas, tales como temperatura, presión y humedad.
- La influencia del divisor sobre el circuito que se mide debe ser pequeña o medible.

La comprobación del cumplimiento de los requisitos arriba mencionados, se realizó con las siguientes pruebas:

- Se midió el porcentaje de variación de la resistencia de alta tensión R_a al variar la corriente que circula a través de ella, no encontrándose un cambio apreciable en su valor.

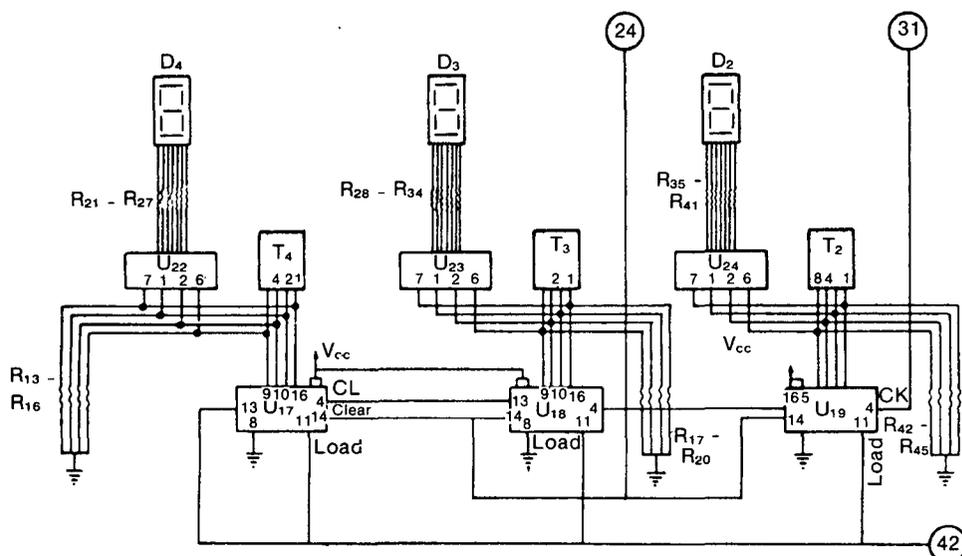


FIGURA 13. Circuito del generador de pulsos que permite obtener el disparo del trigatrón T₂, para recorte en la cola.

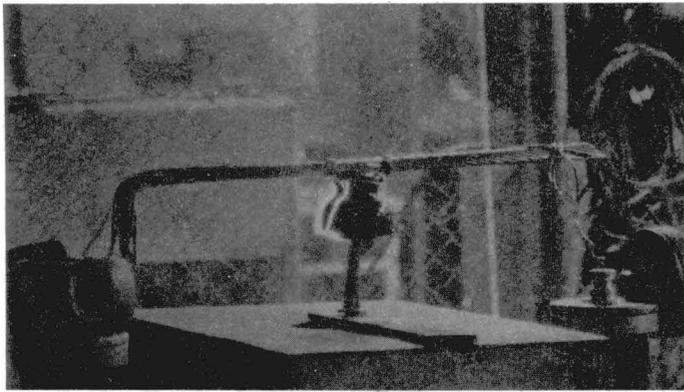
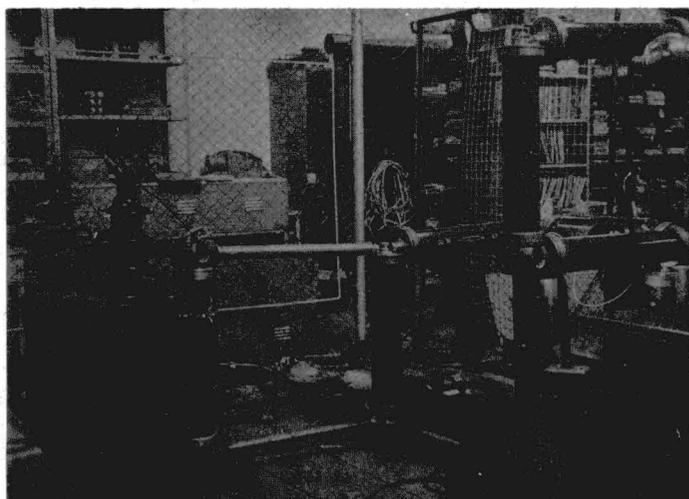


FIGURA 14. Disrupción en aislador con onda de choque.



FIGURA 15. Onda de choque completa se aprecia la sincronización del osciloscopio.

