



## Modelación en ATP de posibles transitorios que pueden ocurrir en redes de distribución eléctrica

Alfredo Ramírez  
Ángel C. Valcárcel

Recibido: Octubre del 2006  
Aprobado: Diciembre del 2006

### Resumen / Abstract

En los sistemas de distribución resulta muy frecuente la ocurrencia de sobretensiones que ponen en peligro a las personas y al equipamiento. En el presente trabajo con la ayuda del ATPDRAW se desarrolla una modelación que permite conocer las variaciones de potencial que provocan diferentes transitorios que pueden tener lugar en estos sistemas. Las causas fundamentales de sobretensiones transitorias en sistemas de distribución y modeladas en este trabajo son: Caída de una línea de media tensión (MT) sobre una línea de baja tensión (BT), en diferentes sistemas de distribución; voltajes inducidos por impactos de rayos a tierra en las cercanías de líneas de distribución y sobretensiones por impacto directo de descargas atmosféricas en los pararrayos de una edificación en función del modo de conexión de estos a tierra con respecto al resto de los elementos del sistema que también se conectan a tierra.

Palabras clave: Líneas de distribución, descargas atmosféricas, sobretensión

*The occurrence of overvoltage putting people and equipment in danger is frequent in distribution systems. On this paper, we present a modeled that has been developed with the use of the ATP package, which allows to know the variations in voltage caused by different transitory occurring in these systems. The fundamental causes of transitory overvoltage in distribution systems modeled for this paper are: Drop of a middle voltage line over a low voltage line for different distribution systems; Voltages induced by flashover on the ground near distribution lines y overvoltage by direct lightning strike on lightning rods on top of a building according to their ground connection as regards the other grounded elements of the system.*

*Key words: Distribution line, lightning, overvoltage*

### INTRODUCCIÓN

Existen diferentes causas de sobretensiones en redes de distribución, entre las que se pueden mencionar:

- Las provocadas por caída de líneas de MT sobre las líneas de BT.
- Las provocadas por descargas atmosféricas
- Conexión de líneas frías.
- Fenómenos de resonancia.

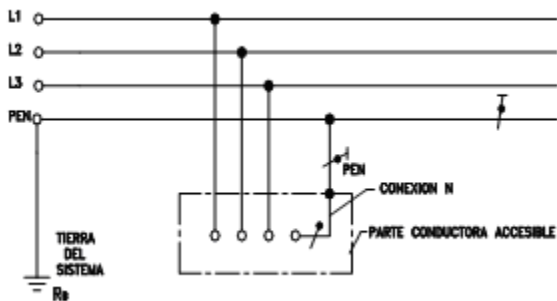
De estas, las más frecuentes y que mayores sobretensiones provocan son las dos primeras.

La conexión de líneas frías afecta fundamentalmente a los consumidores que están al final del circuito y los fenómenos de resonancia en distribución son poco frecuentes, pero además, las magnitudes de estas sobretensiones dependen de la cantidad de energía atrapada en el momento de la resonancia, y esta es baja en distribución por lo que los dos fenómenos se pueden descartar.

## ANÁLISIS PARA DIFERENTES SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE SOBRETENSIONES PROVOCADAS POR CAÍDA DE LÍNEAS DE MT SOBRE LAS LÍNEAS DE BT

### Sistema TN-C

La figura 1 muestra el esquema de un sistema TN-C.<sup>1</sup>



Sistema TN-C: Las funciones de protección (PE) y de neutro (N) están combinadas en un mismo conductor (PEN).

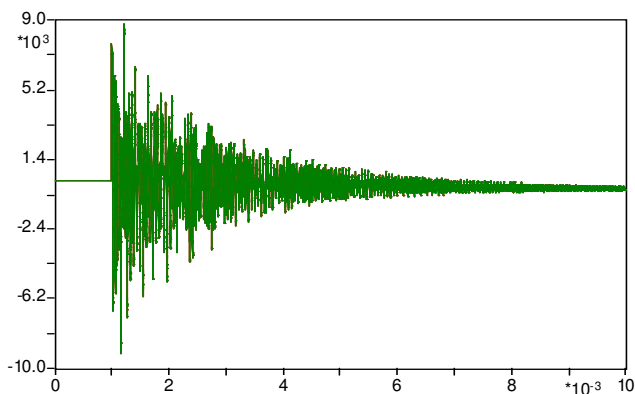
1

Como se observa en la figura 2, para un modelo como el mostrado en la figura 3, la caída de una línea de MT sobre el neutro de la línea de BT provoca sobretensiones entre el conductor pen y el conductor de fase que supera los 9 kV, esto para un tiempo de limpieza de falla de solo 9 ms, tiempo que en la práctica es superior, lo cual no influye en la magnitud de las máximas tensiones mencionadas.

