

3er RENASE  
3ra Reunión Nacional de Sistemas Eléctricos  
25 al 29 de setiembre de 1989

Título : ENSAYO Y MODELADO DE DESCARGADORES DE VARILLAS, USADOS PARA LA PROTECCION DE TRANSFORMADORES.

Autores: Daniel Slomovitz , Jorge Fernández

Institución: U.T.E.- LABORATORIO, Paraguay 2385, Montevideo, URUGUAY

Resumen: Se estudia la protección que brindan los descargadores de varillas colocados en las columnas de líneas más próximas al transformador. Se presentan resultados de mediciones de las características Voltaje - Tiempo de corte, bajo ondas de impulso de rayo, así como valores de la tensión disruptiva a 50 Hz. A partir de estos datos proponemos un modelo de descargador basado en componentes electrónicos, apto para usarse con simples programas simuladores.

Se analizan los resultados de simulaciones de circuitos de línea-transformador, con múltiples descargadores.

## 1. INTRODUCCION

La protección contra sobretensiones en transformadores de potencia, está a cargo de distintos tipos de descargadores. Si bien existen en el mercado descargadores del tipo convencional o de óxido de zinc que se adaptan a los niveles de aislación de los transformadores, en determinadas aplicaciones es interesante evaluar el uso de descargadores de varillas [1]. Su bajo costo puede decidir su uso en la protección de pequeños transformadores de distribución. El mayor inconveniente que presentan es su incapacidad de interrumpir el arco una vez que la sobretensión desapareció. Esto provoca la salida de servicio de la línea de alimentación. Sin embargo en ciertas instalaciones rurales de baja potencia, es económicamente ventajoso utilizar interruptores con reconexión automática al comienzo de las líneas y protección por descargadores de varillas en todos los transformadores asociados. La calidad del servicio eléctrico se ve disminuída, pero puede ser aceptada en virtud de la disminución del costo de la instalación.

Se estudiará el comportamiento de un tipo de descargador, frente a tensiones de impulso de rayo y a frecuencia industrial, al variar la distancia entre electrodos. Así mismo se propondrá un modelo que simula el comportamiento real, basado en el uso de componentes electrónicos comunes, de manera de poderlo utilizar en simples programas digitales simuladores (por ej. MICROCAP [2]). Finalmente se evaluará el grado de protección que brindan distintas configuraciones, que usan varios descargadores por cada transformador.

## 2. RELEVAMIENTO EXPERIMENTAL

Se detallan los ensayos realizados sobre un descargador, a efectos de obtener información suficiente para poder desarrollar un modelo que se adapte lo mejor posible a su comportamiento.

El descargador está constituido por una ménsula, un aislador y dos varillas dispuestas tal como se muestra en la Figura 1.

Para una separación  $d$  de 30 mm se determinó la tensión de cebado a frecuencia industrial cuyo valor resultó ser de 37.5 kV. El voltaje nominal del sistema es de 15 kV.

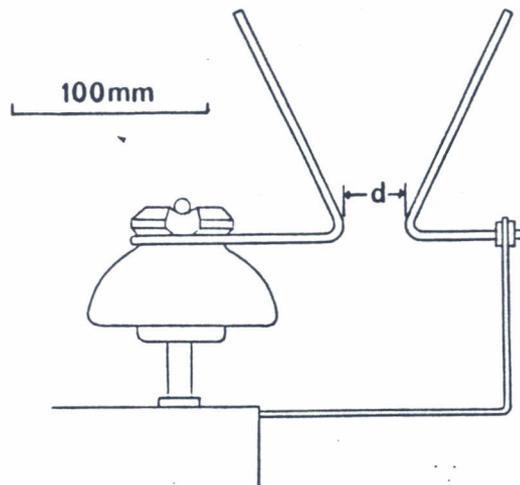


FIGURA 1  
Disposición geométrica del descargador estudiado.