- Se comprobó la relación de transformación del divisor encontrándose una diferencia que crece linealmente con el aumento de la tensión, debida fundamentalmente al aumento de la temperatura, pues se empleó corriente alterna en esta prueba de larga duración.
- Se detectó la interferencia electromagnética operando inicialmente el cable coaxial en circui-



to abierto y posteriormente cortocircuitados, obteniéndose señales de ruido despreciables.

- El último ensayo corresponde al de calibración del osciloscopio empleando un sistema de electrodos esfera-esfera, con lo cual se comprobó la relación de transformación.

RESULTADOS

La práctica docente de onda de choque se realizaba tradicionalmente en el Laboratorio de Alta Tensión del IEI, como se muestra en la figura 14. Con objetivos únicamente demostrativos, pero sin medición asociada.

A partir del desarrollo del proyecto que se describe en este artículo, se logra una visualización de la onda de choque sincronizada con el osciloscopio como se aprecia claramente en la figura 15. En esta figura se encuentra una onda de choque negativa completa con un tiempo de cola de 40 microsegundos. El frente de la onda no puede ser apreciado porque el osciloscopio es muy lento —500 KHz.

Otra interesante comprobación de la utilidad del equipo desarrollado se aprecia en la figura 16.

La fotografía 16/a muestra el montaje para aplicar la onda de choque a un transformador de 25 KVA, 13.2 KV/120-240 V, 60 Hz, aislado en aceite.

En la fotografía 16/b se nota claramente la respuesta oscilatoria del voltaje de choque debido a que la capacidad del transformador y adicionalmente su efecto inductivo es notorio.

Este ejemplo nos indica la limitada aplicación del generador de choque de que se dispone por su poca energía.

Un último ejemplo se presenta en la figura siguiente, donde se evidencia el efecto de los electrodos de corte en una onda de choque cortada aleatoriamente en la cola.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo pueden considerarse como un aporte al desarrollo del Laboratorio Docente de Alta Tensión del IEI y son el inicio de las investigaciones en Medidas de Alta Tensión que

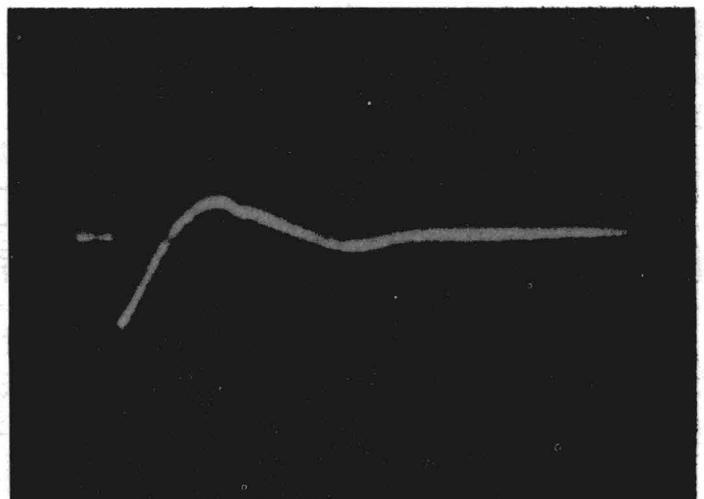


FIGURA 16. Prueba del transformador con onda completa. a) Montaje para ensayo del transformador. b) Oscilograma de tensión resultante.

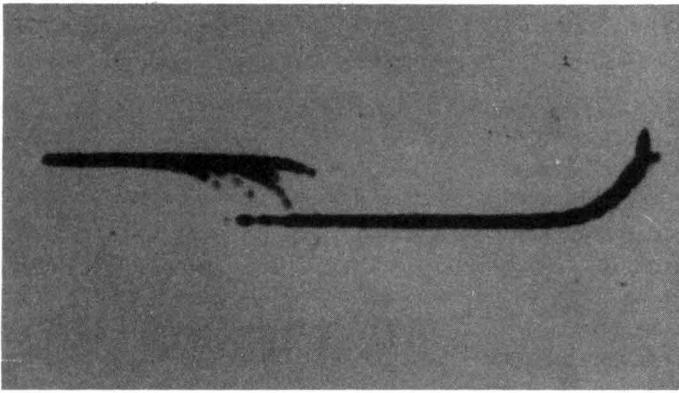


FIGURA 17. Onda de choque cortada en la cola aleatoriamente.

del divisor empleando métodos computacionales que están en desarrollo.

En cuanto al generador de pulsos, se hace necesario profundizar en su apantallamiento, ya que se le encontró sensible a interferencias electromagnéticas, lo cual posiblemente obligue a variar el circuito de control empleado.