### Sistema TN-S

La figura 4 muestra el esquema de un sistema TN-S.<sup>1</sup>

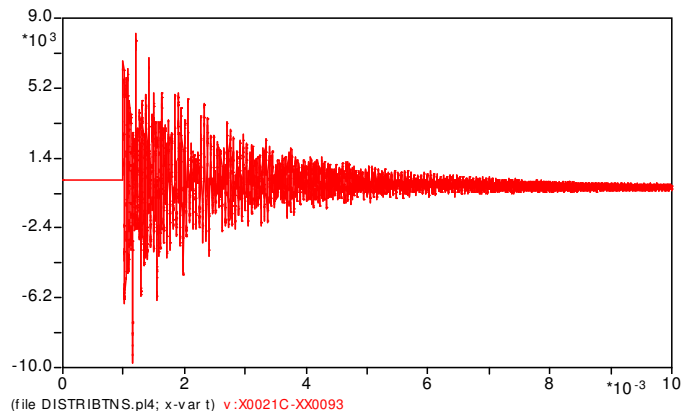
En este caso, la caída de una línea de MT sobre el neutro de la línea de BT, provoca sobretensiones entre el conductor neutro y el conductor de fase y entre el conductor de protección y el de fase, muy similares a las que se producen en un sistema TN-C (figuras 2, 3 y 5).



Tensión entre conductor pen y conductor de fase.

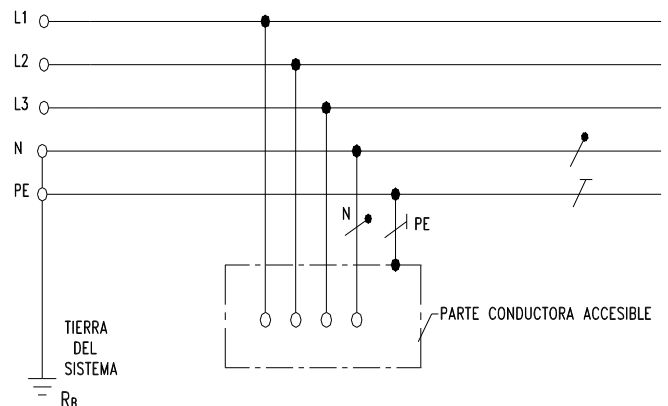
2

Asímismo aparece una diferencia de tensión entre el conductor de protección y el neutro (figura 6), muy peligroso en estos casos, tanto para el equipamiento como para las personas.



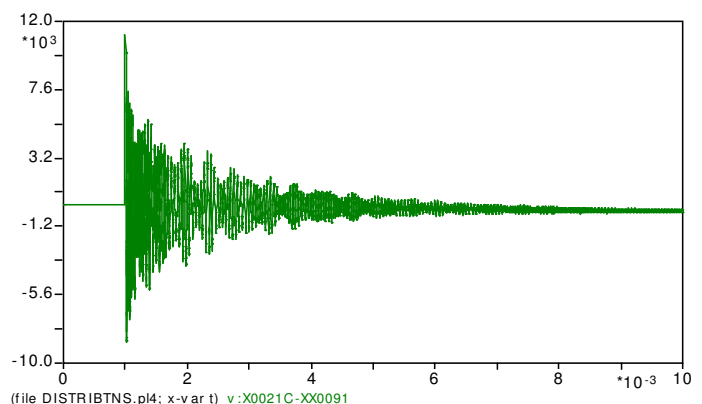
Tensión entre conductor neutro y conductor de fase.

3



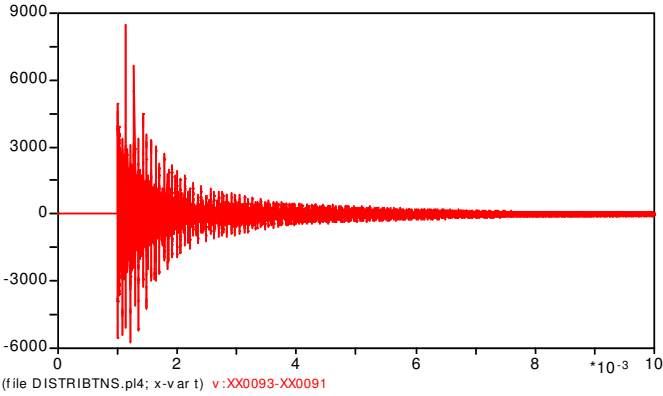
Sistema TN-S: Conductores neutro (N) y de protección (PE) separados a través de todo el sistema.

4



Tensión entre conductor de protección y conductor de fase.

5



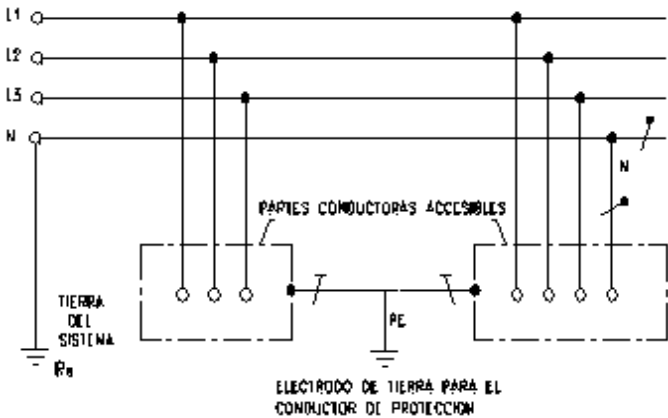
Tensión entre conductor neutro y conductor de protección.

