



Niveles de aterramiento y rayo: simulación de sus efectos sobre el consumidor

Miguel Castro
Sindy Suárez
Fernando de Armas
Silvio M. Dorta

Recibido: octubre del 2005
Aprobado: diciembre del 2005

Resumen / Abstract

El objetivo del trabajo es el análisis, a través de MatLab, de los efectos que tienen, sobre las tensiones y corrientes que circulan por la carga y el neutro de una instalación, la condición de considerar los sistemas de puesta a tierra (SPT) del Centro de Transformación (CT) que alimenta una determinada instalación de uso y de la propia IU, separados físicamente e independientes, y sus valores de puesta a tierra cuando una descarga eléctrica atmosférica (DEA) impacta en el neutro o en una fase de línea de alimentación de la instalación. Los autores establecen la necesidad e importancia que tiene el definir los niveles de aterramiento en una instalación teniendo en cuenta de quién se va a alimentar y de sus condiciones de operación.

Palabras clave: calidad de la energía, compatibilidad electromagnética, descargas atmosféricas, rayos, sistemas de puesta a tierra

In this paper the authors, using MatLab, propose to analyze the influence in low voltage system of an electric atmospheric discharge when it impacts directly on neutral and/or phases conductor feeding an installation. Currents and voltage in the load are obtained and the authors analyze the relationship between system and consumer earth levels in these values under conditions previously mentioned.

Key words: power quality, electromagnetic compatibility, lightning, earthing systems

INTRODUCCIÓN

El principio de calidad de la energía eléctrica ha adquirido importancia relevante durante los últimos 20 años. Es sabido que muchos problemas que hoy día inciden en la calidad del servicio son consecuencias del propio desarrollo tecnológico de los últimos 40-50 años. El desarrollo de la electrónica y las comunicaciones, por poner un ejemplo, tiende a mejorar los procesos, a su automatización y control, a incrementar sus prestaciones, lo que ha hecho a su vez más sensibles dichos procesos, y con ello sus componentes, los efectos de fenómenos naturales como las descargas atmosféricas, o su espectro de fenómenos como son las interferencias, las distorsiones de armónicas, las fluctuaciones de

tensión y otros fenómenos propios del entorno electromagnético en el cual se desenvuelve la vida actual.

Lo anterior obligó a empresarios, académicos, políticos y a toda la sociedad a trazar estrategias y buscar formas que tiendan a reducir al máximo los problemas que, sobre los distintos usuarios, clientes o productores, provoca esta situación. Ya desde la década de los 70 del siglo XX se observa un movimiento a escala internacional en la búsqueda de las causas y efectos que sobre las cargas industriales y residenciales provocan estos fenómenos o perturbaciones, acentuándose a partir de los primeros resultados obtenidos en el marco de una nueva

especialidad que se denominó *power quality*, o calidad de la energía como hoy se le conoce de manera más general.¹

Desde el punto de vista de la realidad, es muy difícil de obtener información de lo que sucede cuando un rayo impacta en cualquiera de las zonas que conforman una edificación, pues los métodos de medición de las características del rayo son realmente muy costosos y complicados, no solo por la naturaleza aleatoria del fenómeno, sino también por la posibilidad real de realizar la medición en una edificación cualquiera, quedando este aspecto para instalaciones especialmente diseñadas para ello.

Por todo lo explicado, estos estudios utilizan medios auxiliares que permiten acercarse, en cierta medida, a la verdad de lo que ocurre, siendo uno de los métodos más utilizados la simulación, tanto a nivel de un laboratorio como a través de un software especializado.