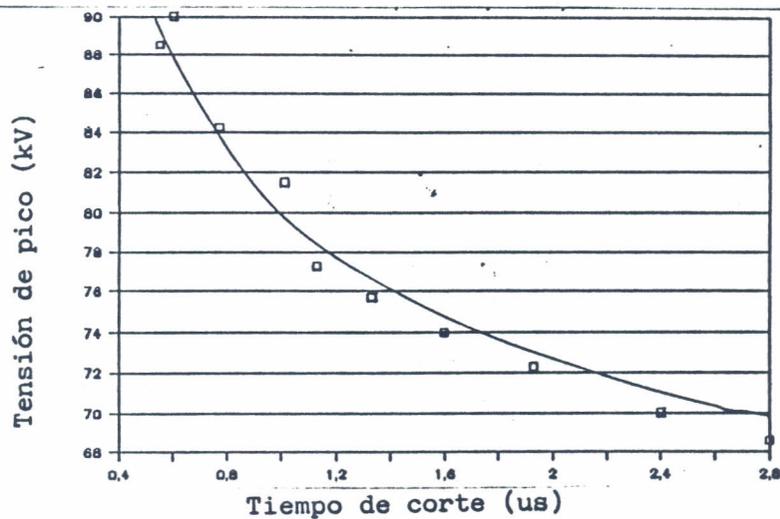
Se determinó la  $U_{50}$  para impulsos de rayo (1.2/50 $\mu$ s) por el método "up and down" [3] aplicando 30 impulsos y escalones de tensión de aproximadamente 3 %. Se utilizó un equipo generador de impulso de hasta 200 kV de tensión de cresta. Este ensayo se realizó para ambas polaridades y para tres valores distintos de  $d$ : 20 mm, 30 mm y 40 mm. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Dichos valores están corregidos a condiciones atmosféricas de referencia [4].

$d$ (mm)	$U_{50}$ (kV)	
	(-)	(+)
20	52.1	52.8
30	64.6	61.2
40	80.4	70.9

TABLA 1

Esta tabla muestra que la  $U_{50}$  aumenta linealmente con la distancia para polaridad positiva. Para polaridad negativa el aumento es mayor para distancias mayores.

Por último se determinó la relación entre el tiempo de corte y la tensión de pico, al variar la tensión de cresta del impulso aplicado. Este ensayo se realizó aplicando impulsos de polaridad positiva con valor de cresta creciente. A partir de oscilogramas se determinaron los tiempos de corte y las tensiones de pico. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y la Figura 2. Los puntos medidos están indicados por cuadrados. Estas medidas se realizaron para  $d=30$  mm y los valores están corregidos a condiciones de referencia.



**FIGURA 2**  
**Variación del tiempo de corte**  
**(d=30 mm)**

De la Figura 2 se concluye que el tiempo de corte varía entre  $0,5 \mu\text{s}$  y  $3 \mu\text{s}$  de acuerdo a las características de la onda de impulso. Para tiempos menores a  $1 \mu\text{s}$  el corte se produce durante el flanco de subida, por lo cual el voltaje de pico resulta menor que el voltaje de cresta de la onda plena de impulso.

U pico (kV)	T corte ( $\mu$ s)
68.6	2.80
70.0	2.40
72.3	1.93
74.0	1.60
75.7	1.33
77.3	1.13
81.5	1.01
84.2	0.77
90.0	0.60
88.5	0.55

TABLA 2

### 3. MODELO DEL DESCARGADOR

Se propone un modelo que tiene en cuenta las características a baja frecuencia, así como la relación : tensión de pico - tiempo de descarga en ondas de impulso de rayo. La Figura 3 muestra dicho modelo. D es un diodo ideal, Dz un diodo zener con tensión de ruptura Uz, R y C un resistor y capacitor ideales y S una llave controlada por la tensión V. Cuando V supera al valor Vg, la llave S cierra, simulando la descarga en el elemento real.