6

**Sistema TT**

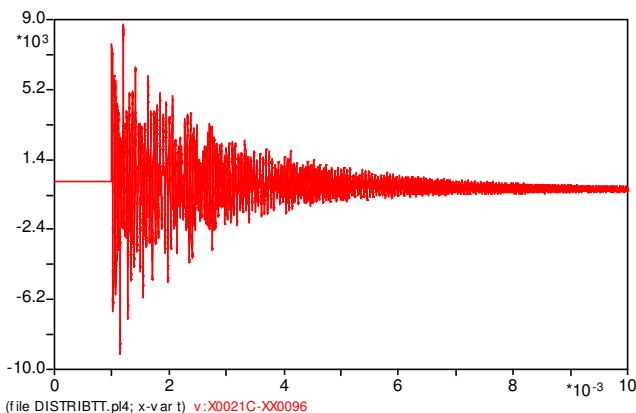
La figura 7 muestra el esquema de un sistema TT.<sup>1</sup>

En un sistema como este, el comportamiento es muy similar al observado en el caso anterior, pero el transitorio dura un mayor tiempo por lo que puede ser más dañino para los consumidores (figuras 8, 9 y 10).



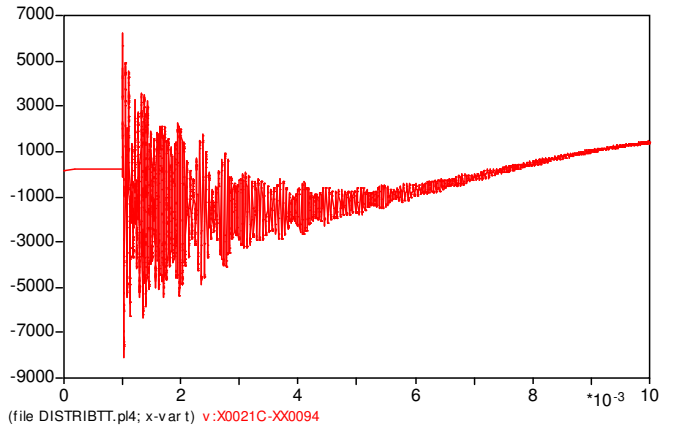
Sistema TT.

7



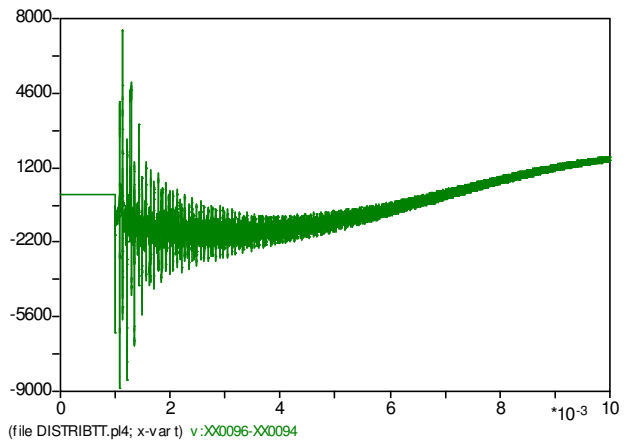
Tensión entre conductor neutro y conductor de fase.

8



Tensión entre conductor de protección y conductor de fase.

9



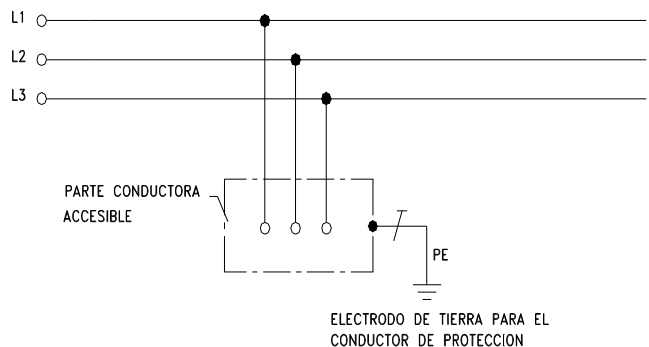
Tensión entre conductor neutro y conductor de protección.

10

**Sistema IT**

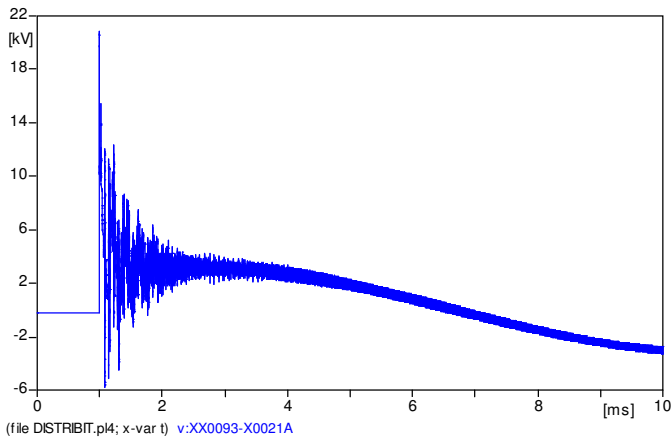
La figura 11 muestra el esquema de un sistema IT.<sup>1</sup>

En un sistema como este se supone que no existe neutro y la línea de MT cae sobre uno de los conductores de fase de BT. En dicho caso los niveles de sobretensión superan los 20 kV (figura 12), es el caso más crítico de todos los analizados.