Las resistencias de alta tensión construidas han abierto las puertas a futuros desarrollos que nos permitirán ampliar el equipo con construcciones locales que se adapten al sistema modular y que puedan ser adoptadas por otras instituciones que tengan interés en desarrollar laboratorios docentes en esta área:

adelanta el Grupo de Investigación en Alta Tensión —GIAT.

El trabajo plantea un futuro desarrollo de divisores de otros tipos como son el capacitivo y el ohmico compensado; además de la construcción de otros divisores ohmicos con técnicas diferentes; todo esto apoyado con simulación del comportamiento

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los aportes del profesor de física de la Universidad Nacional Aaron Ortega, del ingeniero diplomado Joachim Dams de la Universidad de Karlsruhe, Alemania Federal y de los señores estudiantes Francisco Amórtégui y Gabriel Jaramillo.

ANEXO 1

Cálculo de la resistencia de alta tensión

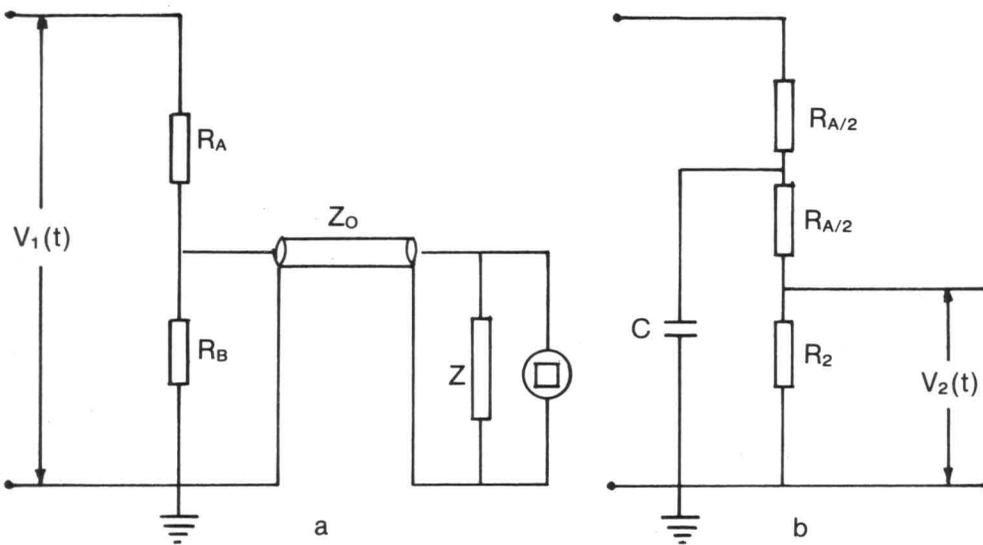


FIGURA A1. a) Diagrama de conexión del divisor ohmico. b) Diagrama equivalente del circuito. C = Capacidad equivalente a tierra, R₂ = Resistencia equivalente de baja tensión.

Para calcular el valor de la resistencia de alta tensión se considera el esquema de la figura A1a y su circuito equivalente de la figura A1b, a partir de la cual se realizan los cálculos siguientes:

$$R_A + R_2 \gg R_2 \quad Y \quad Z_o = Z$$

$$R_2 = \frac{R_B Z}{R_B + Z} \quad R_B = 75 \Omega \quad Z = 75 \Omega$$

$$R_2 = \frac{75 \times 75}{150} = 37.5 (\Omega)$$

a = Relación de transformación

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_A + R_2}{R_2}$$

$$R_A = \frac{V_1 - V_2}{V_2} * R_2$$

$$V_1 = 100 \times 10^3 \times \sqrt{2} \text{ Vol}$$

$$V_2 = 100 \text{ voltios}$$

$$R_A = \frac{(100 \times 10^3 \times \sqrt{2} - 100) \text{ V}}{100 \text{ V}} \times 37.5 \Omega = 52995.51 \Omega$$

$$R_A = 53 \text{ K}\Omega$$

La relación de transformación es:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{100 \times 10^3 \times \sqrt{2} \text{ V}}{100 \text{ V}} = 1414.2$$

ANEXO 2

Cálculo de la potencia de la resistencia de alta tensión

Cuando el condensador de choque C_s se encuentra cargado, tiene almacenada una energía potencial eléctrica igual a:

$$W \text{ (Julios)} = 1/2 C \text{ (Faradios)} \times U^2 \text{ (Voltios)}^2 \quad (1)$$

En el momento en que se produce la disrupción a través de los explosores (T_1), se produce un flujo de N_i portadores móviles de carga del condensador C_s hacia la resistencia de alta tensión (R_A), es decir, hay una circulación de corriente a través de R_A apareciendo una generación de calor, efecto Joule:

