

# Repotenciación de un generador de impulsos de tensión

## *Re-potentialtion of a generator of impulses of voltage*

Orestes Hernández Areu<sup>I\*</sup>, Dailen García del Sol<sup>I</sup>, Ernesto Díaz Alfonso<sup>I</sup>, Frank Grau Merconchini<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Cuba

<sup>II</sup>Universidad de Oriente (UO), Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor de correspondencia: [orestesh@electronica.cujae.edu.cu](mailto:orestesh@electronica.cujae.edu.cu)

Recibido: 19 de julio de 2023

Aprobado: 25 de septiembre de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

### RESUMEN/ABSTRACT

Los generadores de impulsos de rayos son equipos muy costosos que se emplean para comprobar el nivel básico de aislamiento de los elementos que operan en los sistemas eléctricos de potencia. El generador de impulsos del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), fue fabricado en la antigua Alemania del Este, y al desaparecer el Campo Socialista quedó sin soporte ni opción de acceder a refacciones, por lo que, a los diez años de explotación, comenzó a tener averías recurrentes en los circuitos que comandaban su funcionamiento. Esto lo llevaron a la baja técnica. El objetivo de este trabajo fue devolver la funcionalidad de este equipo. Se comprobó la estabilidad de su operación, obteniéndose las formas de ondas establecidas para las pruebas de impulsos, también se obtuvo la relación del divisor de tensión y la relación entre la tensión pico de salida y la tensión r.m.s. de carga del generador.

**Palabras clave:** alta tensión; generador de impulsos.

*The lightning impulse generators are expensive equipments that are used to check the basic insulating level of the elements that operate in the electrical power systems. The impulse generator of the Center of Researches and Electric-energetical Tests was manufactured in the ancient East Germany, and when the Socialistic Field disappeared, left it without support neither option of repairing, because of this, at the age of ten years of exploitation, it began to have recurrent damages in the circuits that commanded its functioning. This took it to the technical drop. The objective of this work is giving back the functionality of this equipment. Its stability of operation was proved, obtaining the established wave shape for the lightning impulses tests. The voltage divider relation and relation between the outer pick voltage and the r.m.s. charge voltage were obtained also.*

**Key words:** high voltage, impulse generator.

### INTRODUCCIÓN

Todos los equipos y dispositivos que se instalan en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), como son los aisladores, pararrayos, transformadores e interruptores, entre otros, deben ser capaces de soportar, por sí solos, determinados niveles de sobretensiones de impulsos externas al sistema o internas a los mismos [1]. Las llamadas sobretensiones de impulsos externas son las producidas por las descargas atmosféricas o rayos y las sobretensiones de impulsos internas son ondas que se generan en las líneas por maniobras que impliquen la conexión o desconexión súbita de grandes cargas.

Cómo citar este artículo:

Orestes Hernández Areu y otros. Repotenciación de un generador de impulsos de tensión.

Ingeniería Energética. 2023. 44 (3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Al valor pico de la onda de tensión de impulso de rayo que, por sus especificaciones, debe soportar un equipo, se le llama BIL (por sus siglas en inglés; Basic Impulse Level) y al valor pico de onda de conmutación que, por sus especificaciones, debe soportar un equipo se le llama BSL (por sus siglas en inglés; Basic Switching Level). El BIL de los transformadores será seleccionado dependiendo del grado de exposición del transformador y las características del sistema de protección [2]. Los generadores de impulsos de tensión se definen como equipos necesarios para realizar ensayos a los sistemas de aislamiento eléctrico [3, 4].

El generador de impulsos del Laboratorio de Alta Tensión (LAT) del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) comenzó a tener averías recurrentes en sus componentes en general y en los circuitos electrónicos que comandaban todo su funcionamiento. Esto lo llevaron a la baja técnica total. Ante la necesidad de continuar realizando los ensayos que anteriormente se desarrollaban con el mismo y frente a la imposibilidad de repotenciarlo o adquirir uno nuevo, se hizo necesario tratar de recuperar su operación. Los generadores de impulsos pueden ser de una sola etapa o multietapa. El empleo de un generador de una sola etapa es válido para pruebas en las que el nivel de tensión no supere los 250 kV. Un generador de impulso de tensión de una etapa, consiste principalmente en un circuito RC con la forma mostrada en la figura 1, [5].