Sistema IT.

11



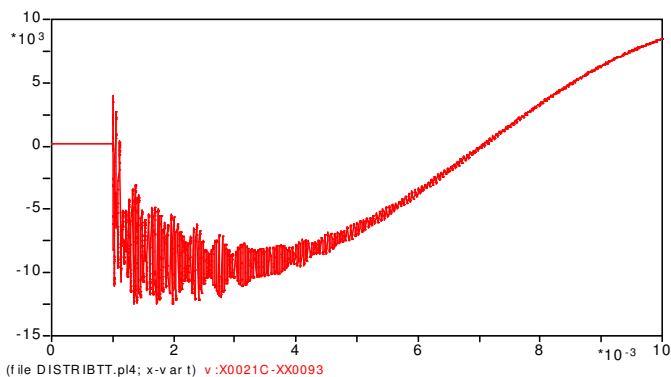
Tensión entre conductor de protección y conductor de fase.

12

### Efecto de la magnitud de la resistencia de puesta a tierra

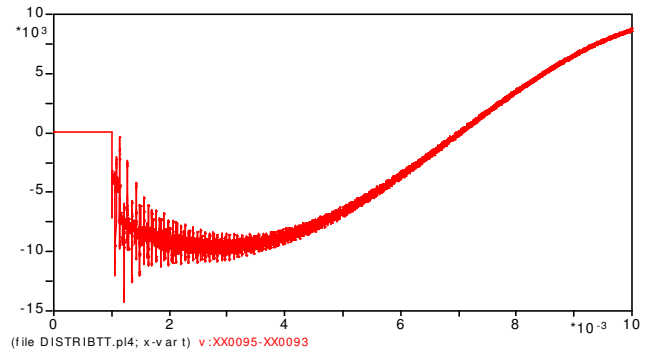
La magnitud de la resistencia de puesta a tierra, independiente del conductor de protección de los sistemas TT e IT, no influye en los niveles de sobretensión; sin embargo, la resistencia de puesta a tierra del transformador sí tiene un efecto considerable en estos sistemas, específicamente en la tensión entre conductor de protección y conductor de fase, y, entre neutro y conductor de protección. No así en el TN-C y TN-S, donde las sobretensiones son casi independientes de la magnitud de la resistencia de puesta a tierra del transformador.

Las figuras 13 y 14 muestran las sobretensiones producidas en un sistema TT para una resistencia de puesta a tierra en el transformador de  $100 \Omega$ . En el análisis anterior esta resistencia era de  $10 \Omega$ . Como se aprecia en este caso, las sobretensiones son mayores a las de las figuras 9 y 10.



Tensión entre conductor de protección y conductor de fase para un sistema TT.

13



Tensión entre conductor de protección y neutro para un sistema TT.

14

### ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

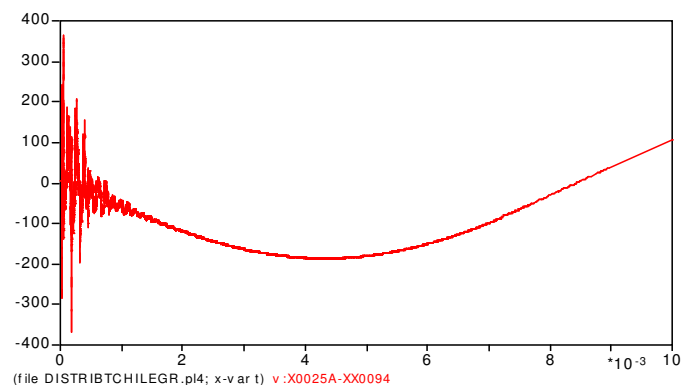
Las descargas atmosféricas son una de las causas fundamentales de daños a personas y equipos en las instalaciones eléctricas, tanto por impactos directos como indirectos.

### Sobretensiones inducidas por impactos cercanos a las líneas

Suponiendo, no la incidencia de un rayo directamente sobre la línea de MT (con resultados catastróficos), sino, una tensión inducida producto de un impacto a tierra en las cercanías de la línea, las sobretensiones que pueden ser transferidas al lado de baja tensión si las protecciones no operan adecuadamente (figuras 15, 16 y 17).

### Sistemas de tierra. ¿unidos o separados?

Uno de los problemas más frecuentes que se presentan en una instalación eléctrica es definir si los diferentes sistemas de tierra se deben o no interconectar entre sí, y se acentúa más la duda si existen proveedores de sistemas o equipos que exigen al proyectista la instalación de su sistema de tierra



Tensión en la fase A.

15

separado o aislado del resto de los sistemas similares, argumentando que una falla o descarga ocurrida en cualquier otro sistema, contaminará y actuará gravemente, reduciendo drásticamente su continuidad, confiabilidad y seguridad.<sup>2</sup>

Como consecuencia existen dos alternativas:

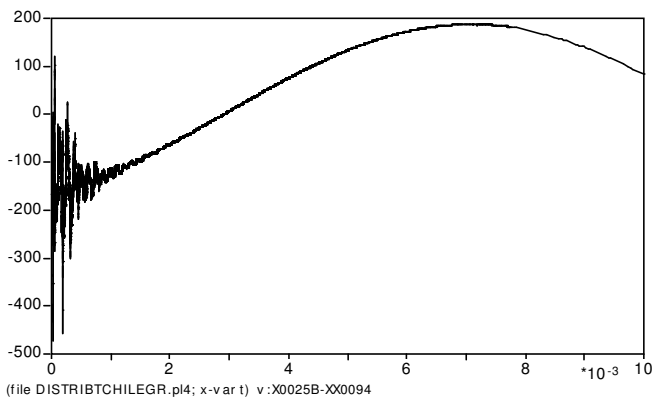
- Separar físicamente los diferentes sistemas.
- Interconectar todos los sistemas.

### Sistemas de tierra físicamente separados

Con este concepto, se tienen dos posibilidades que son:

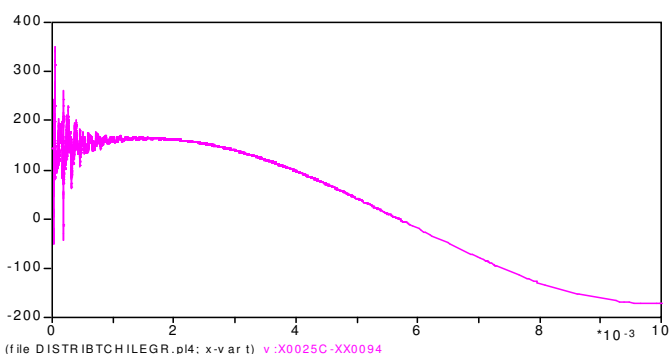
1. Que los electrodos o sistemas de tierra se encuentren físicamente separados y suficientemente alejados entre sí (sistemas aislados eléctricamente).
2. Que los electrodos o sistemas de tierra físicamente estén separados, pero muy cercanos entre sí (sistemas interconectados eléctricamente).

Los sistemas de electrodos o sistemas de tierra son independientes cuando la intensidad de la corriente de falla de uno de ellos no origina en el otro una tensión mayor a un valor, que según la literatura debe estar, entre 20 y 50 V, para lugares húmedos o secos respectivamente.



Tensión en la fase B.

16



Tensión en la fase C.

17

Diseñar con la seguridad de obtener un adecuado aislamiento entre los diferentes sistemas ante cualquier anomalía transitoria o permanente representa un reto.

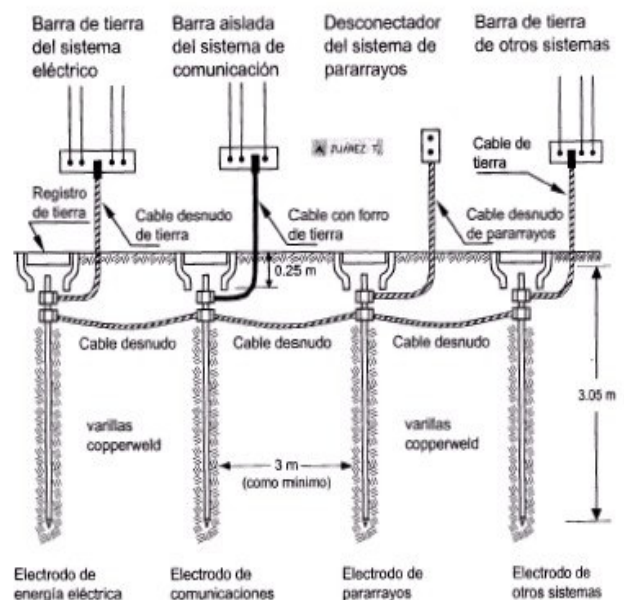
### Interconexión o unión de los sistemas de tierra

Es importante ratificar que los diferentes sistemas de tierra se deben desarrollar con conductores independientes y preferentemente por trayectorias distintas, donde el único punto de conexión debe ser la malla de tierra o los electrodos independientes interconectados a través de conductores que formen finalmente un mismo punto de referencia o una única tierra general.

### Objetivos de la unión de los electrodos o sistemas

1. Reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra como resultado de la resistencia equivalente.
2. Reducir la tensión de falla en el sistema de tierra.
3. Reducir el gradiente de potencial en el área cercana a los electrodos o sistemas de tierra.
4. Limitar las diferencias de potencial entre ellos y sus sistemas asociados, lograr un punto o área equipotencial.
5. Evitar tensiones peligrosas transferidas entre electrodos o sistemas de tierra.
6. Obtener una respuesta más rápida de los equipos de protección.
7. Obtener una red de tierra más segura y confiable.
8. Lograr una red más extensa y posiblemente con un número mayor de electrodos.

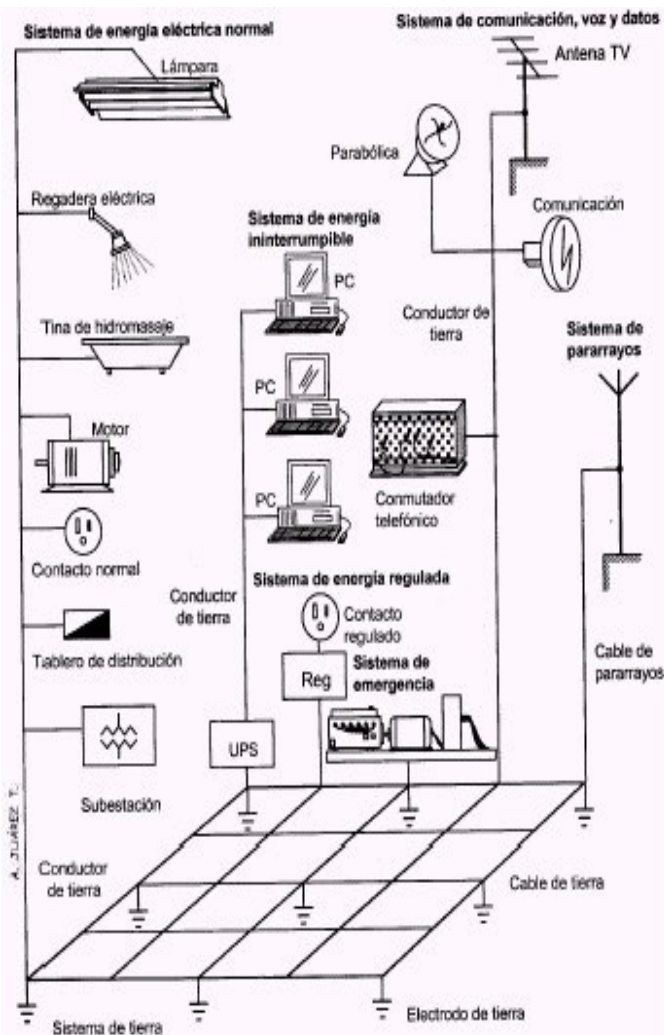
En las figuras 18 y 19, se muestran las formas en que deben realizarse las conexiones de la malla de tierra de los diferentes elementos del sistema.



Sistema de tierra con interconexión para igualar el potencial.

18

Como se puede apreciar en la figura 19, la conexión al sistema de tierra no se propone hacer a una barra equipotencial que concentre todos los grupos de elementos, sino que, cada grupo se conecte directamente a la malla en diferentes puntos de esta.



interconexión de los diferentes sistemas de tierra a un sistema común (malla general de tierra).

19

### Modelación en ATP de algunos ejemplos

Con la ayuda del ATP se modelaron cuatro posibles formas de conectar los grupos de elementos al sistema de puesta a tierra que permite valorar que es más adecuada, la unión o la separación de las tierras:<sup>3,4</sup>

1. Sistemas separados, con puestas a tierra suficientemente alejadas una de otra.
2. Sistemas separados, con puestas a tierra no suficientemente alejadas una de otra.
3. Sistemas interconectados a través de una barra equipotencial a una única puesta a tierra.
4. Sistemas interconectados a una única puesta a tierra con conexión independiente.

**Sistemas separados, con puestas a tierra suficientemente alejadas una de otra.** En las figuras 20 y 21, se muestran las variaciones de tensión entre fases y entre fase y neutro o conductor PE en un sistema TN-S. En este caso, se ha supuesto que el sistema de puesta a tierra del bajante de pararrayos es totalmente independiente del sistema de puesta a tierra del neutro del sistema y el conductor PE, y lo suficientemente alejados entre sí como para que no pueda haber influencia entre ellos.

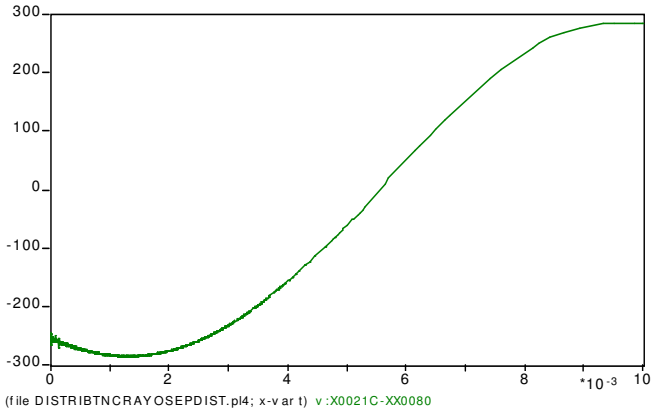
Como se puede apreciar en esas figuras, la inyección de corriente provocada por el impacto de un rayo en los pararrayos de la instalación no provoca sobretensión entre los conductores de fase ni entre fase y neutro o conductor de protección.

**Sistemas separados, con puestas a tierra no suficientemente alejadas una de otra.** En las figuras 22 y 23 se muestran las variaciones de tensión entre fases y entre fase y neutro o conductor PE en un sistema TN-S. En este caso se ha supuesto que el sistema de puesta a tierra del bajante de pararrayos está cerca del sistema de puesta a tierra del neutro del sistema y el conductor PE, por lo que puede haber influencia entre ellos.

También se observa en las figuras 22 y 23, la inyección de corriente provocada por el impacto de un rayo en los pararrayos de la instalación lo cual provoca sobretensiones considerables entre los conductores de fase y entre fase y neutro o conductor de protección.

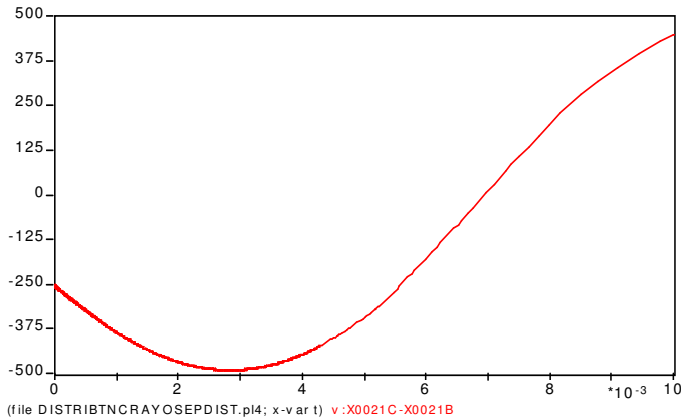
**Sistemas interconectados a través de una barra equipotencial a una única puesta a tierra.** En las figuras 24 y 25 se muestran las variaciones de tensión entre fase y neutro o conductor PE en un sistema TN-S. En este caso se ha supuesto que el sistema de puesta a tierra del bajante de pararrayos está conectado a una barra de conexión, a la cual se conecta también el neutro del sistema y el conductor PE, y de esta barra se hace la conexión al sistema de puesta a tierra.

En las figuras 24 y 25, se observa que la inyección de corriente provocada por el impacto de un rayo en los pararrayos de la instalación provoca sobretensiones entre los conductores de fase y entre fase y neutro o conductor de protección muy superiores incluso a las del caso anterior.



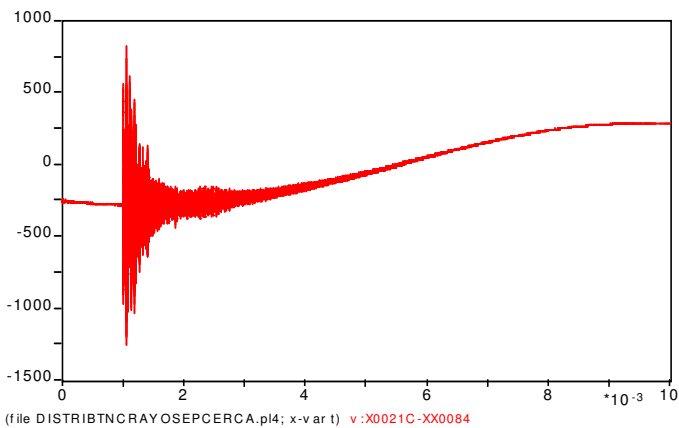
Tensión de fase a neutro o a conductor PE (con puestas a tierra alejadas una de otra).

20



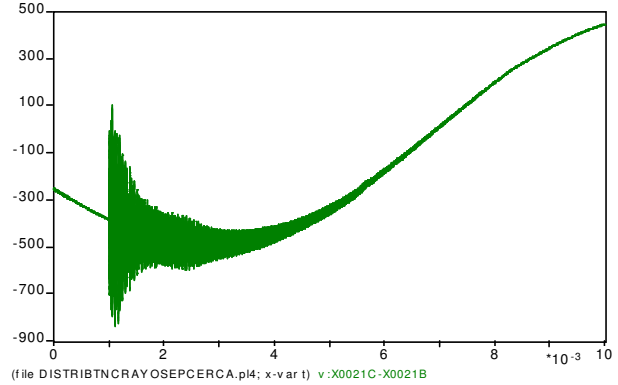
Tensión entre fases (con puestas a tierra alejadas una de otra).

21



Tensión de fase a neutro o a conductor PE (con puestas a tierra no alejadas una de otra).

22

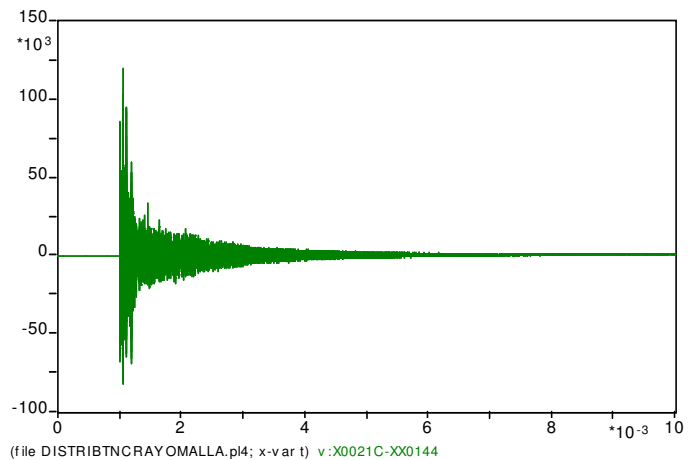


Tensión entre fases (con puestas a tierras no alejadas una de otra).

23

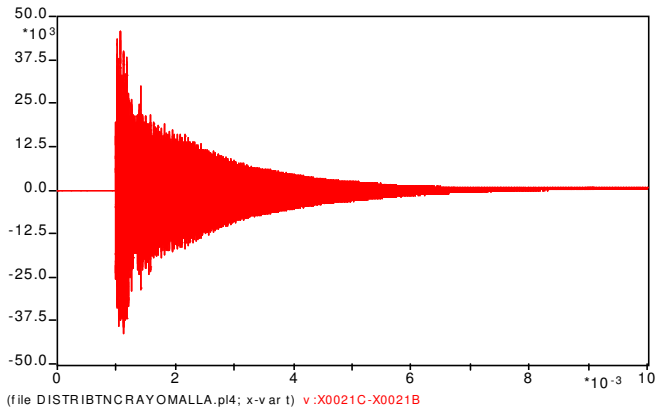
**Sistemas interconectados a una única puesta a tierra con conexión independiente.** En las figuras 26 y 27 se muestran las variaciones de tensión entre fase y neutro o conductor PE en un sistema TN-S. En este caso se ha supuesto que el sistema de puesta a tierra del bajante de pararrayos y el neutro del sistema y el conductor PE se conectan a la malla de tierra de forma independiente y a puntos diferentes de esta.

En ambas figuras (26 y 27) la inyección de corriente provocada por el impacto de un rayo en los pararrayos de la instalación no ocasiona sobretensión entre los conductores de fase ni entre fase y neutro o conductor de protección.



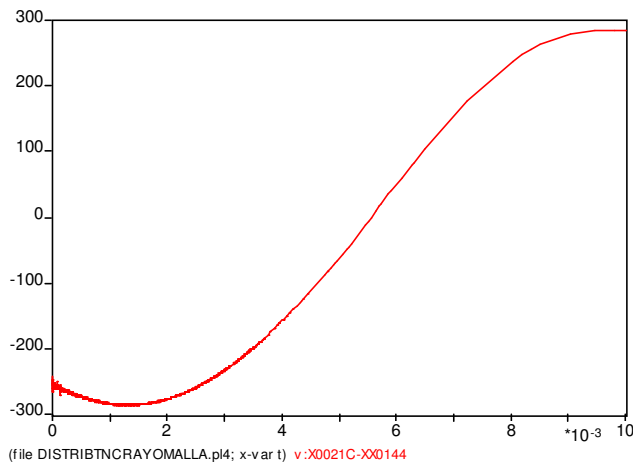
Tensión de fase a neutro o a conductor PE (interconectados a través de una barra equipotencial a una única puesta a tierra).

24



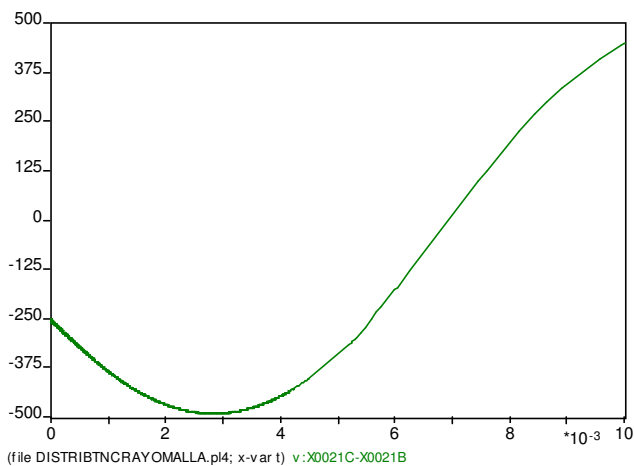
Tensión entre fases (interconectados a través de una barra equipotencial a una única puesta a tierra).

25



Tensión de fase a neutro o a conductor PE (interconectados a una única puesta a tierra con conexión independiente).

26



Tensión entre fases (interconectados a una única puesta a tierra con conexión independiente).

27

## CONCLUSIONES

1. La caída de una línea de MT sobre la de BT en sistemas de distribución siempre genera sobretensiones cuya magnitud depende del tipo de sistema de que se trate, siendo los más afectados los sistemas aislados y donde la magnitud de la resistencia de puesta a tierra del transformador solo afecta los sistemas TT.

2. Las descargas atmosféricas son fuente importante de sobretensiones en los sistemas de distribución fundamentalmente por los voltajes inducidos por descargas cercanas.

3. La decisión de separar o interconectar los sistemas de tierra, requiere de un análisis minucioso de cada caso en particular, en el que hay que tener en cuenta toda una serie de criterios, que evaluados correctamente permiten obrar adecuadamente. Además, es necesario conocer los máximos valores de corriente a disipar a tierra, la resistividad del terreno, los niveles de tensión soportables por el equipamiento a proteger, las dimensiones de las puestas a tierra, las condiciones de espacio reales del lugar de la instalación, entre otros.

## REFERENCIAS

1. Denis García, Virgilio: "Sistemas de distribución y tensiones eléctricas", Inversiones-Consejo de Estado, s/f.
2. Torres, Alfredo: "Sistemas de puesta a tierra", s/f.
3. Hernández Burgos, Julio A.: "Modelación en ATP de los fenómenos causantes de sobretensiones en redes de distribución", 2004.
4. *Manual de trabajo del ATPDRAW.*

## AUTORES

### Alfredo Ramírez Ramírez

Ingeniero Mecánico Electricista, Catedrático, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Veracruz, México  
e-mail:alamirez@uv.mx

### Ángel C. Valcárcel Rojas

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba  
e-mail:valca@uclv.edu.cu