Joule:

$$W \text{ (Julios)} = I^2 \text{ (amperios)}^2 \times R \text{ (ohmios)} \times t \text{ (segundos)} \quad (2)$$

Esta energía calorífica se manifiesta mediante la generación de calor (Q), lo que ocasiona una variación de temperatura (Δt) en la resistencia:

$$Q = C_c \cdot M_c \cdot \Delta t \quad (3)$$

Q = energía desprendida en forma de calor

C_c = calor específico del material

M_c = masa del material

Δt = variación de temperatura

igualando (1) y (3) tenemos:

$$1/2 * CU^2 = C_c M_c \Delta T$$

$$1/2 CU^2 = C_c \Delta T \text{ y } cA1 = C_c \Delta t \text{ y } cV$$

$$\Delta t = 1/2 CU^2 / c_c \gamma c v$$

donde: γc = densidad específica del material

V = volumen de la resistencia

Para nuestros cálculos tenemos los siguientes datos:

$$C = C_s = 6000 \text{ pF}$$

$$U = 100 \text{ KV}$$

La resistencia utilizada es de carbón, material para el cual:

$$C_c = 0.6696, \dots, 1.674 \text{ (Wseg/gr.K)}$$

$$\gamma_c = 2.2, \dots, 2.3 \text{ (9/K)}$$

$$\Delta TV = 1/2 CU^2 = 40.73, \dots, 15.58 \text{ (K cm}^3\text{)}$$

Ahora se procede a calcular el volumen de la cadena de resistencias, así:

$$V = 28 \times \pi r^2 l = 28 \times \pi \times (0.2)^2 \text{ cm}^2 \times 2.5 \text{ cm} = 8.80 \text{ cm}^3$$

$$\text{Ahora: } \Delta TV = 40.73, \dots, 15.58 \text{ (K cm}^3\text{)}$$

$$\Delta T = \frac{40.73, \dots, 15.58}{V} \text{ (K cm}^3\text{)}$$

$$\Delta T = \frac{40.73, \dots, 15.58}{8.80 \text{ cm}^3} \text{ (K cm}^3\text{)}$$

$$\Delta T \text{ (K)} = 4.63, \dots, 1.77 \text{ (K)}$$

Entonces, con una disipación de potencia de 60 vatios, la resistencia solo puede calentarse máximo un $\Delta T = 4.63\text{K}$ o sea un $\Delta T = 4.63^\circ\text{C}$.

En un segundo la resistencia disipa 60 vatios, pero la onda de choque tiene una duración de 50 σ seg, en este tiempo la resistencia disipa 3 m watt; por tanto, las resistencias componentes de R_A se escogieron con potencia de medio vatio.

BIBLIOGRAFIA

- Melo, R.; Ponce, C.; Triviño, N. "Generador y medida de tensiones de impulso y construcción de un generador de pulsos para encendido y corte de la onda de choque principal". Proyecto de Grado. Universidad Nacional, 1984.
- Roth, Arnold. "Teoría de la alta tensión". Editorial Labor S.A., Barcelona, Madrid, Buenos Aires, Rio de Janeiro, México, Montevideo. 1966. Pág. 526-527.
- IEEE "IEEE Standard Techniques for High-voltage Testing". ANSI/IEEE STD. 4-1978. Power System Instrumentation and Measurements Committee of IEEE Power Engineering Society, 1978
- International Electrotechnical Commission High Voltage Test Techniques. Publication 60. Part 2 — Test procedures. Ginebra, Suiza, 1973.
- IEEE. "IEEE Guide for Transformer Impulse Test". IEEE N° 93-657-98. the Institute of electrical and Electronics Engineers, New York, 1968.
- Henríquez H., Gilberto. "Técnica de las altas tensiones". volumen II. Editorial Limusa, México, 1976.
- Ianovici, M. "Measurements in HV Systems". Universidad del Valle. Cali, Abril de 1983.
- Kuffel, E. and Abdullah, M. "High-voltage Engineering". Pergamon Press Ltd., 1970.
- Kind, Dieter. "Introducción a la técnica de ensayos de alta tensión". ISBN 3-5281-3805X. Mit 181 Bildern, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden, Germany West. 1972-1978. Título en alemán: "Einführung in die Hochspannungsversuchsnik".
- Schwab, Adolf J. "High-voltage Measurement Techniques". The M.I.T. Press, 1972.
- British Power Engineering. "Triggering Spark Gap". London, July, 1960.