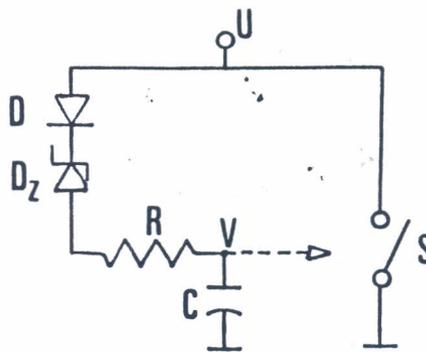


FIGURA 3

Modelo propuesto para el descargador de cuernos

La idea es dimensionar la constante de tiempo RC de forma que sea mucho mayor que los tiempos involucrados hasta el salto de arco (cierre del interruptor S). De esta forma dicho circuito se comporta como un integrador. El diodo zener comienza a conducir cuando la tensión U supera el valor Uz, impidiendo que el interruptor S cierre con tensiones bajas. El agregado del diodo D es necesario para evitar que C se descargue a través de la fuente, cuando la tensión U disminuya de valor. Esto asegura que cuando S cierre, por lo cual la tensión U cae a cero, la llave S permanecerá cerrada. En el descargador real esto corresponde al hecho de que una vez cebado el arco, éste no se autoextingue en los cortos tiempos asociados a las sobretensiones de impulso. En el caso de frecuencia industrial, estos descargadores tampoco tienen mecanismo alguno para extinguir el arco y requieren el uso de una protección externa.

La Figura 4 muestra la relación entre el voltaje aplicado y los tiempos de conducción del diodo Dz.

$$V = \frac{1}{R C} \int_{t_i}^t (U - U_z) dt \quad (1)$$

S cierra si  $V = V_g$  o sea

$$V_g = \frac{1}{R C} \int_{t_i}^{t_f} (U - U_z) dt \quad (2)$$

donde  $t_i$  es el tiempo en el cual  $U$  supera el valor de  $U_z$  y  $t_f$  es el momento en que se produce el cierre de la llave S.

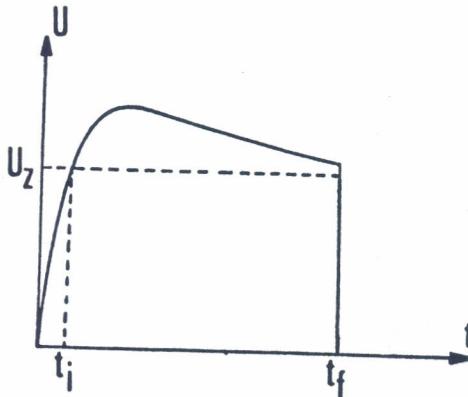


FIGURA 4  
Relación entre el tiempo de corte y el voltaje aplicado.

Hay dos parámetros para ajustar el comportamiento del modelo a la realidad :  $U_z$  y  $V_g$  .  $U_z$  debe elegirse muy cercano al valor del voltaje de cebado a baja frecuencia.  $RC$  puede elegirse en forma arbitraria, con tal que su valor sea mucho mayor que  $10 \mu s$ . Finalmente queda  $V_g$  , el cual debe elegirse de manera que se verifique la curva: voltaje de pico - tiempo de corte. En rigor es necesario un tanteo variando ligeramente  $U_z$  y  $V_g$  hasta que se logre una aproximación suficiente.  $U_z$  tiene gran influencia en los tiempos de corte grandes, mientras que  $V_g$  debe dimensionarse para que se verifique la zona de pequeños tiempos.

No se ha contemplado la inclusión de elementos que simulen la caída de tensión en el arco, pero es posible hacerlo agregando un pequeño resistor y un diodo zener en serie con este modelo.

Los valores que mejor se ajustan a los puntos relevados (voltaje de pico - tiempo), mostrados en la Figura 2 , son:  $U_z = 67.5 \text{ kV}$ ,  $V_g = 28 \text{ V}$ ,  $R = 100 \text{ k}\Omega$  y  $C = 1 \text{ nF}$ . En dicha figura y en trazo lleno se muestra la relación correspondiente al modelo. Se observa que los errores están por debajo del 2%, lo cual constituye una muy buena aproximación.