Uno de los problemas más importantes en el estudio de los efectos de la DEA es el comportamiento de los SPT existentes en la instalación que utiliza la energía eléctrica y la que la alimenta (CT), y su interrelación física, lo cual parte de considerar los niveles de aterramiento que deben ser considerados en ambos SPT y su interdependencia, para que no ocurran fenómenos o sucesos inesperados que pongan en peligro la continuidad y estabilidad del servicio en la instalación, o de los equipos que en ella funcionan, todo lo cual está involucrado en el concepto de calidad de la energía, en su más amplia fundamentación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La función de un SPT de una instalación eléctrica es la de dispersar en el terreno las corrientes de cualquier naturaleza que se pueden presentar ya sea por falla, frecuencia industrial, descargas atmosféricas o debidas a maniobras. La instalación de puesta a tierra debe cubrir un grupo de objetivos, entre los que se destaca, la seguridad de las personas, la continuidad del servicio y el establecimiento y continuidad de un potencial de referencia.

Un SPT debe cumplir con requisitos mínimos entre los cuales se encuentran:

1. El valor de la resistencia debe ser el adecuado para cada tipo de instalación.
2. La variación de la resistencia, debida a cambios ambientales, debe ser mínima.
3. Su vida útil debe ser mayor de 20 años.

4. Debe ser resistente a la corrosión.

5. Su costo debe ser el más bajo posible, sin que se comprometa la seguridad.

6. Debe permitir su mantenimiento periódico.

En el estudio de una instalación de puesta a tierra existen dos objetivos a alcanzar, como se ha visto previamente:

a) La **seguridad para las personas**, tanto para aquellas que han de manejar las instalaciones eléctricas, como para las que no han de manejarlas pero se encuentran en las zonas de influencia de las instalaciones.

b) La **confiabilidad de las instalaciones eléctricas**, mediante la detección de las corrientes que circulan a tierra desde la instalación y eliminación de la falla.

Desde el punto de vista de su colocación en el terreno las puestas a tierra se pueden considerar separadas cuando entre sus electrodos no existe una conexión específica.² Una puesta a tierra se considerará independiente con respecto a otra, cuando una de las tomas de tierra no alcance, respecto a un punto de potencial cero, una tensión superior a 50 V, cuando por la otra circula la máxima corriente de falla a tierra prevista. Sin embargo, las instalaciones de puesta a tierra separadas pueden no ser independientes, si se encuentran suficientemente próximas; la única condición es que no estén unidas físicamente por medio de un conductor.

De acuerdo con el sistema de distribución que alimenta la instalación, las puestas a tierra de la misma pueden o no estar unidas a la toma de tierra del centro de transformación, e incluso estar conectadas al neutro del CT parcial o totalmente. En la referencia 2 se plantea que solo se podrán unir la puesta a tierra de la instalación de utilización (edificio) y la puesta a tierra de protección (masas) del CT, si el valor de la resistencia de puesta a tierra única es lo suficientemente baja para que se cumpla que en el caso de evacuar el máximo valor previsto de la corriente de falla a tierra (I_g) en el centro de transformación, el valor de la tensión de falla ($V_g = I_g \cdot R_t$) sea menor que la tensión de contacto máximo aplicada.

Ahora, sería interesante preguntarse:

1. ¿Pueden los SPT del CT y la instalación tener cualquier valor o existe una cierta dependencia entre ellos?
2. ¿Qué pudiera ocurrir cuando los SPT del CT y de una instalación de uso se consideran separados

físicamente e independientes, al impactar una DEA en el neutro o en una fase del sistema?

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA QUE IMPACTA EN EL NEUTRO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Uno de los objetivos del trabajo es analizar el efecto que provoca una DEA sobre la tensión que se produce en la carga (U_{carga}) y en el SPT de la instalación (U_{es}) debido a la circulación de corriente por el neutro que entra a la instalación y se une al sistema de tierra de la misma. Para el análisis³ se utiliza el esquema mostrado en la figura 1, así como se consideraran los SPT del CT y de la instalación separados físicamente e independientes.

Las condiciones de las simulaciones realizadas fueron dos: Que la DEA impacte en el neutro del sistema y que impacte en la línea de alimentación.