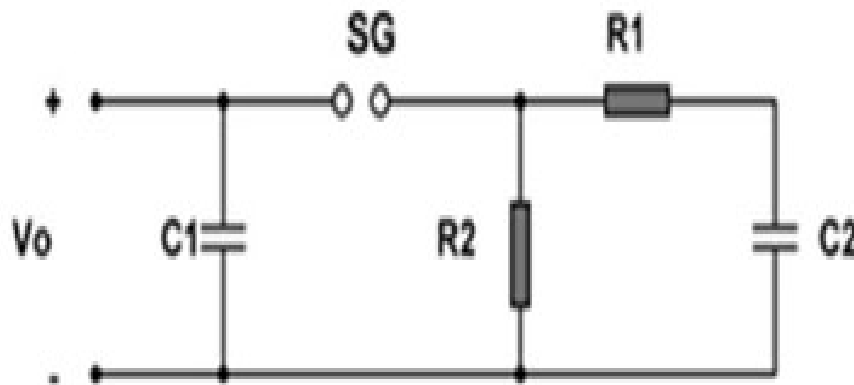


Fig. 1. Circuito de un generador de impulsos de tensión de una etapa

La onda generada debe alcanzar su pico en  $1,2 \mu\text{s}$  (tiempo de frente) y decae hasta la mitad del valor de cresta en  $50 \mu\text{s}$  desde el tiempo virtual cero (tiempo de cola) [6]. Como se observa, la figura 1 consta de:

- Un condensador ( $C_1$ ) que se polariza a la tensión de carga de CD  $V_0$ .
- Unos explosores esféricos o espinterómetro, SG (“Spark Gap” en inglés).
- Una resistencia  $R_1$ , cuyo valor regula el tiempo de frente de la onda de impulso.
- Una resistencia  $R_2$ , cuyo valor regula el tiempo de cola de la onda de impulso.
- La capacitancia del objeto bajo prueba,  $C_2$ .

La tensión  $V_0$  es de corriente directa, por lo que hay una fuente de esta característica. El principio de operación consiste en que mientras los explosores no operen,  $C_1$  se carga a  $V_0$ . En el momento en que ocurra el arco eléctrico en los explosores, el condensador  $C_1$  se descarga prácticamente, a través de  $R_1$  y  $C_2$  porque  $R_2$  tiene un valor mucho mayor a  $R_1$ . El tiempo en que  $C_1$  alcanza su valor máximo de descarga (tiempo de frente  $T_1$ ) es: vea ecuación (1):

$$T_1 \approx R_1 \times C_2 \quad (1)$$

Por otro lado, la carga que en este instante recibe el condensador  $C_2$  se disipa a través de  $R_2$  atenuando la magnitud de la descarga de  $C_1$  y regulando el tiempo de cola de onda con una constante de tiempo  $T_2$ . El tiempo de cola es prácticamente igual a: vea ecuación (2):

$$T_2 \approx R_2 \times C_1 \quad (2)$$

A medida que es necesario obtener valores picos más altos de las ondas de impulso, se hace más difícil generar este tipo de señales, debido a que se requiere capacitores y resistencias que soporten niveles más altos de tensión de carga y que la fuente DC que los alimenta sea de mayor tensión. Por esta razón, la forma más conveniente de incrementar las tensiones del impulso fue propuesta en 1923 por Erwin Marx, consistente en emplear múltiples etapas que se cargan en paralelo [7,8]. Ver figura 2.

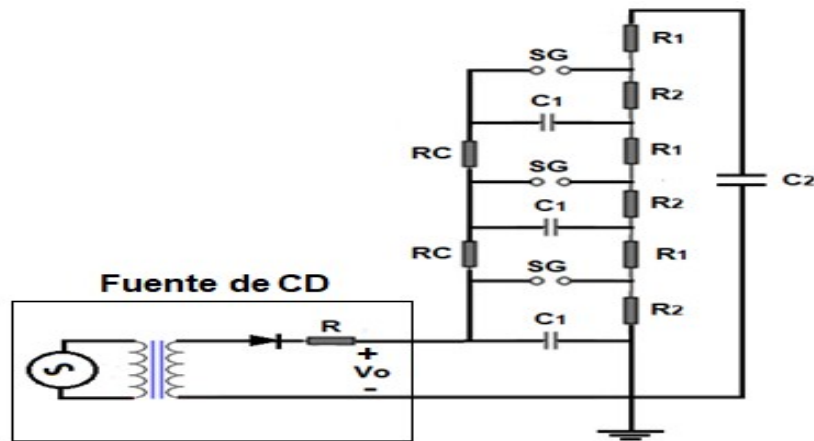


Fig. 2. Circuito de un generador de impulsos de tensión multietapas

Cada una de las etapas del generador se carga a través de la resistencia de frente  $R_1$ , la resistencia de cola  $R_2$  y resistencia de carga  $R_c$ , esta última con un valor mucho más grande que las demás. Cuando todos los condensadores se cargan a la tensión determinada por el nivel máximo de tensión que se requiera para la prueba, el generador está listo para iniciar la descarga sobre el objeto de prueba. Durante la fase de descarga y considerando que la resistencia de carga es muy grande y que  $R_2 \gg R_1$ , las etapas quedan en serie sumándose las tensiones hasta el valor pico del impulso deseado, en la salida de alta tensión, AT, del generador aparecerá una tensión dada por la relación [9], vea ecuación (3):

$$V_{AT} = \eta \times n \times V_1 \quad (3)$$

Donde:

$V_{AT}$ : Tensión pico a la salida del generador.

$n$ : Número de etapas del generador.

$V_1$ : Tensión pico a la salida de la primera etapa.