El nivel de aislación de los transformadores de este sistema es de 95 kV de pico, para onda de impulso de rayo plena y cortada. Esto muestra que los descargadores ofrecen una protección adecuada.

#### 4. MODELADO DEL SISTEMA

El sistema completo está formado por una línea dividida en 3 tramos de 100 m cada uno (distancia entre columnas), un transformador ubicado en un extremo, y una fuente de tensión que simula el impulso en el otro extremo. Se asumió un modelo por fase, despreciándose la interacción entre distintas fases.

Se usó el programa simulador referenciado en [2]. Este programa incluye el modelado de todos los componentes lineales así como diodos, transistores, operacionales y fuentes de tensión y corriente de varios tipos. Es posible definir fuentes cuyas formas de onda son programables por el usuario.

Si bien la finalidad de este programa es la simulación de circuitos electrónicos en baja tensión, nada impide usarlo para simular equipos y sistemas de alta tensión. En particular, toda la técnica de impulso es manejable por este programa, pues los diversos componentes se modelan por circuitos lineales.

Para generar el impulso de rayo se modeló el circuito del generador de impulso utilizado para realizar los ensayos del descargador. Variando las condiciones iniciales es posible obtener impulsos con distintos valores de tensión de cresta. Este modelo se ajusta bien a los resultados obtenidos en la práctica. Con fines de comparación, se utilizó también una fuente definida por el usuario (fuente 12) disponible en el programa simulador. La forma de onda de voltaje de esta fuente consiste en una recta que va desde el punto 0 V, 0  $\mu$ s hasta el valor de pico en 1.2  $\mu$ s. Otra recta une este punto con el punto 0 V, 100  $\mu$ s. Los resultados no difieren mucho de los obtenidos con el generador de impulso y se obtiene mayor velocidad de cálculo y facilidad en el cambio del valor de tensión de cresta.

Se modeló un transformador de 15 kV, 50 kVA mediante un capacitor. Se asumió una capacidad de 2 nF, la cual fue medida en un transformador real.

Se supuso a la línea dividida en tramos de 100 m entre columnas. Cada tramo se modeló con una serie de celdas básicas RLC. Los valores de sus parámetros se calcularon en función de la configuración geométrica de la línea. Se analizó la dependencia de los resultados en función de la cantidad de celdas en cada tramo, manteniendo constante los parámetros de la línea. Estudiando simulaciones con tramos de 1, 5 o 10 celdas se observó que los resultados no presentan diferencias sustanciales.

Se comparó este modelo contra el modelo de línea disponible en el programa. Este modelo contempla sólo líneas ideales. Admite 3 parámetros: longitud de la línea, velocidad de propagación e impedancia característica. Se simularon las pérdidas en cada tramo de 100 m, asociándolas a un resistor colocado al comienzo de dicho tramo. Los resultados fueron similares a los obtenidos con los modelos de constantes concentradas. Por razones de velocidad de cálculo y simplicidad se adoptó el modelo distribuido.

Se estudiaron varias configuraciones, cambiando la ubicación y cantidad de descargadores. La configuración N° 1 consiste en 3 tramos de línea (L) con un único descargador (CUERNO-3) en el medio. Se aplicó un impulso de 280 kV de cresta al comienzo de la línea. La Figura 5 muestra el sistema y la Figura 6 la tensión generada y la aplicada sobre el transformador. Se observan picos de 170 kV, los cuales superan el nivel de aislación del transformador.