Para todos los casos se procedió a obtener el circuito equivalente del esquema básico mostrado en la figura 1, cambiando las condiciones de análisis según el caso considerado, ya que para la primera condición expresada anteriormente el circuito queda representado según se muestra en la figura 2.

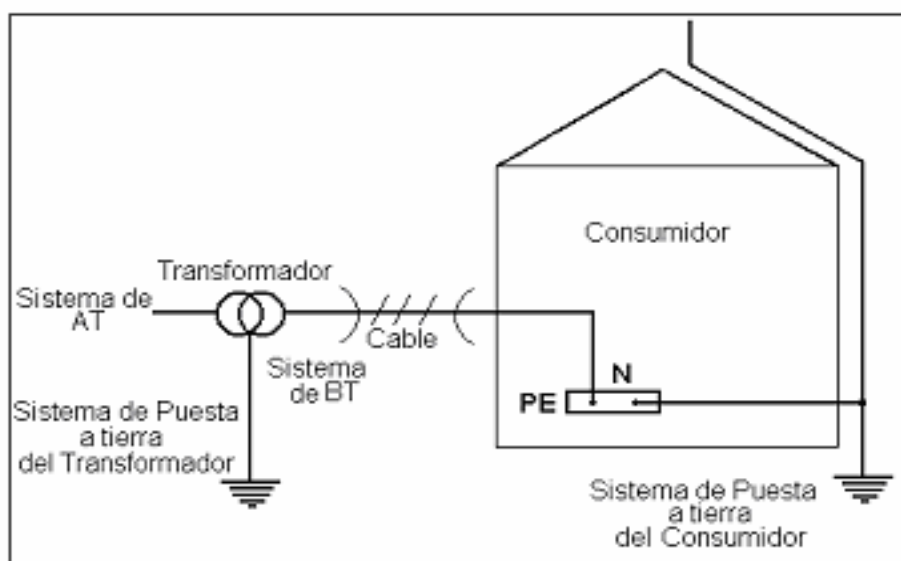
El aplicar las leyes de Kirchoff a dicho circuito es posible obtener las ecuaciones básicas para la simulación, que serán:

$$U_{tr} + R_{\text{cable}} \cdot I_{l1} + L_{\text{cable}} \cdot \frac{dI_{L1}}{dt} + U_{\text{carga}} - R_{\text{ctn}} \cdot I_{n1} - L_{\text{ctn}} \cdot \frac{dI_{n1}}{dt} + R_n \cdot I_{n2} = 0$$

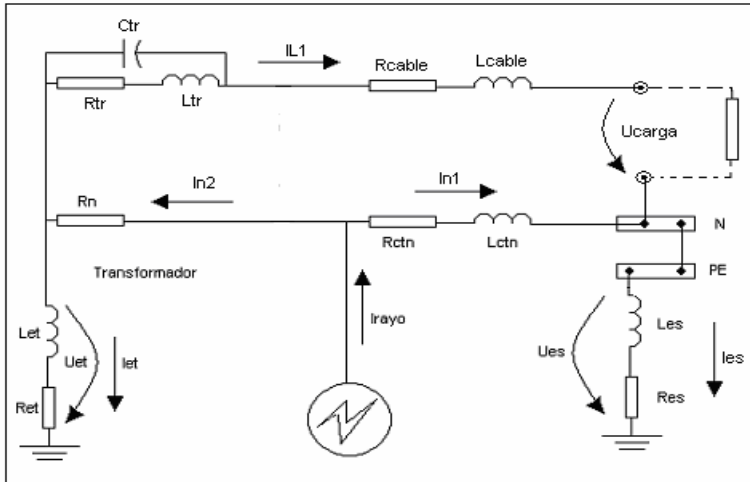
$$-U_{es} - U_{\text{carga}} - R_{\text{cable}} \cdot I_{L1} - L_{\text{cable}} \cdot \frac{dI_{L1}}{dt} - U_{tr} + I_{et} \cdot R_{et} + L_{et} \cdot \frac{dI_{et}}{dt} = 0$$

El esquema de Simulink de MatLab empleado, a partir de las ecuaciones básicas, es el que se presenta en la figura 3. Los datos utilizados para la corrida inicial se muestran en la tabla 1, y gráficamente se obtienen resultados como los que se presentan en la figura 4.

A partir del esquema básico de la figura 2 se modificaron algunos parámetros del circuito para analizar el comportamiento del mismo; para ello se variaron las magnitudes de las resistencias de aterramiento de ambos sistemas entre 2 y 30Ω , observándose la variación de la tensión en la carga.⁴ En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos de tensión para los diferentes juegos de resistencias.



Esquema base para los análisis.

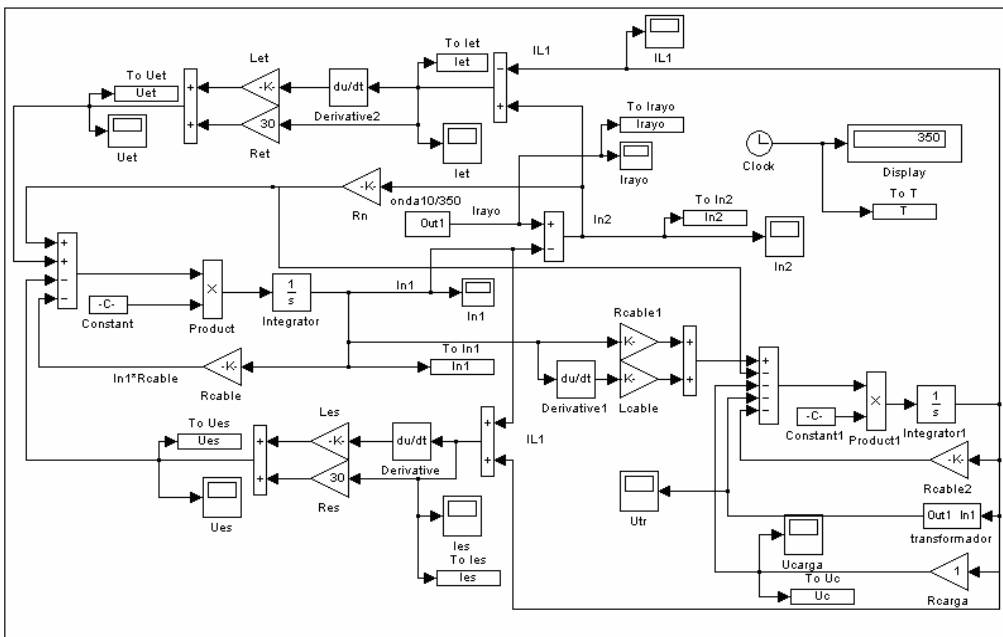


Circuito equivalente utilizado para la simulación.

2

Tabla 1
Valores de las componentes del circuito utilizadas en la simulación

$L_{et} = 5 \mu H$	$L_t = 50 \mu H$
$R_{et} = 30 \Omega$	$L_{cable} = 9,5 \mu H$
$R_t = 5 m\Omega$	$L_{ctn} = 9,5 \mu H$
$R_{es} = 30 \Omega$	$R_{ctn} = 12,5 m\Omega$
$R_{cable} = 12,5 m\Omega$	$S_n = 400 kVA$
$L_{es} = 5 \mu H$	$C_t = 2 nF$
$R_n = 2 m\Omega$	$I_{rayo} \text{ máx} = 100 kA$



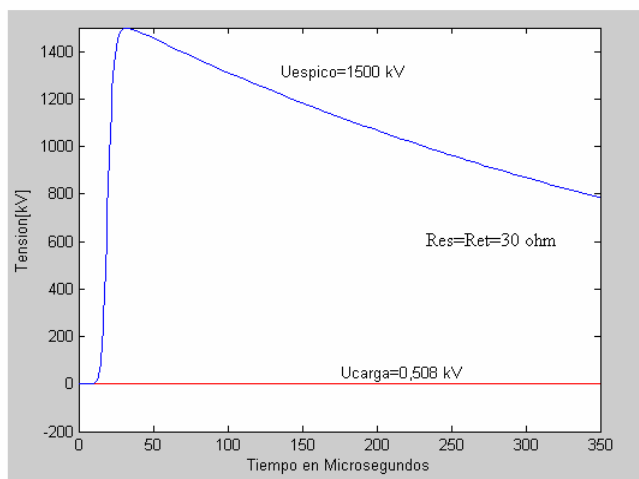
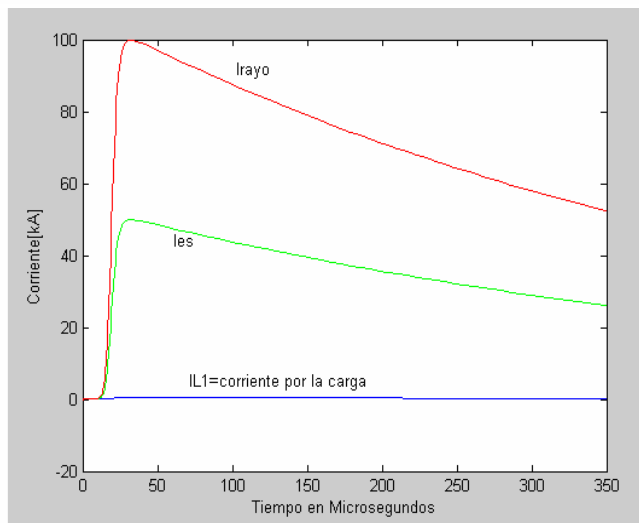
Esquema en Simulink para el análisis inicial.

3

Tabla 2

Tensiones obtenidas en la carga al impactar una DEA en el neutro en función de la resistencia en los SPT de la instalación y del CT

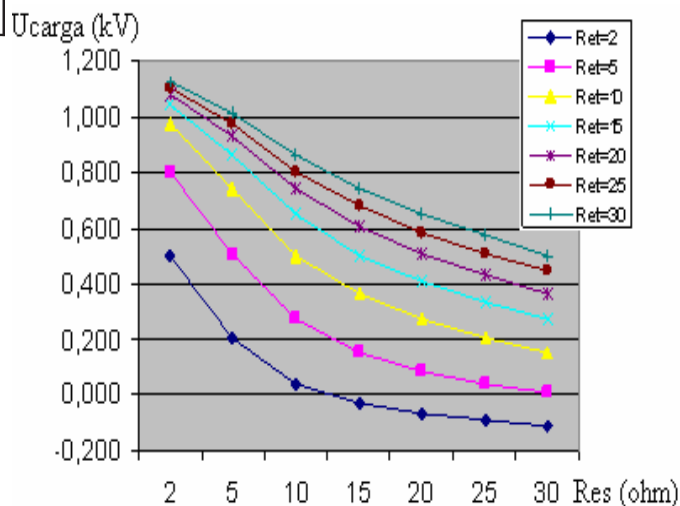
Valores de la resistencia de aterramiento en el consumidor	Valores de la resistencia de aterramiento del transformador						
	2	5	10	15	20	25	30
2	0,500	0,800	0,975	1,044	1,082	1,105	1,122
5	0,207	0,508	0,740	0,860	0,929	0,976	1,009
10	0,040	0,274	0,500	0,648	0,742	0,800	0,859
15	-0,029	0,157	0,367	0,500	0,608	0,683	0,742
20	-0,066	0,087	0,274	0,408	0,508	0,586	0,649
25	-0,090	0,040	0,207	0,332	0,430	0,508	0,572
30	-0,106	0,007	0,155	0,274	0,367	0,444	0,500

Tensión entre la barra de equipotencialización y tierra (U_{es})Corriente que circula por el SPT de la instalación (I_{es})

Muestra de las tensiones y corrientes obtenidas en Simulink

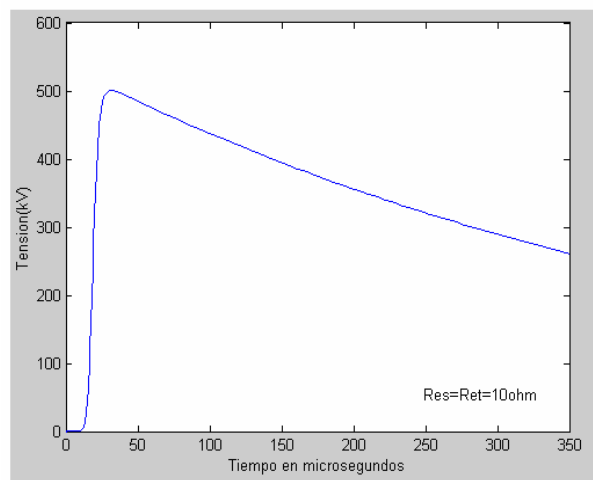
Los resultados pueden verse gráficamente en la figura 5, y de esta se puede deducir que la tensión en la carga va a depender, al impactar un rayo en el neutro del transformador, no solo de la resistencia de aterramiento de la instalación sino también de la resistencia de aterramiento del CT, **y en particular de la relación que ambas posean: si la resistencia de aterramiento del consumidor es inferior a la del transformador pueden provocarse tensiones muy altas en la carga.**

A su vez, la figura 6 muestra la curva de tensión entre la barra de equipotencialización y tierra (U_{es}) en el tiempo, para el caso en que las resistencias de los dos SPT sean iguales a 10Ω , valor mínimo establecido por la IEC-61024;⁵ aquí se aprecia una disminución del 60 % del valor de la tensión en relación con el inicial, lo cual coincide con los criterios anteriormente expuestos.



Tensión en la carga al impactar una DEA en el neutro del sistema.

5

Curva de tensión entre neutro y tierra (U_{es}) para los valores mínimos exigidos por la IEC 1024.

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA AL IMPACTAR UNA FASE DEL CT

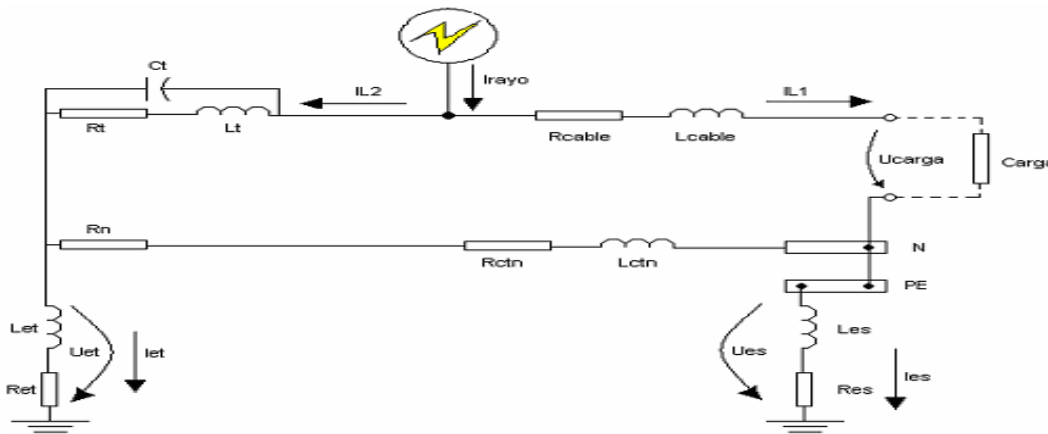
El circuito equivalente para la simulación, que representa la condición a analizar, se presenta en la figura 7, mientras que los resultados obtenidos se muestran en la figura 8.

Como se puede observar en la figura 8, la tensión que se presenta entre la fase y la barra de equipotencialización asciende a 1,2 kV; esta elevación de la tensión sobre el valor de tensión nominal, producido por la descarga atmosférica, trae graves consecuencias para todos los equipos eléctricos que alimenta esta fase.

La posibilidad de evitar este problema se presenta con el uso de una protección interna que desvíe la

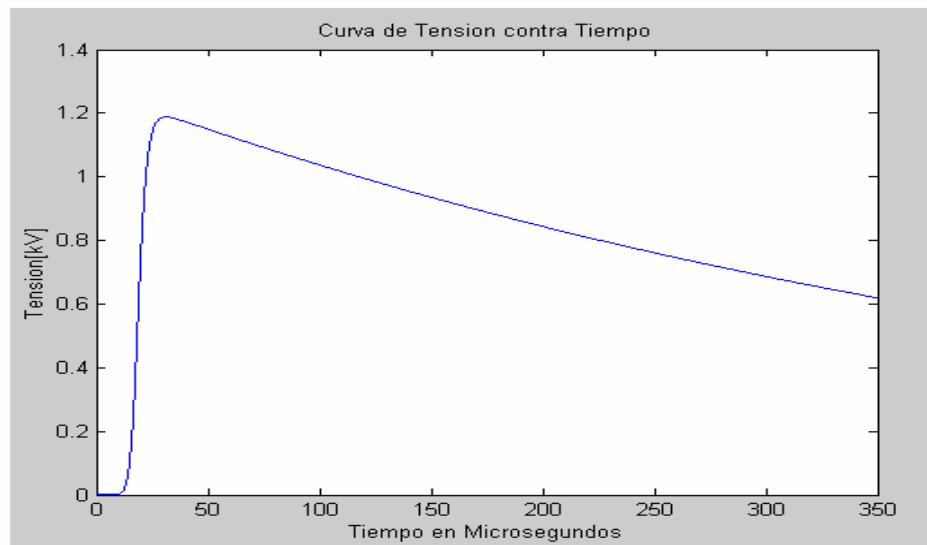
corriente en exceso hacia tierra de forma segura y mantener así la tensión nominal en la carga, lo cual no es objetivo de este trabajo.

Es importante destacar que esta primera simulación se realizó para carga unitaria ($R = 1\Omega$), pero en simulaciones posteriores con el mismo esquema se variaron los valores de la carga desde 1 hasta 10 000 Ω , obteniéndose el mismo valor de tensión entre la fase y la barra de equipotencialización, **lo que lleva a pensar que la magnitud de la carga no va ser factor que determine la tensión que se va a producir en la misma por el impacto de un rayo**; esta situación obliga a pensar en otros ajustes que podrían hacer que el efecto del impacto directo del rayo sea menor, entre los cuales puede señalarse la variación de la resistencia de los SPT.



Circuito equivalente para analizar el impacto de una DEA en una de las fases del secundario del CT.

7



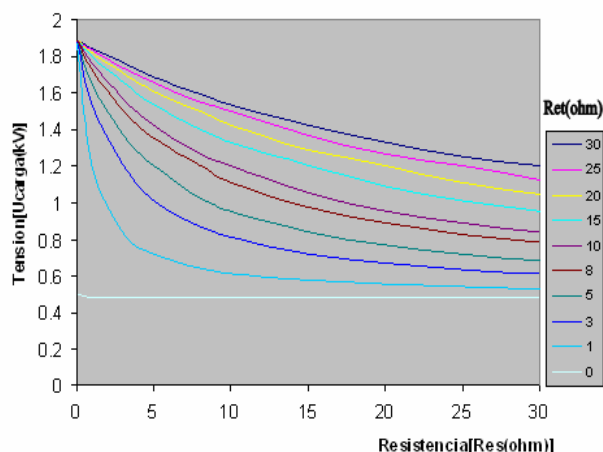
Tensión en la carga al impactar una DEA en una fase del CT.

8

Manteniendo el mismo modelo de simulación, se trabajó con un juego de 10 valores de resistencias, para ambos SPT, obteniéndose el gráfico de la figura 9.

Como se puede apreciar la tensión en la carga aumenta en la medida que la resistencia de aterramiento de la instalación disminuye, **por lo que de este gráfico se pudiera concluir que para garantizar una menor tensión entre fase y barra de equipotencialización, la resistencia del SPT de la instalación debe ser mayor que la resistencia del SPT del CT que alimenta la instalación.**

Curvas de comportamiento de Ucarga cuando se varia la Res y se mantiene constante en un valor Ret.



Influencia de los valores de los SPT en el valor de tensión en la carga.

9

CONCLUSIONES

1. A medida que se disminuye la resistencia del SPT de la instalación, la tensión en el neutro disminuye, así como la distribución de las corrientes por los SPT del CT y de la instalación va a estar determinada por los valores de resistencia de los mismos.
2. La resistencia de aterramiento va a ser factor fundamental en la variación del valor de tensión obtenido entre la barra de equipotencialización y fase (carga).
3. El valor de la carga no influye sobre la tensión que se presenta en el neutro, así como no va a ser factor de la tensión que se induzca en la misma al impactar una DEA en cualquiera de los puntos analizados.
4. Con el fin de garantizar una menor tensión tanto en el neutro como en la carga, para el caso en que el SPT de la instalación (protección) esté conectado al neutro del sistema, y este a su vez se encuentre conectado al SPT del CT (sistema TNC), la resistencia del SPT de la misma debe ser mayor que la resistencia del SPT del CT que alimenta la instalación. En caso

contrario, las tensiones que se producirán en el sistema consumidor pueden ser muy dañinas para el mismo, y las medidas para su limitación menos económicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al ingeniero Roberto Ugarte Berazaín y al doctor Juan Almirall Mesa por las observaciones realizadas al trabajo, así como a la doctora Miriam Vilaragut Llanes por su apoyo en el trabajo con el MatLab.

REFERENCIAS

1. **Torres, H. y otros:** *Energía Eléctrica, un producto con calidad*, ICONTEC, Bogotá, DC, Colombia, s/f.
2. "Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias (ITC) BT 01 a BT 51", aprobado por el REAL DECRETO 842/2002, de 2 de Agosto, publicado en el *Boletín Oficial del Estado*, Año CCCXLII del miércoles 18 de septiembre de 2002, *Suplemento del Número 224*.
3. *IEC-61312-3/2000; Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse (LEMP); Part 3: Requirements of Surge Protective Devices (SPDs)*.
4. **Suárez, S. S.; F. M. Castro y G. F. de Armas:** "Simulación de la influencia del impacto directo de una descarga atmosférica en la alimentación de un sistema de baja tensión", Trabajo de Diploma, CIPEL, Ciudad de La Habana, julio, 2004.
5. *IEC-61024/1-2-98. Protection of Structures Against Lightning. Part 1-2: General Principles*. Guide B-Desing, Installation, Maintenance and Inspection of Lightning Protection Systems.
6. **Betancourt, O. A.; G.Y. Pérez,; M. Castro y R. Betancourt:** "Simulación del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra asociados a una instalación de utilización en baja tensión", Trabajo de Diploma, CIPEL, Ciudad de La Habana, julio, 2005.

AUTORES

Miguel Castro Fernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:mcastro@electrica.cujae.edu.cu

Sindhy Suárez Sotelo

Ingeniero Electricista, Ciudad de La Habana, Cuba

Fernando de Armas García

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Buró Ejecutivo del Comité Electrotécnico Cubano (CEC), Ciudad de La Habana, Cuba

Silvio Manuel Dorta Herrera

Ingeniero Electricista, Unión Eléctrica, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:silvio@oc.une.cu