$\eta$ : Eficiencia de una etapa. Vea ecuación (4):

$$\eta = \frac{V_1}{V_0} \quad (4)$$

## MATERIALES Y MÉTODOS

El generador de impulsos del CIPEL, es un generador de impulsos de tensión, marca TUR, fabricado en la antigua República Democrática Alemana. Alcanza una tensión máxima de 2500 kVpico, con 2 kJ. Para esto consta de 10 etapas de 250 kV cada una, con parámetros (R-C) distribuidos.

La fuente de CD para la tensión de carga es de 42,9 kVA, tiene una de tensión nominal de entrada de 380 V de CA y una etapa de salida con dos ramas que provee una tensión máxima de carga de +125 kV y -125 kV, cada una.

El proceso de generación y regulación de impulso, se realiza de forma automática, a partir de varios sistemas:

- Sistema de energización general.
- Sistema de regulación de la tensión de carga en la fuente de CD.
- Sistema auxiliar para iniciar la descarga mediante trigatrón.
- Sistema de regulación de la distancia entre las esferas espinterómetro de cada etapa.
- Sistema de regulación de la distancia entre las esferas para cortar la onda.
- Sistema de medición de la tensión.
- Sistema de medición de la corriente.

### Sistema de energización general

El generador de impulsos se comanda a distancia mediante un panel de control que se encuentra en la cabina de mando del LAT. Desde este panel, se energizan todos los sistemas a 380 V. Este sistema trabaja correctamente.

### Sistema de regulación de la tensión de carga en la fuente de CD

En el panel de control se activa este sistema con un interruptor. La regulación de la tensión de entrada de la fuente se realiza mediante un circuito electrónico de control a tiristores que permite variar la tensión a su salida desde cero hasta 380 V de CA, para alimentar la entrada de la fuente de CD. Se comprobó que este sistema no trabaja.

### Sistema auxiliar para iniciar la descarga mediante trigatrón [6]

En la mayoría de los generadores convencionales se usan interruptores de aire o gaps para iniciar la descarga de forma natural en cada una de las etapas del generador, es decir, este disparo se hace por rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire; esto es práctico en grandes generadores, en los cuales las tensiones de carga por etapa son altas. Otra alternativa es el empleo de un dispositivo llamado “trigatrón” para iniciar la descarga de la primera etapa del generador. Este está constituido por tres electrodos. La función del tercer electrodo es iniciar el arco que conduce a la descarga de todos los explosores. La iniciación del arco se produce cuando se obtiene la tensión de descarga deseada entre los electrodos de los explosores y entonces, mediante un interruptor, se le da un pulso al electrodo del trigatrón que distorsiona el campo eléctrico entre las esferas de la primera etapa provocando la descarga eléctrica entre estas y la avalancha en el resto de los explosores de las otras etapas.

Se comprobó que este sistema no trabaja, por lo que el inicio de la descarga entre las esferas de cada etapa del generador se hace de forma “natural”. El procedimiento de descarga natural es el siguiente:

1. Las esferas se ajustan a una distancia superior a la del inicio de la descarga.
2. El generador es cargado a la tensión prefijada.
3. Luego, se disminuye la separación entre los explosores hasta provocar la ruptura del aire.
4. Para repetir la descarga, las esferas quedan ajustadas a esta distancia y solo se aumenta la tensión de carga desde cero hasta que ocurra la ruptura.

### Sistema de regulación de la distancia entre las esferas de los espinterómetros

En el panel de control del generador se manipula este sistema, mediante la energización de un accionamiento a distancia que es un bloque motor – reductor que gira en las dos direcciones para acercar o alejar las esferas de cada etapa. Se comprobó que este sistema funciona correctamente.

### Sistema de regulación de la distancia entre las esferas de corte de cada etapa

En el panel de control del generador se manipula este sistema, mediante la energización de un accionamiento a distancia que también es un bloque motor – reductor que gira en las dos direcciones para acercar o alejar las esferas de corte de cada etapa. Se comprobó que este sistema funciona correctamente también.

### Sistema de medición de la tensión

La medición de la tensión de salida del generador de impulsos se realiza a través de un divisor de tensión capacitivo con varias secciones de condensadores montadas unas sobre otras que es parte del generador de impulsos. La medición se lleva mediante un cable coaxial hasta un osciloscopio digital en la cabina del Laboratorio de Alta Tensión. Su esquema eléctrico se muestra en la figura 3.

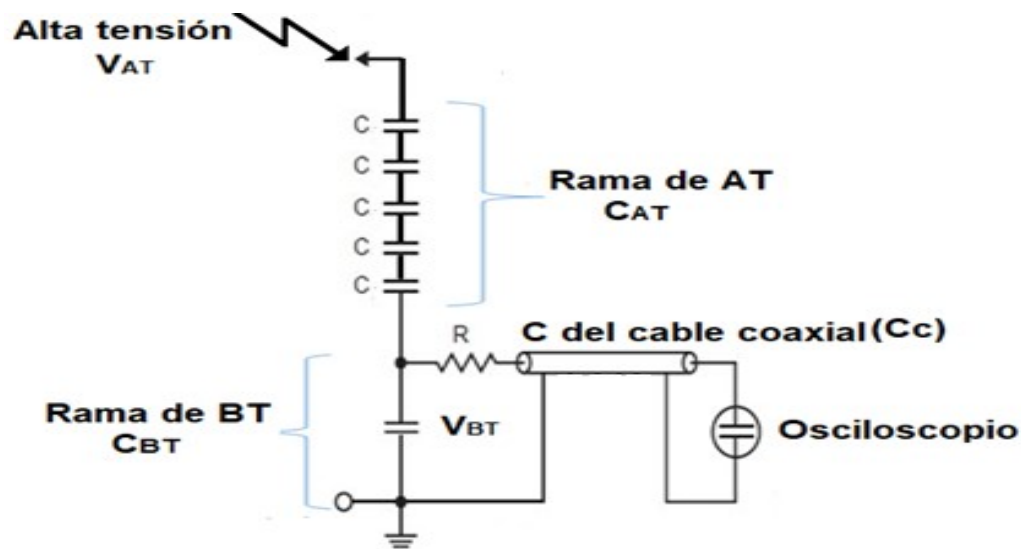


Fig. 3. Divisor capacitivo del generador de impulsos

El valor de la alta tensión ( $V_{AT}$ ) será; el valor obtenido en la rama de baja tensión ( $V_{BT}$ ) multiplicado por la relación de división  $K$ , como se expresa en la ecuación (5):

$$K = \frac{V_{AT}}{V_{BT}} = \frac{C_{AT} + C_{AB} + C_C}{C_{AT}} \quad (5)$$

Donde:

$C_{AT}$ : Capacitancia total de la rama de alta tensión.

$C_{BT}$ : Capacitancia de la rama de baja tensión.

$C_C$ : Capacitancia del cable coaxial.

Este sistema no mide correctamente, pues tiene averiado uno de los condensadores de la rama de alta tensión por lo que debió verificarse su relación de división  $K$ , como se explicará más adelante.

### Sistema de medición de la corriente [10]

La medición de la corriente de la descarga del generador se realiza mediante una impedancia de puesta a tierra (resistencia “shunt”), a través de la que se pone a tierra el objeto que se prueba.

Por esta resistencia circula la corriente a tierra, por lo que registrando en un osciloscopio la caída de tensión en ella, se tiene información de su magnitud y forma de onda.

La medición llega por cable coaxial hasta un osciloscopio en la cabina del Laboratorio de Alta Tensión (LAT). Ver figura 4. Este sistema funciona correctamente.

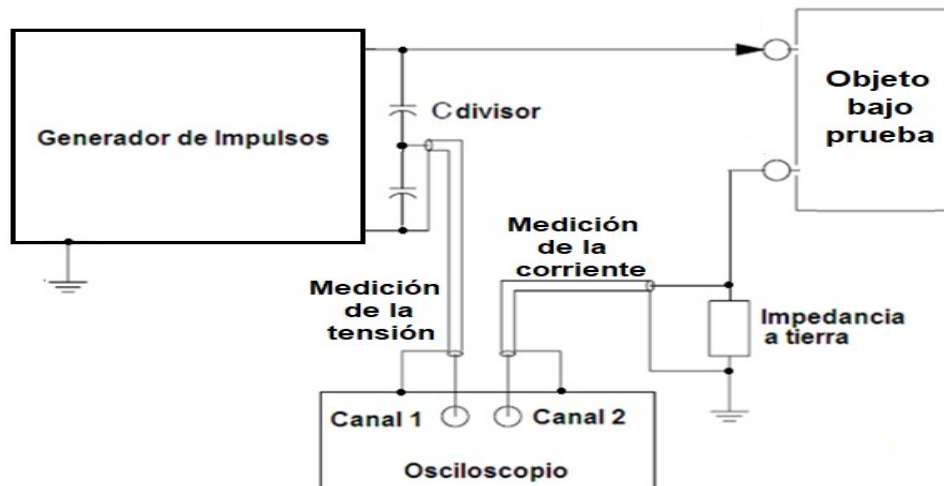


Fig. 4. Esquema de los sistemas de medición de la tensión y la corriente

### RESULTADOS y(o) DISCUSIÓN

Se llegó a la conclusión de que la opción viable, era tratar de alimentar la etapa de entrada de la fuente de CD, con una fuente regulable externa apropiada para los niveles de tensión y corriente de carga exigidos por el propio generador.

También se decidió realizar la descarga entre las esferas de cada etapa del generador de forma “natural”, a partir de la distancia entre los espinterómetros. Para la puesta en marcha de la fuente de CD, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se identificaron y aislaron los puntos “u” y “v”, en los cuales se conectaría la fuente externa reguladora de tensión para alimentar el devanado primario del transformador de la fuente de CD. Ver figura 5.
2. Se identificaron y aislaron los puntos de enlace entre la fuente y la primera etapa del generador de impulsos (1 - 2” y “3 - 4”). Ver figura 5.
3. Entre los puntos “u” y “v” de la fuente, se instaló un voltímetro y entre los puntos “1” y “3”, se instaló un kilovoltímetro electrostático con campo de medida de 30 kV. Ver figura 5.
4. Utilizando una fuente reguladora provisional se procedió a variar manualmente por pasos, la tensión a la entrada de la fuente de CD y medir a su salida la tensión de carga, comprobándose que la fuente trabajaba correctamente. La tabla 1, muestra los resultados de esta comprobación y la relación entre las tensiones de entrada de la fuente y la tensión de carga.

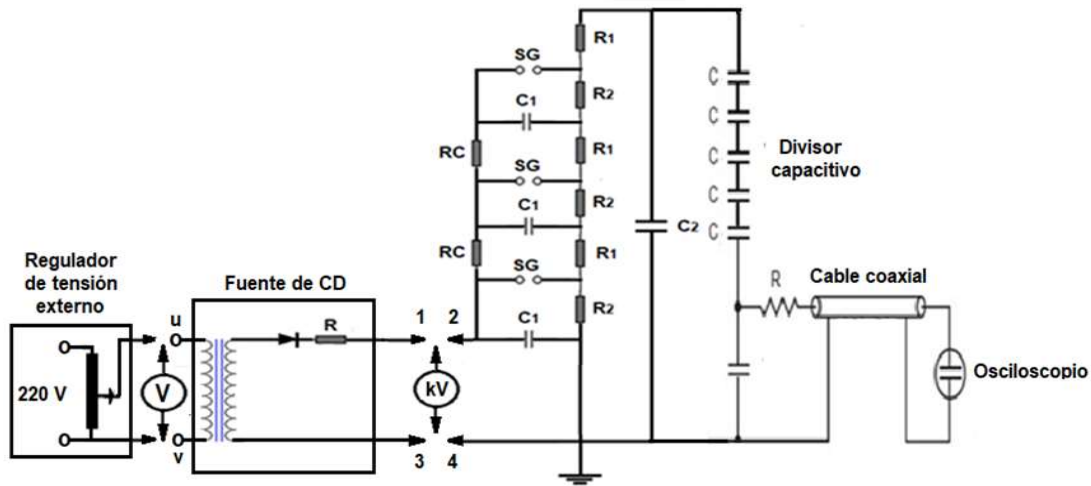


Fig. 5. Esquema de la comprobación de la fuente de CD

Tabla 1. Relación entre las tensiones de entrada de la fuente y la tensión de carga

No.	$V_{u-v}$ (V)	Tensión de carga $V_{1-3}$ (kV)	$V_{1-3}/V_{u-v}$
1	20	10,4	520,0
2	25	13,0	520,0
3	30	15,6	520,0
4	35	18,2	520,0
5	40	20,8	520,0
6	45	23,4	520,0
7	50	26,0	520,0
8	55	28,6	520,0

Para la fuente regulable definitiva, se decidió utilizar un autotransformador variable de parámetros nominales; 3 kVA, 220 V/0-220 V y 59,1 A, que estaba en desuso por tener dañado el mecanismo de regulación de la tensión. El mecanismo de regulación de tensión se logra mediante un accionamiento motor – reductor que mueve un sistema de transmisión de biela y cadena. Este sistema tenía rota la biela (que era de baquelita), por lo que, por tornería, hubo que hacer una copia de la misma en aluminio.

El control de este accionamiento se realizaba con un conjunto de contactores e interruptores de posición que permitían la rotación del accionamiento en una dirección u otra, para subir o bajar el cursor y con este, la tensión secundaria del autotransformador. Los interruptores de posición detenían el movimiento cuando el cursor llegaba al final o al principio del devanado. Todo este control estaba inoperante, por lo que hubo que diseñar uno nuevo capaz de energizar la fuente regulable y que, además, permitiera el arranque e inversión de giro del motor del accionamiento. Para esto, se emplearon dos contactores magnéticos y los mismos interruptores que, en el panel de control del generador, accionaban la alimentación y regulación de tensión de entrada de la fuente de CD.

### Puesta en marcha del generador de impulsos

El primer objetivo en esta tarea fue poner en marcha la primera etapa del generador y comprobar si se lograban obtener descargas en los explosores esféricos. Para cumplimentarlo se puso como objeto de prueba un aislador de pedestal y se procedió a subir la tensión de carga en la fuente de CD, hasta provocar la descarga. Después de comprobar el funcionamiento estable de esta etapa para distintas separaciones de las esferas y niveles de tensión de carga, se necesitaba comprobar si se lograban obtener ondas de impulsos de rayo. Para esto, se identificaron y siguieron hasta el panel de control de la cabina del laboratorio, el cable coaxial proveniente del divisor capacitivo del generador, el cable coaxial proveniente de la “resistencia shunt”, para la medición de corriente y el cable coaxial para el “trigger” del osciloscopio.

El cable del divisor capacitivo se conecta a un canal de un osciloscopio digital, mediante un terminal atenuador de la tensión, con relación 100:1, para registrar los oscilogramas de las ondas de tensión generadas. El cable de la resistencia “shunt”, se conecta a otro canal del mismo osciloscopio, mediante un terminal atenuador de la tensión, con relación 10:1, para registrar los oscilogramas de las ondas de corriente de descarga. Se comprobó por los oscilogramas, que se estaban generando de ondas de impulsos de rayos con las especificaciones de tiempos de frente y cola establecidos. En la figura 6, se presentan una muestra de los registros realizados de las ondas negativa de tensión y corriente respectivamente.

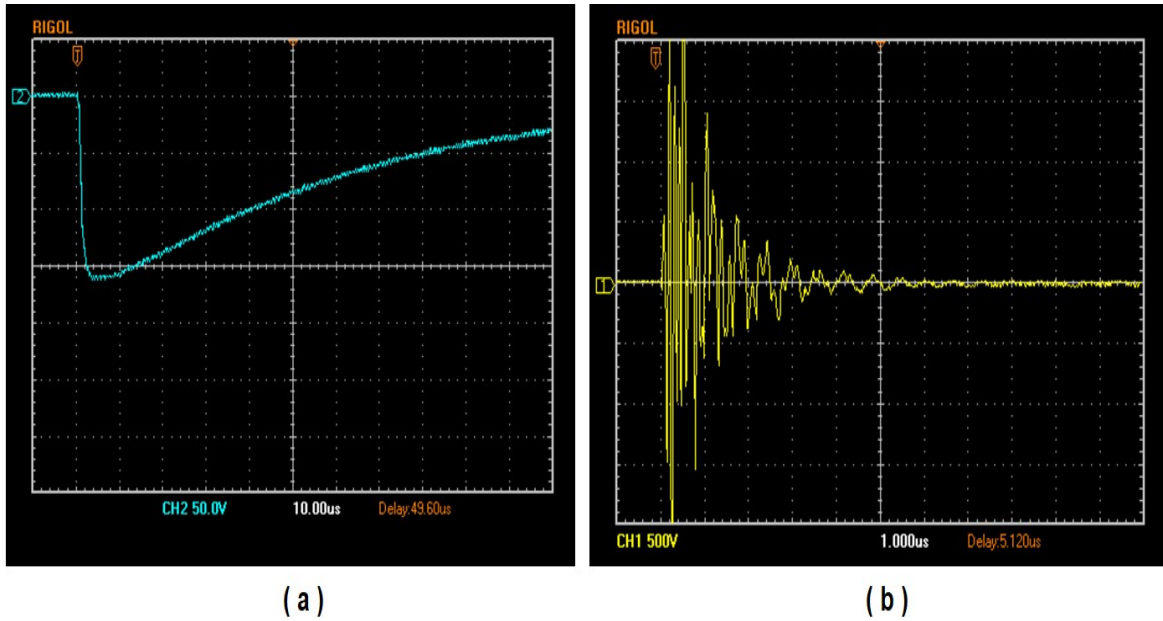


Fig. 6. Muestra de los registros realizados de ondas de tensión (a) y ondas de corriente (b)

Se procedió a instalar la segunda etapa del generador y repetir los pasos realizados en la verificación de la primera, resultando también satisfactoria esta comprobación. Se decidió no aumentar las etapas del equipo, para no someter a sus componentes, ya viejas, a un estrés mayor que pudiera averiarlas. Con dos etapas, se garantiza una tensión pico de la onda de 500 kV, la cual es suficiente para ensayos hasta el nivel de subtransmisión.

Una vez funcionando las dos etapas se midió la corriente que tomaba la fuente de CD del regulador de tensión. Esta corriente tiene un valor máximo instantáneo en el momento de la descarga de las esferas, pero nunca llega a 30 A r.m.s., por lo que no representa peligro para la fuente regulable externa.

#### Medición de la relación de división del divisor capacitivo

Como se había dicho, el divisor capacitivo del generador de impulsos no mide correctamente, pues tiene averiado uno de los condensadores de la rama de alta tensión por lo que, para conocer con certeza, la tensión que se está aplicando al objeto de prueba, debía verificarse su relación de división mediante el empleo de espinterómetros (figura 7).

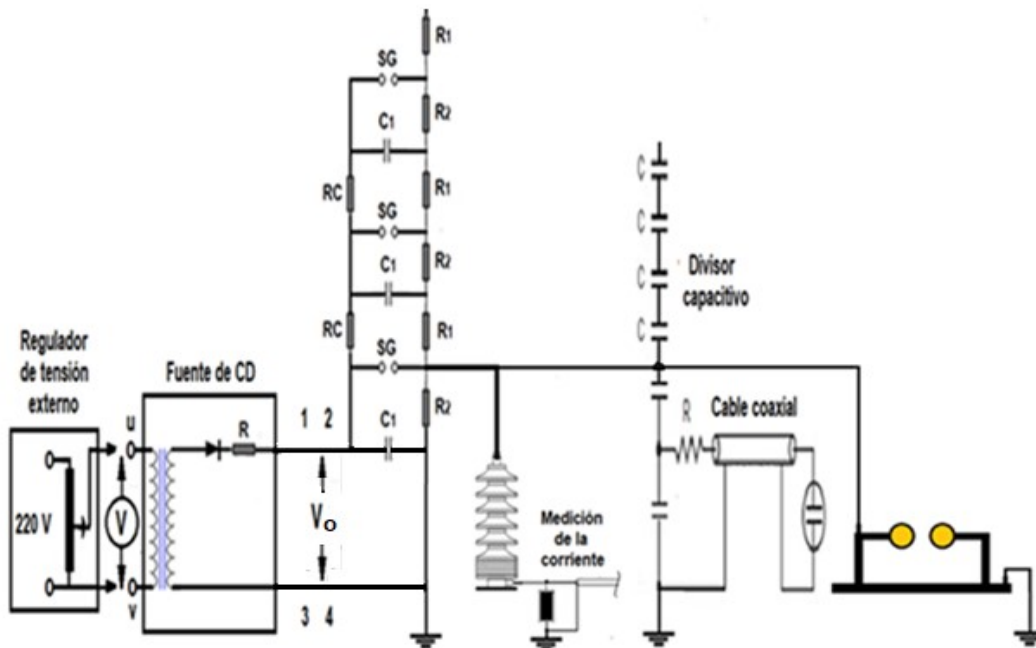


Fig.7. Esquema de medición de la tensión de una etapa del generador

La tensión a que ocurre la ruptura dieléctrica entre dos esferas, depende del diámetro de estas, la distancia entre ellas y las condiciones ambientales. Si se conocen estas variables se puede determinar la tensión. En el CIPEL, se cuenta con esferas de medición de 25 cm de diámetro cuyos valores de tensión de ruptura dieléctrica están documentados.

El procedimiento para determinar la relación de división para dos etapas del divisor capacitivo es el siguiente:

1. Conectar las esferas de medición a la salida del generador. Ver figura 7.
2. Poner una separación entre esferas.
3. Energizar dos etapas del generador de impulsos.
4. Preparar el osciloscopio en la cabina del Laboratorio de AT, para registrar las ondas de impulsos que se generen.
5. Subir la tensión de entrada de la fuente de CD ( $V_{u-v}$ ) y tensión de carga  $V_o$ , manipular los explosores del generador hasta que se verifique que en aproximadamente el 50% de las veces que ocurre descargas en los explosores del generador, haya ruptura entre las esferas de medición. Es decir que, en ese momento, el generador de impulsos está entregando la tensión pico que se corresponde con esa separación entre las esferas de medición ( $V_{AT}$ ).
6. Verificar qué tensión pico se registra en la pantalla del osciloscopio.
7. Multiplicar esta tensión pico por la relación del atenuador (100:1) y esta será; la tensión en la rama de baja tensión del divisor capacitivo ( $V_{BT}$ ).
8. Se obtiene la relación del divisor,  $K_1$  como la relación entre las tensiones  $V_{AT}/V_{BT}$  y  $K_2$  como la relación entre la tensión pico de salida del generador y la tensión de CA r.m.s. a la entrada de la fuente de CD.  $V_{AT}/V_{u-v}$ .
9. Se repiten varias veces los pasos del 4 al 8 para varias separaciones entre esferas de medición.
10. Se obtienen los valores promedio de  $K_1$  y  $K_2$ .

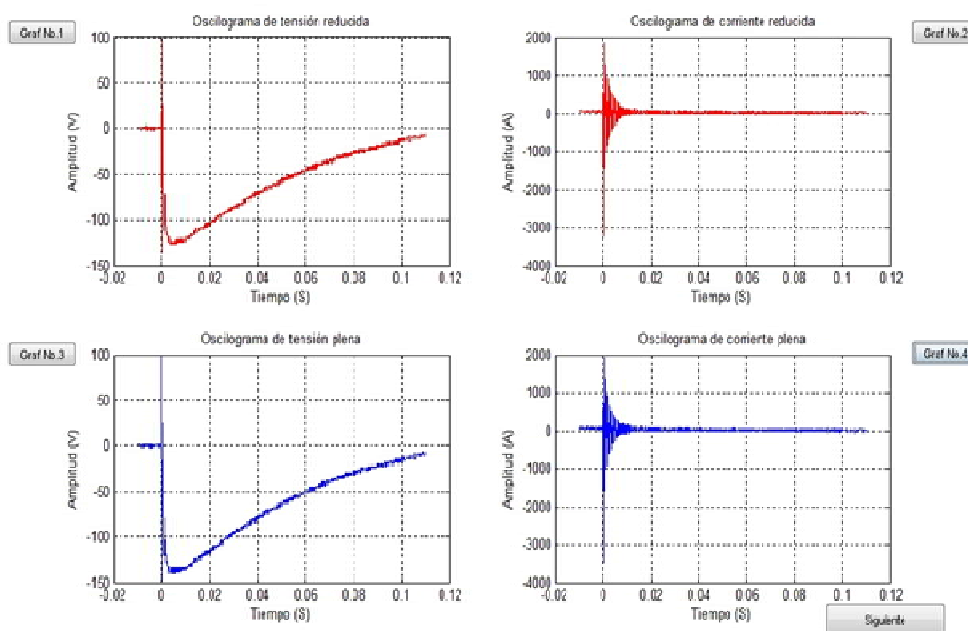
La tabla 2, muestran los resultados de las mediciones y la obtención de  $K_1$  y  $K_2$  para dos etapas del divisor capacitivo.

**Tabla 2.** Resultados de la determinación de la relación de división K

No.	$V_{u-v}$ (V)	$V_{AT}$ (kV)	$V_{BT}$ (kV)	$K_1 = V_{AT}/V_{BT}$	$K_1$ prom	$K_2 = V_{AT}/V_{u-v}$	$K_2$ prom
1	39,0	75,50	14,24	5,30	5,29	1935,89	2000
2	41,0	81,00	15,34	5,28		1975,61	
3	43,0	86,00	16,32	5,27		2000,00	
4	49,0	99,00	18,75	5,28		2020,41	
5	55,0	112,00	21,09	5,31		2036,36	
6	61,0	125,00	23,50	5,32		2049,18	
7	68,0	137,00	25,85	5,30		2014,71	
8	74,5	149,00	28,22	5,28		2000,00	

### Pruebas realizadas con el generador recuperado

Se realizaron ensayos para comprobar la estabilidad en el funcionamiento del generador de impulsos. La figura 8, muestra uno de los registros de una prueba de impulsos de rayo a un transformador.



**Fig. 8.** Oscilogramas en el dominio del tiempo por terminal  $H_1$



## CONCLUSIONES

1. Se logró devolver la funcionalidad del generador de impulsos del CIPEL con elementos y dispositivos recuperados en el Laboratorio de Alta Tensión de equipos obsoletos.
2. Se comprobó la estabilidad de la operación del generador, obteniéndose las formas de ondas establecidas para las pruebas de impulsos.
3. Se obtuvo que la relación del divisor de tensión es 5,29 y la relación entre la tensión pico de salida y la tensión r.m.s. de CA de entrada de la fuente de CD es 2000.

## REFERENCIAS

- [1] Torres Sánchez, Horacio. "Protección contra rayos". 2 ed. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, 2010. p. 425. ISBN 9789588585178. Disponible en: [https://biblioteca.ugc.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=17865&shelfbrowse\\_itemnumber=367886](https://biblioteca.ugc.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=17865&shelfbrowse_itemnumber=367886)
- [2] IEEE Std C57.12.00-2015. "Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers". ISBN 978-1-5044-0755-7. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7469278>
- [3] Gómez Arango Santiago. "Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos de Alta Tensión, Portátil y Didáctico". Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería – Automatización Industrial. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Manizales, Colombia. 2015. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55274/1053776042.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] IEC Standard 61000-4-5. "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test", Nov. 2014. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/4223>
- [5] Simon Comin, Pascual. "Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión". Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2004, p. 197. Disponible en: <https://oa.upm.es/253/>
- [6] IEEE Std C57.12.90-2015. "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers". ISBN 978-1-5044-0769-4. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9707753>
- [7] García G., Diego Fernando, Rincón C. Diego Fernando. "Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 KV. *Tecnura* [en línea]. 2009, vol. 12, n. 24, p. 4-13. ISSN 0123-921X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257020606002>
- [8] Rodewald, A., & Feser, K.. "The Generation of Lightning and Switching Impulse Voltages in the UHV Region with an Improved Marx Circuit". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, vol. PAS-93, n. 1, p. 414-420. ISSN 0018-9510. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4075369>
- [9] Electrical Testing Group. "Marco referencial de los generadores de impulsos". Inducor Ingeniería S.A. Argentina, 2009, p. 50. Disponible en: <https://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/marco-referencial-generadores-de-impulsos.pdf>
- [10] Godines Fonseca, Jorge Luis., Hernández Areu Orestes. "Respuesta en frecuencia como herramienta de evaluación en pruebas de impulso a transformadores". *Revista Ingeniería Energética*, 2016, vol. 37, n. 2, p. 94-103. ISSN 1815-5901. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012016000200003](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000200003)

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## CONTRIBUCION DE LOS AUTORES

**Orestes Hernández Areu:** <https://orcid.org/0000-0002-2672-239>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Dailen García del Sol:** <https://orcid.org/0000-0002-1425-7371>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Ernesto Díaz Alfonso:** <https://orcid.org/0000-0003-1837-058X>

Diseño de la investigación. Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Frank Grau Merconchni:** <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

Participó en el análisis de los resultados, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.