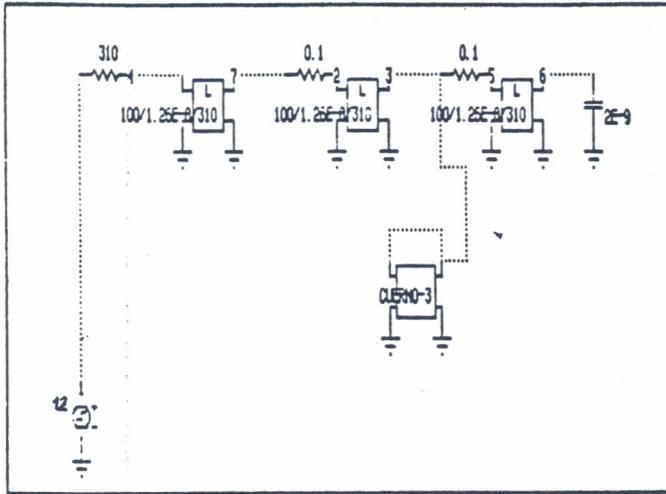


FIGURA 5  
Configuración 1

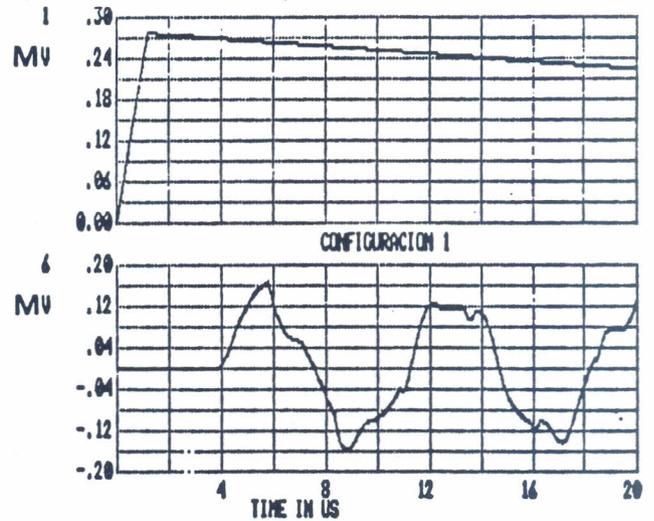


FIGURA 6  
Arriba: Tensión de fuente 12  
Abajo: Tensión sobre el transformador

En la Figura 7 se muestra el sistema correspondiente a la configuración N° 2. En este caso el descargador está ubicado 2 columnas antes que la del transformador. En la Figura 8 se observa que se producen picos de más de 160 kV en el transformador.

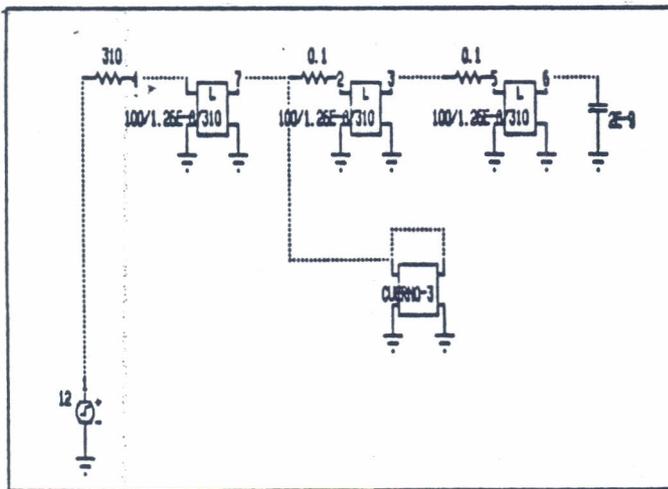


FIGURA 7  
Configuración 2

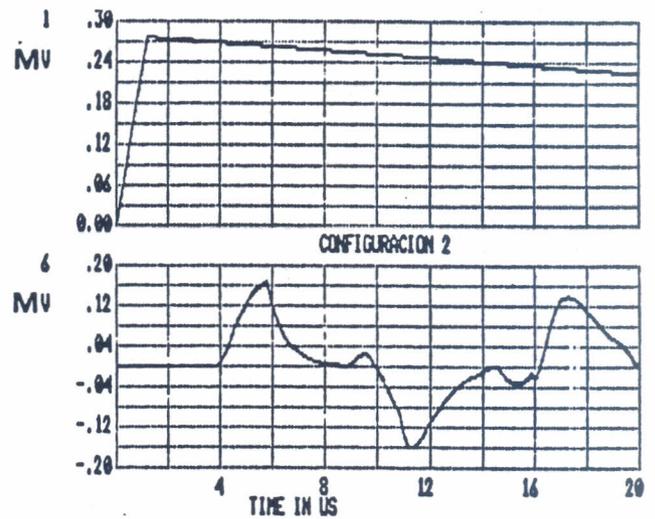


FIGURA 8  
Arriba: Tensión de fuente 12  
Abajo: Tensión sobre el transformador

La Figura 9 muestra la configuración N° 3 del sistema, con descargadores en las 2 columnas anteriores a la del transformador. En la Figura 10 se muestra la tensión sobre el transformador. Si se compara ésta con la configuración N° 1 se ve que ambas curvas son muy similares presentando un pico de 170 kV. Se puede deducir que el colocar un segundo descargador dos columnas antes del transformador no cambia los resultados.

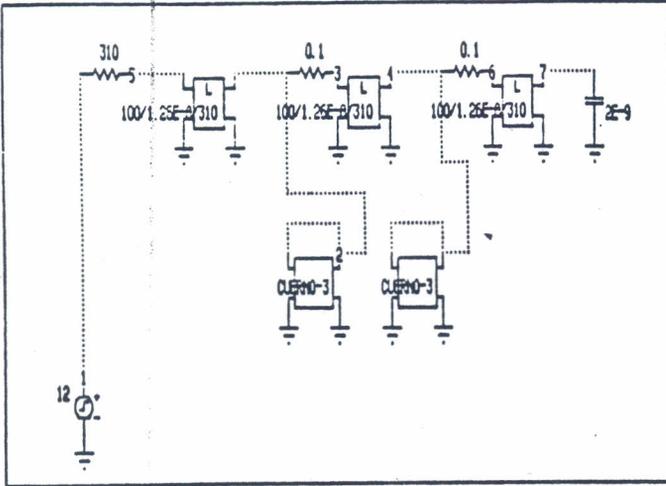


FIGURA 9  
Configuración 3

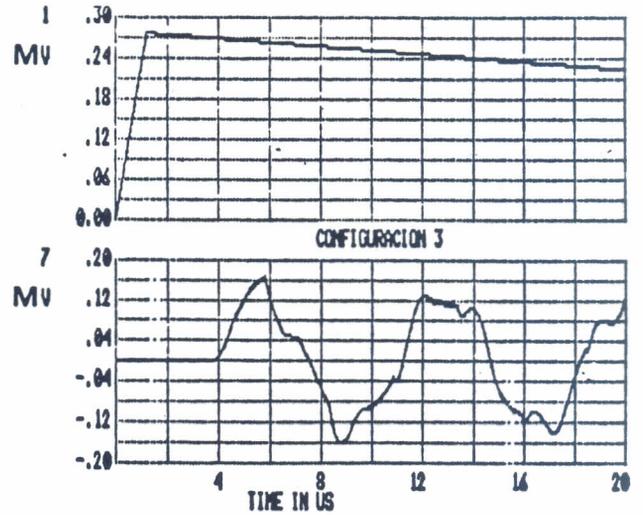


FIGURA 10  
Arriba: Tensión de fuente 12  
Abajo: Tensión sobre el transformador

Finalmente la configuración N° 4 corresponde al descargador ubicado en la misma columna del transformador (Figura 11). Se observa en la Figura 12 que en estas condiciones se obtiene un pico de tensión de 75 kV en el transformador, valor que está por debajo del límite especificado por el fabricante.

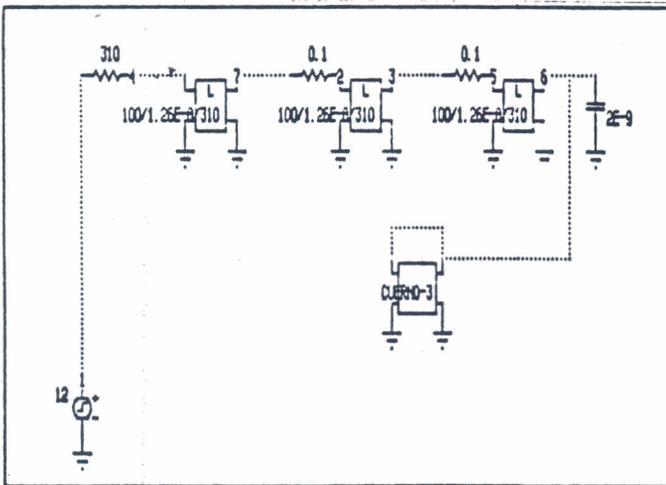


FIGURA 11  
Configuración 4

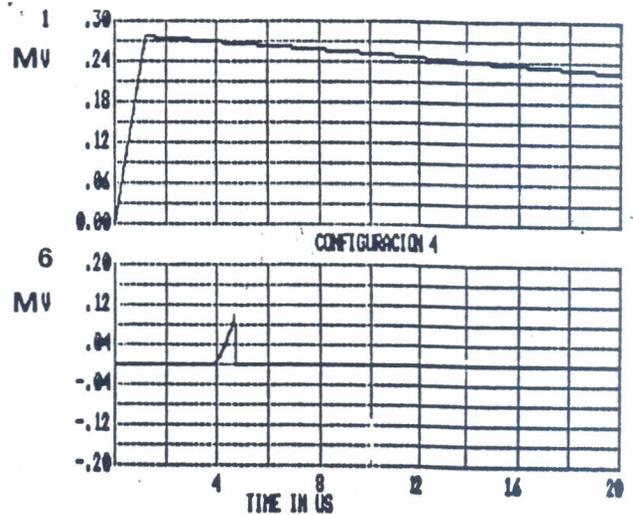


FIGURA 12  
Arriba: Tensión de fuente 12  
Abajo: Tensión sobre el transformador

Por supuesto que no se duda sobre la utilidad de colocar un descargador directamente sobre el transformador. Las configuraciones 1, 2 y 3, que no lo tenían, se analizaron para mostrar que los descargadores colocados en las columnas previas a la del transformador no disminuyen suficientemente la tensión de cresta de las ondas que viajan por la línea.

## 5. CONCLUSIONES

Se presentó un modelo que reproduce las características de protección de los descargadores de varillas. Este modelo tiene la virtud de usar componentes electrónicos comunes, por lo cual es utilizable en simples programas simuladores. Una corroboración experimental soporta al modelo presentado.

Se analizó mediante simulación digital el comportamiento de este tipo de descargadores en una configuración en la cual un conjunto de ellos están dispuestos en las columnas más próximas al transformador. Se asumió en este trabajo que las descargas de rayo están representadas por una fuente de tensión, cuya forma de onda es la normalizada.

Se concluyó que sólo el descargador sobre el transformador ofrece una protección real. El comportamiento de los restantes descargadores es irrelevante.

## 6. AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer la gran colaboración del Sr. Luis Astesiano en todo el relevamiento experimental.

## REFERENCIAS

- [1] M. Ramírez y H. Tinoco, "Características dieléctricas de un tipo de cuernos de arqueo para transformadores de distribución", TECNOLAB (México), Agosto 1986, pp. 1-9.
- [2] MICROCAP II, Spectrum Software, 1021 S. Wolfe Rd., Sunnyvale, CA 94086, U.S.A.
- [3] IEC Publication 60-2 (1973), High-voltage test techniques, Part 2: Test procedures.
- [4] IEC Publication 60-1 (1973), High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements.