

Análisis Transitorio de Sistemas de Puesta a Tierra

Daniel Hernández Arriaga¹, Cyntia Rocío Flores Juárez², Miguel Lindero Hernández³, Christian Edler Gómez Samaniego Frutos⁴
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica¹, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro^{1,4}, Av. Tecnológico s/n
esq. Mariano Escobedo Col. Centro, CP 76000, Querétaro, Qro. México.

Departamento de Ingeniería Industrial⁴, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro^{1,4}, Av. Tecnológico s/n esq. Mariano
Escobedo Col. Centro, CP 76000, Querétaro, Qro. México.

División Industrial Área de Nanotecnología, Universidad Tecnológica de Querétaro², C.P. 76148 Querétaro, Qro., México.
Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui³, Carretera Federal 57 Qro-SLP km 31-150 S/N Parque Industrial Querétaro C.P.
76220, Querétaro, México.

Correspondencia: daniel.ha@queretaro.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis del estado transitorio de sistemas de puesta a tierra, los cuales forman parte de los sistemas eléctricos. La propuesta de solución de esta metodología se basa en calcular el valor del voltaje inducido efectivo de un punto particular en un sistema de puesta a tierra. Esta solución constituye la base para el análisis del comportamiento transitorio de la red de tierras, debido a que esta configuración es la más óptima para disipar corrientes al interior del suelo. Los valores de los parámetros eléctricos calculados en el estado del tiempo se introducen en circuitos eléctricos diseñados para la simulación en el programa ATP y, por esta razón, se presentan exclusivamente cálculos y simulaciones de estado transitorio. Un pulso de corriente se aplica en un punto del circuito eléctrico y se obtiene el comportamiento transitorio de voltajes. Para esta metodología y los circuitos desarrollados, se modifican sus parámetros de diseño de instalación y las características del conductor, tales como la resistividad, profundidad, longitud y diámetro, con el fin de evaluar la influencia en el estado transitorio de la configuración geométrica bajo estudio.

Palabras clave: ATP, Alternative Transient Program, NOM – Norma Oficial Mexicana.

Abstract

This article presents the transient state analysis of grounding systems that are part of electrical systems. The proposed solution of this methodology is based on calculating the value of the effective induced voltage of a particular point in a grounding system. This proposed solution constitutes the basis for the analysis of the transient behavior of the grounding grids, this configuration is the most optimal to dissipate currents inside the ground. The values of electrical parameters calculated in the state of the time are introduced in electrical circuits designed for simulation in the ATP software for simulation, hence only transient state calculations and simulations are presented. A current pulse is applied at a point in the electrical circuit and the transient behavior of voltages is obtained. This methodology and the developed circuits modify their installation design parameters and conductor characteristics, such as resistivity, depth, length and diameter to evaluate the influence on the transient state of the geometric configuration under study.

Keywords: ATP, Alternative Transient Program, NOM – Norma Oficial Mexicana.

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de octubre de 2022

Aceptado:

09 de noviembre de 2022

Introducción

Los sistemas eléctricos operan la mayor parte del tiempo bajo condiciones de estado estable. Sin embargo, con frecuencia se presentan perturbaciones eléctricas que afectan las características de la energía. Entre éstas pueden mencionarse las maniobras de líneas, descargas atmosféricas, fallas, desbalances en la carga, arranques de motores y generadores, interferencia electromagnética, armónicos, resonancia, entre otros (Grcev & Markovski 2021). La propuesta de solución de esta metodología se basa en calcular el valor del voltaje inducido efectivo de un punto particular en un sistema de puesta a tierras. Esta propuesta se fundamenta en la ecuación diferencial en derivadas parciales desarrollada por Laplace (aplicada a la región de interés), así como de técnicas matriciales. La solución se obtiene en términos de coordenadas cartesianas para cada uno de los segmentos que la componen y en donde, se aplican las identidades de Bessel de orden cero. Los resultados se obtienen en forma matricial y referidos a cada uno de los segmentos de la red (Sakis Meliopoulos, 2018). Las magnitudes de los eventos transitorios originan en el usuario eléctrico final, condiciones tales como interrupciones de energía, transitorios eléctricos, depresiones, elevaciones y desbalances de corrientes y voltajes. El impacto de algunas de estas perturbaciones se puede reducir significativamente mediante un diseño adecuado de los sistemas de puesta a tierra (Kherif et al., 2018).

El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento transitorio de las redes de tierra, esto con el fin de mitigar las magnitudes de corriente y voltaje transitorios, en las cargas instaladas en los circuitos de la instalación eléctrica.

Se desarrolló una corrida de programación en el software MATLAB® para el cálculo de las magnitudes de los parámetros transitorios de la red, tales como conductancia, capacitancia, inductancia y resistencia. También se desarrollaron circuitos equivalentes en ATP para, en primer lugar, simular el comportamiento transitorio de los sistemas de puesta a tierra (desde la configuración de un conductor horizontal/vertical hasta el de una red) y, en segundo término, evaluar el impacto de diversos parámetros de

diseño, instalación y construcción de los sistemas de puesta a tierra.

Conceptos de sistemas de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra se define como aquella instalación eléctrica cuya finalidad es disipar corrientes de falla hacia el interior de la tierra. Estas corrientes pueden ser estacionarias o transitorias y son originadas durante la operación de un sistema, equipo o dispositivo eléctrico y, en algunos casos, por un fenómeno natural del tipo de descargas atmosféricas. El sistema de puesta a tierra normalmente se integra de conductores, electrodos y conectores y puede ser desde un simple conductor enterrado, hasta una configuración más compleja como la de una red.

Un sistema de puesta a tierra también tiene como propósito controlar el voltaje a tierra dentro de ciertos límites predecibles. En general, el control del voltaje a tierra limita el voltaje a través del aislamiento de los conductores, lo cual permite reducir de riesgo de descarga a personas que podrían hacer contacto accidental con conductores energizados y sin aislamiento (Secretaría de Energía de México, 2014).

Metodología

Técnicas numéricas para el modelado de sistemas de puesta a tierra

El análisis de los sistemas de tierra parte del estudio de un electrodo hemisférico enterrado en el suelo de resistividad ρ (ver Figura 1). Como se puede observar, el centro del electrodo se localiza en la superficie de la tierra. Por otro lado, se consideran tanto un potencial denominado V , como una corriente eléctrica que fluye desde la superficie del electrodo hacia dentro de la tierra. La circulación de esta corriente en la tierra es como se muestra en la Figura 2, con líneas equipotenciales concéntricas a la superficie, generadas por la corriente eléctrica.

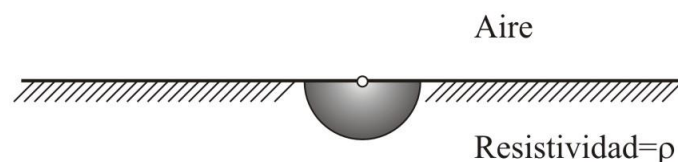


Figura 1. Sistema real de un electrodo hemisférico enterrado. Fuente: elaboración propia.

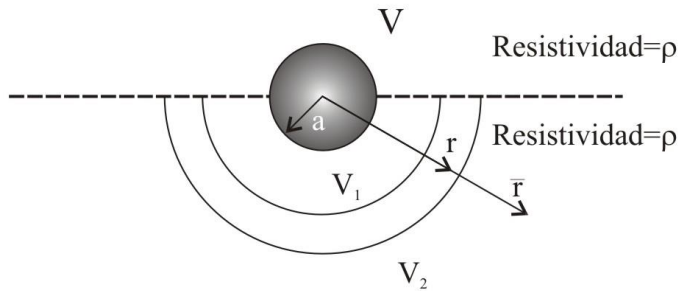


Figura 2. Sistema equivalente para sistemas de análisis de un electrodo hemisférico enterrado. Fuente: elaboración propia.

Si la corriente total I fluye desde la superficie del hemisferio hacia dentro de la tierra (en consideración de la semiesfera de la Figura 1), por simetría se tiene una corriente total de $2I$ (como podemos ver en la Figura 2). Entonces, se origina una densidad de corriente $J(r)$ a un punto localizado a una distancia r del centro del electrodo. Si se utiliza la ley de Ohm la intensidad del campo eléctrico en un punto localizado a una distancia r del centro de la esfera. El potencial de la esfera con respecto a un punto x que se localiza a una distancia $r = r_1$ desde la periferia del electrodo hasta la distancia mencionada. Para obtener el potencial cuando r_1 tiende al infinito, esto es V_∞ . La resistencia entre el electrodo y la tierra se obtiene por la siguiente ecuación (1):

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \tag{1}$$

A continuación, en la Figura 3 se muestra la inyección de la corriente y la generación de potencial en la superficie de la tierra:

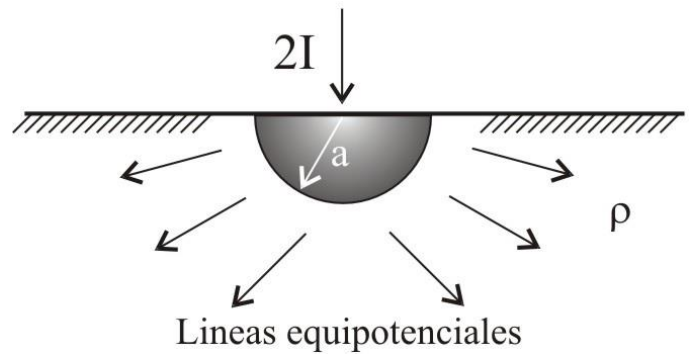


Figura 3. Distribución de potencial en la superficie de la tierra, generada por una esfera. Fuente: elaboración propia.

Cuando se presenta una falla en alguna parte de un sistema eléctrico, la distribución de corriente en la red de tierras origina incrementos significativos en el potencial de tierra. Como resultado, la corriente eléctrica emana de los elementos del sistema de tierra I_s y fluye hacia el interior de la misma.

Para determinar el incremento del potencial en un punto del sistema de tierra durante una falla, es necesario considerar una fuente de corriente puntual, pues ésta incide en una sección seminfinita de tierra conductora A_s y el objetivo es calcular el voltaje inducido en un punto A .

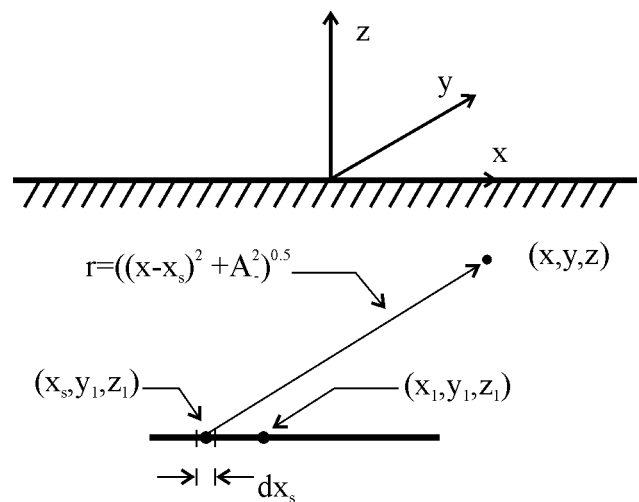


Figura 4. Fuente de corriente puntual que incide en una sección seminfinita de tierra conductora. Fuente: elaboración propia.

El voltaje en el punto A , expresado en coordenadas (r, ϕ, z) satisface la ecuación de Laplace dada por la expresión (2):

$$\nabla^2 V(r, \phi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V(r, \phi, z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V(r, \phi, z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V(r, \phi, z)}{\partial z^2} = 0.0 \quad (2)$$

Aquí, r, ϕ, z son las coordenadas del punto A relativo a un sistema de coordenadas cilíndricas (por la topología que presentan los conductores que se utilizan en la construcción de los sistemas de tierra). Por simetría, la solución es independiente de la coordenada ϕ . Así $V(r, \phi, z) = V(r, z)$ y por lo tanto la ecuación de Laplace (2) se modifica de la siguiente manera en (3):

$$\nabla^2 V(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

La solución para la ecuación (3) es la función de Bessel de orden cero J_0 :

$$V(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_{k=0}^{\infty} \theta(k) J_0(kr) e^{\pm kz} dk$$

La expresión $\theta(k)$ se determina por las condiciones de frontera. La solución tiene dos posibles formas funcionales, correspondientes a los signos $+$ y $-$.

La solución general para el voltaje en la región 2 es:

$$V_2(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} \theta_2(k) J_0(kr) e^{\pm kz} dk \quad z > 0$$

El voltaje en la región 1 es:

$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} J_0(kr) e^{-k|z-z_s|} dk + \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} \theta_1(k) J_0(kr) e^{kz} dk \quad z \leq 0$$

Si tomamos las condiciones de frontera $\theta_1 k$ y $\theta_2 k$, éstas provocan que tanto el voltaje como la corriente sean funciones continuas en ese punto específico.

La solución general para el voltaje en la región es:

$$V_2(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} \theta_2(k) J_0(kr) e^{\pm kz} dk \quad z > 0$$

En esta ecuación, los términos correspondientes a la propagación en la dirección de $+z$ (e^{\pm}) no se consideran porque $V_2(r, z) \rightarrow 0$ cuando $z \rightarrow +\infty$. El voltaje en la región 1 es:

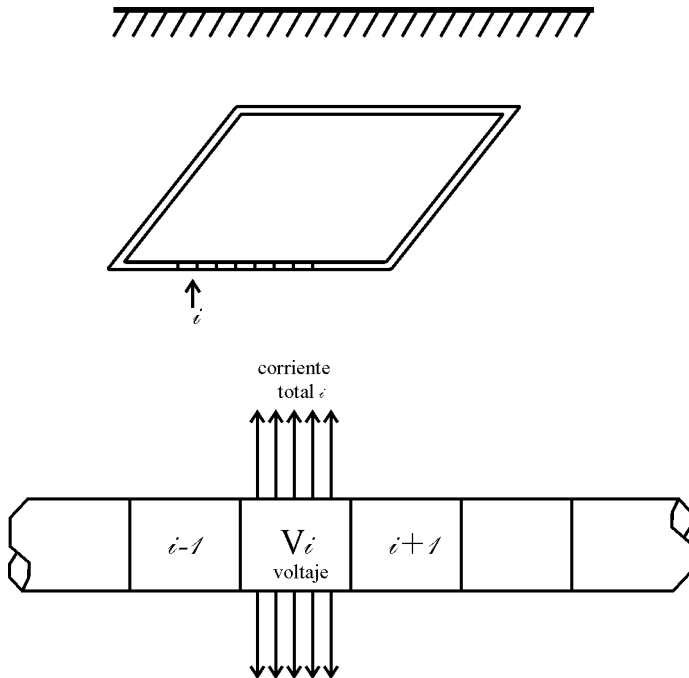
$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} J_0(kr) e^{-k|z-z_s|} dk + \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^{\infty} \theta_1(k) J_0(kr) e^{kz} dk \quad z \leq 0 \quad (4)$$

En la ecuación (4) el término correspondiente a la propagación en la dirección $-z$ (e^{-kz}) se omite porque $V_1(r, z) \rightarrow 0$ cuando $z \rightarrow -\infty$. Se considera la región 1 de interés. Estas ecuaciones, en las cuales se basa el cálculo de factor de distribución de voltaje, ya se reportaron previamente (Sakis Meliopoulos., 2018).

Método numérico aplicado al análisis de sistemas de puesta a tierra

La idea básica de este método consiste en dividir el sistema de tierra en pequeños segmentos como se muestra en la Figura 5a. Esta segmentación permite encontrar una relación entre el voltaje de los segmentos y la corriente eléctrica que emana desde su superficie hacia el interior de la tierra (ver Figura 5b).

Los electrodos se dividen en n segmentos. La corriente total I_i emana desde la superficie del segmento i y fluye hacia el interior de la tierra. El segmento i se representa como una fuente de corriente eléctrica puntual I_i (localizada en el centro del segmento) y un voltaje en la superficie V_i . Lo anterior se ilustra en la Figura 5.



b) Figura 5. Conductor dividido en segmentos. Donde: a) Sistema de tierra simple dividido en segmentos. b) Segmento de conductor dividido en $i - 1, i, i + 1$. Fuente: elaboración propia.

El modelo descrito puede aplicarse a los todos los segmentos ($i - 1, i + 1$, etc.). Además, de esta relación se pueden calcular los voltajes y corrientes para cada uno de los segmentos que forman parte de los conductores de los sistemas de puesta a tierra.

Para propósitos prácticos, en este trabajo se consideró conveniente dividir los conductores del sistema de tierra en un número finito de segmentos y, posteriormente, desarrollar las expresiones que relacionan el voltaje en un punto de la tierra y la corriente total que emana de un segmento finito del conductor. De lo anterior, el tamaño de la matriz es igual al número de segmentos en los que se dividió el conductor. Entre más segmentos existan, se obtendrá una mejor aproximación, pero el tamaño de la matriz se incrementará.

Combinación del método matricial con integración

El método matricial, descrito en la sección anterior, nos proporciona la distribución de la corriente a lo largo de los conductores de un sistema de tierra. Este análisis indica que la distribución de la corriente eléctrica es más o menos uniforme a lo largo del

conductor, excepto al final de éstos o en donde se cruzan con otros conductores. Lo anterior permite considerar que la densidad de corriente es constante a lo largo de segmentos pequeños del conductor.

Si se consideran dos segmentos de conductores, ambos parte de un sistema tierra, de longitud $2L_1$ y $2L_2$ (como se muestra en la Figura 6), las coordenadas del centro de los segmentos de conductor serán (x_1, y_1, z_1) y (x_2, y_2, z_2) , respectivamente.

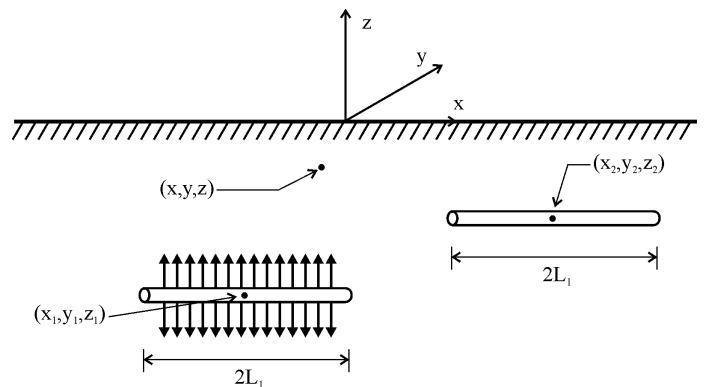


Figura 6. Dos segmentos de conductores enterrados. Fuente: elaboración propia.

Parámetros de estado transitorio de sistemas de puesta a tierra

Para el análisis del comportamiento transitorio de redes de tierra es necesario, en primer lugar, calcular los parámetros eléctricos de la red de tierras por unidad de longitud: la resistencia efectiva R , la conductancia G , la inductancia L y la capacitancia C ; todos, en el estado del tiempo al usarse una corrida en MATLAB®. Este procedimiento, se efectúa para los diferentes segmentos del conductor que forman parte del sistema de tierra, desde un conductor enterrado (horizontal o verticalmente) hasta la configuración de una red.

Posteriormente, para construir los circuitos equivalentes para el estudio del comportamiento transitorio de la red de tierras, se parte de un conductor sencillo hasta construir el circuito equivalente para una red de tierras completa.

En este análisis resulta conveniente considerar, en primera instancia, un sistema con un solo conductor, como se muestra en la Figura 7.

Análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra

También se debe considerar que el conductor se encuentra inmerso en un medio homogéneo: la tierra. Entonces, un segmento de conductor de longitud ℓ_s se representa por una resistencia serie Δr , una inductancia serie ΔL , una conductancia Δg y una capacitancia ΔC . Estos parámetros se distribuyen a lo largo de la longitud ℓ_s del segmento, formando de esta manera una línea de transmisión monofásica.

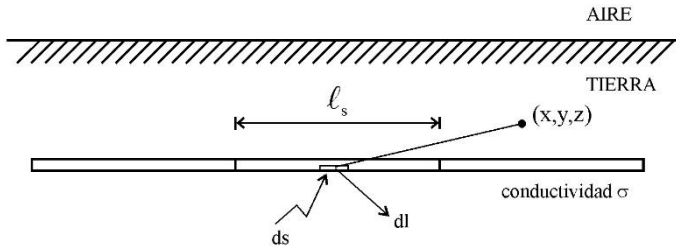


Figura 7. Segmento de conductor en un terreno uniforme. Fuente: elaboración propia.

Si el conductor se encuentra en un medio homogéneo, éste deberá tener una conductividad, permitividad y permeabilidad definidos. Si estos valores son constantes, entonces, al aplicar una onda electromagnética en un extremo del conductor, ésta se propagará con una velocidad uniforme dada por:

$$V_s = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_0}} \tag{5}$$

Donde: C_0 es la velocidad de la luz en el espacio libre y ϵ_0 es la permitividad relativa del terreno.

A partir de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el conductor, es posible obtener los parámetros eléctricos, como el cálculo de la conductancia Δg , de un segmento de línea de transmisión enterrado (lo cual se describirá más abajo). Por otro lado, para el cálculo de la resistencia del conductor se considerará que la corriente se distribuye uniformemente en su sección transversal, lo cual da lugar a la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\rho_c}{S_0} \tag{6}$$

Donde: r es la resistencia del conductor, ρ_c es la resistividad del conductor y S_0 es el área de la sección transversal del conductor.

Los valores numéricos de ΔL y ΔC del segmento de línea de transmisión enterrada de la Figura 6 se pueden obtener a partir de dos cantidades previamente calculadas, las cuales son: el valor de la conductancia Δg y la velocidad de las ondas electromagnéticas en la tierra V_s . Para las frecuencias de interés, se puede utilizar la siguiente identidad:

$$\frac{\Delta C}{\Delta g} = \frac{\epsilon}{\rho}$$

Donde: ϵ es la permitividad del terreno y σ es la conductividad del terreno

Entonces, si se considera al segmento de conductor ℓ_s como una línea de transmisión con inductancia ΔL y capacitancia distribuida ΔC , al utilizar la ecuación (5) se obtiene:

$$\frac{\ell_s}{\sqrt{\Delta L \Delta C}} = V_x = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Las ecuaciones (6) y (7) permiten obtener la capacitancia y la inductancia del elemento, de donde nos queda lo siguiente:

$$\Delta C = \frac{\epsilon}{\sigma} \Delta g$$

$$\Delta L = \frac{\sigma \ell_s^2}{\epsilon_0 C_0^2 \Delta g}$$

En donde la permitividad (Sakis Meliopoulos, 2018) es:

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon}{\epsilon_r}$$

Resultados

Los sistemas de puesta a tierra tienen diversas configuraciones de construcción, las cuales dependen del sistema, dispositivo o elemento a aterrizar. La configuración de red es la más adecuada, dado que la corriente se disipa de una manera más eficiente hacia

el interior de la tierra –como lo indica la norma vigente en México– en comparación con un conductor vertical/horizontal. La simulación del comportamiento transitorio de la red de tierras se basa en la teoría de líneas de transmisión. Para esto, se divide el conductor en segmentos. Las diferentes secciones de la línea de transmisión que simulan el conductor enterrado, se representan por su resistencia serie R , conductancia paralelo G , inductancia serie L y capacitancia paralelo C .

Para simular en ATP el comportamiento de un conductor enterrado, se procede de la siguiente manera: primeramente, se considera un conductor horizontal con el suelo (éste puede ser incluso una varilla) y se instala como sistema básico de tierras (ver Figura 8).

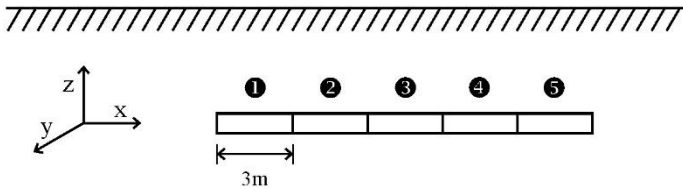


Figura 8. Conductor enterrado horizontal, dividido en cinco segmentos de 3 metros cada uno. Fuente: elaboración propia.

Las características de instalación de este conductor se muestran en la Tabla 1 renglón 1 y en la Figura 8 se muestra el diagrama del conductor enterrado.

	Radio (m)	Resistividad del terreno $\rho(\Omega m)$	Permitividad relativa ϵ_r	Profundidad de instalación (m)	Resistividad del cobre $\rho(\Omega m)$
1	0.012	70	15	0.6	1.72×10^{-8}
2	0.007	1000	9	0.5	1.72×10^{-8}
3	0.014	400	9	0.5	1.72×10^{-8}
4	0.040	400	9	0.5	1.72×10^{-8}

Tabla 1. Características de los conductores enterrados.

A continuación, el conductor se divide en cinco segmentos de 3 mts cada uno, se aplica un pulso de corriente de 36.5 A y se procede a simular el voltaje transitorio en diferentes puntos del conductor. Al utilizar la corrida desarrollada en MATLAB® se obtienen los siguientes resultados de la Tabla 2:

Tabla 2
Resultados en cálculo para conductor horizontal

a) Matriz de Resistencia

21.3592	3.6144	2.2151	1.1522	0.8966
3.6144	21.3592	3.6144	2.2151	1.2668
2.2151	3.6144	21.3592	3.6144	2.2451
1.1522	2.2151	3.6144	21.3592	4.4363
0.8966	1.2668	2.2451	4.4363	51.9960

b) Matriz de Conductancia

0.0485	-0.0075	-0.0035	-0.0012	-0.0004
-0.0075	0.0497	-0.0070	-0.0035	-0.0005
-0.0035	-0.0070	0.0497	-0.0072	-0.0013
-0.0012	-0.0035	-0.0072	0.0492	-0.0038
-0.0004	-0.0005	-0.0013	-0.0038	0.0196

c) Matriz de Capacitancia

1.0e-009 *				
0.4512	-0.0694	-0.0328	-0.0108	-0.0037
-0.0694	0.4616	-0.0650	-0.0322	-0.0045
-0.0328	-0.0650	0.4623	-0.0672	-0.0121
-0.0108	-0.0322	-0.0672	0.4579	-0.0352
-0.0037	-0.0045	-0.0121	-0.0352	0.1825

Tabla 2. Resultados en cálculo para conductor horizontal. Fuente: elaboración propia.

Con relación a las matrices de la Tabla 2, se observa que la magnitud de los primeros cuatro elementos de la diagonal principal tiene el mismo valor. Esto se debe a que estos cuatro segmentos son de la misma longitud; en cambio, el último segmento toma una magnitud diferente porque es de menor longitud. También, se observa que la matriz es simétrica y la magnitud de los diferentes elementos disminuye en función de la distancia de separación. Los elementos de la diagonal representan los valores propios y, aquellos fuera de la diagonal, los valores mutuos. Por otro lado, al invertirse la matriz de resistencias se obtiene la matriz de conductancia, la cual se muestra en la Tabla 2 a). También, podemos observar las matrices de conductancia (ver Tabla 2 2b) y capacitancia Tabla 2 2c), las cuales tienen el mismo comportamiento para valores propios y mutuos.

Cabe mencionar que los valores de inductancia son valores constantes a lo largo del conductor. Sin embargo, la inductancia varía con respecto a la frecuencia. Para el caso de este estudio se utiliza una magnitud de inductancia de $1.08 \mu H$ por unidad de longitud.

Ahora, consideremos la retícula de la Figura 9, una red de tierras de un solo cuadro:

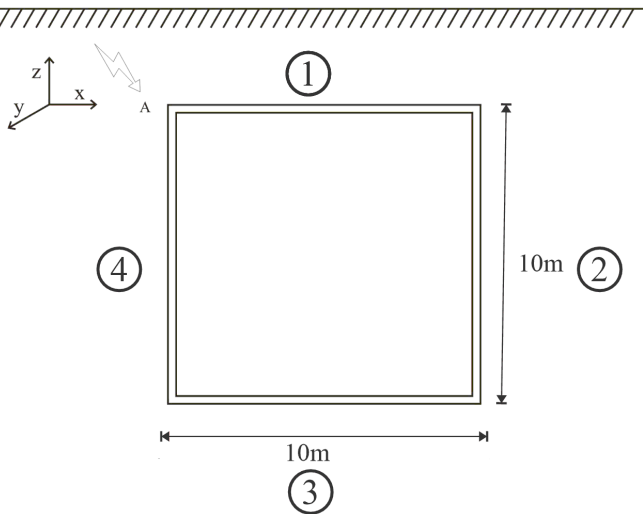


Figura 9. Retícula de una red de tierras. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 9, los conductores tienen una longitud de 10 metros cada uno. Por otro lado, las características del conductor y el terreno se muestran en la Tabla 1 Renglón 2, cuyos datos se utilizan en el programa de cálculo y de donde se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados de cálculo para red de un cuadro

Matriz de Resistencia

1.0e+002 *			
1.4912	0.1943	0.1943	0.0513
0.1943	1.4912	0.2502	0.1943
0.1943	0.2502	1.4912	0.1943
0.0513	0.1943	0.1943	1.4912

Matriz de Conductancia

0.0069	-0.00076	-0.0007	-0.0000
-0.0007	0.00707	-0.0009	-0.0007
-0.0007	-0.00098	0.0070	-0.0007
-0.0000	-0.00076	-0.0007	0.0069

Matriz de Capacitancia

1.0e-009 *			
0.5503	-0.0610	-0.0610	-0.0030
-0.0610	0.5634	-0.0786	-0.0610
-0.0610	-0.0786	0.5634	-0.0610
-0.0030	-0.0610	-0.0610	0.5503

Tabla 3. Resultados de cálculo para red de un cuadro. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 10 se muestra la red de tierras integrada por cuatro retículas. La longitud de cada conductor es de 10 metros y, para cada uno, se generan matrices en el orden de 16 x 16. La simulación de los voltajes transitorios, los valores del conductor y del terreno se muestran en la Tabla 1 Renglón 3.

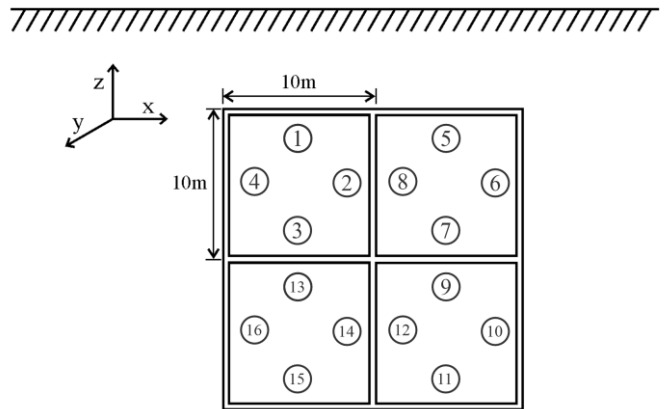


Figura 10. Red de tierras de cuatro retículas. Fuente: elaboración propia.

Ahora, se presenta el estado transitorio de los sistemas de tierra bajo estudio. En primer lugar, se considera el caso de un conductor enterrado de la Figura 7 y se aplica un pulso de corriente en uno de sus extremos de 1A. Entonces, se utiliza el valor de las matrices de los parámetros eléctricos y se conforma el circuito equivalente de la red para efectuar su simulación en el software ATP. Posteriormente, se grafican los voltajes en estado transitorio (obtenidos en diferentes puntos de los conductores). En este caso, se graficaron los voltajes en los puntos A, B y C de la Figura 7, los cuales se encuentran a una distancia de 0, 3.5, 7mts. En el conductor.

Como se puede observar en la Figura 11, el valor máximo de voltaje transitorio es de 614 V en un tiempo de 0.09 μs, lo cual representa las condiciones más críticas para estas características de excitación. Por otro lado, en la misma Figura 1 se presenta el comportamiento del voltaje en los puntos B y C. El voltaje en el punto B, localizado a una distancia de 3.5 mts, alcanza un voltaje máximo de 281 V en un tiempo de 0.3 μs. El punto C, a una distancia de 7 mts, tiene un voltaje máximo de 181.3 V en un tiempo de 7 μs.

Posteriormente, se presentan los parámetros eléctricos calculados para una red de tierras de un cuadro (como se puede observar en la Tabla 3) y de cuatro cuadros (como se muestra en la Figura 9). En la Tabla 4 se exponen las características de la red de tierras de cuatro cuadros.

En la gráfica de la Figura 12 se presenta el comportamiento del voltaje transitorio para los puntos A y B para una red de un cuadro. Por otro lado, en la Figura 12 se presenta el comportamiento del voltaje transitorio en el punto A para una red de tierras de cuatro cuadros. Al compararse ambas figuras, se observa que el voltaje transitorio máximo de la red de cuatro cuadros es de 35 V, el cual es menor al obtenido para el caso de la red de un cuadro con 60.1 V. Lo anterior nos permite concluir que mientras más grande sea la red de tierras, menor es la magnitud del voltaje transitorio.

También, es importante conocer la influencia que tienen diversos parámetros de diseño y construcción en el comportamiento transitorio de las redes de tierra, pues influyen en la magnitud de los parámetros eléctricos de la red, y éstos a su vez, en los circuitos equivalentes.

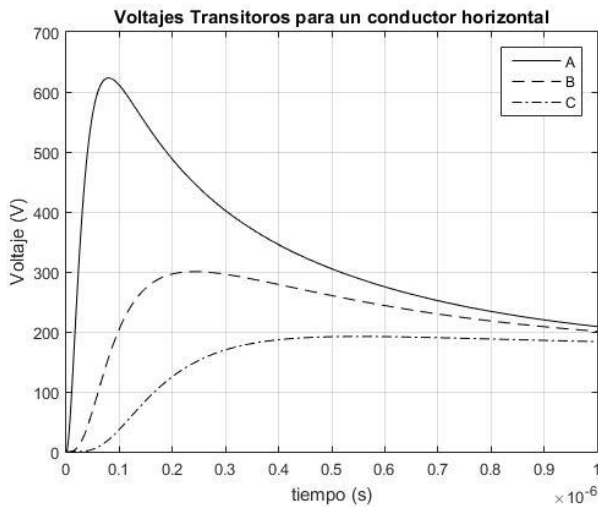


Figura 11. Respuesta de voltaje transitorio en puntos A, B y C, para un conductor horizontal. Fuente: elaboración propia.

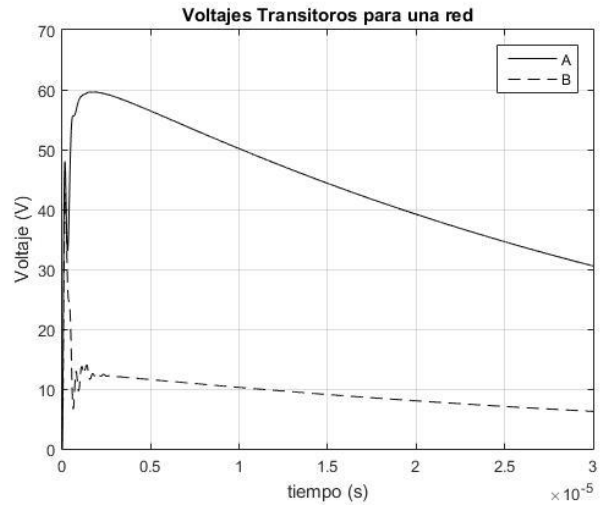


Figura 12. Respuesta de voltaje transitoria para una red de uno y cuatro cuadros. Fuente: elaboración propia.

Para analizar el efecto de estos parámetros se considerarán los sistemas de tierra de la Figura 13, con las características mostradas con anterioridad en la Tabla 1.

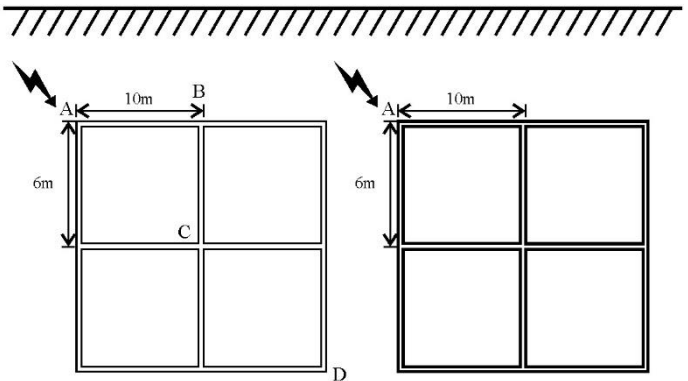


Figura 13. Redes de tierra con diferente diámetro de conductor y resistividad. Fuente: elaboración propia.

Como podemos observar en la Figura 13, para el sistema del inciso a), el valor del diámetro es de 14 mm y, para el sistema del inciso b), es de 40.4 mm. Se aplican a ambas redes un impulso de corriente similar al de la Figura 13 en el punto A.

Influencia de la resistividad del terreno

Análisis transitorio de sistemas de puesta a tierra

En la Figura 14 se presenta el comportamiento del voltaje transitorio, para una red de cuatro cuadros, con un valor de resistividad del terreno de $\rho = 400 \Omega m$. Ahí, se puede observar que el valor máximo del voltaje transitorio es de $20.7 V$ (en el punto A) en un tiempo de $0.27 \mu s$. Al compararse con la gráfica de la Figura 12, este voltaje disminuye en $14.3 V$. Esta diferencia representa la una disminución del 40.85% del valor de voltaje transitorio obtenido para el caso de una $\rho = 1000 \Omega m$ (los valores de los conductores y características del terreno se muestran en la Tabla 1 Renglón 4).

Influencia del diámetro del conductor

Para este caso, son las mismas redes con diferente diámetro del conductor. Como se mencionó anteriormente, el conductor de la red (b) es mayor (40.4 mm) en comparación con el de referencia inicial (14 mm). Por consiguiente, en la evaluación del impacto de diferentes diámetros de conductor (en el voltaje transitorio en la red de tierras y en consideración de valores comerciales), se aplicó un pulso de corriente en el punto A de ambas redes y se determinó el voltaje transitorio pico.

En la Figura 15 se observa que el voltaje transitorio máximo que alcanza la red de tierras, con un diámetro de 40.4 mm , es de $32.92 V$ en un tiempo de $0.16 \mu s$. A manera de comparación, un incremento en el diámetro del conductor de la red de 144% se refleja en una disminución en el voltaje transitorio de $2.08 V$. Lo anterior nos dice que, para fines de construcción de redes de tierra, la resistividad juega un papel más importante que el diámetro. Además, el costo de un conductor de diámetro más grueso es mayor.

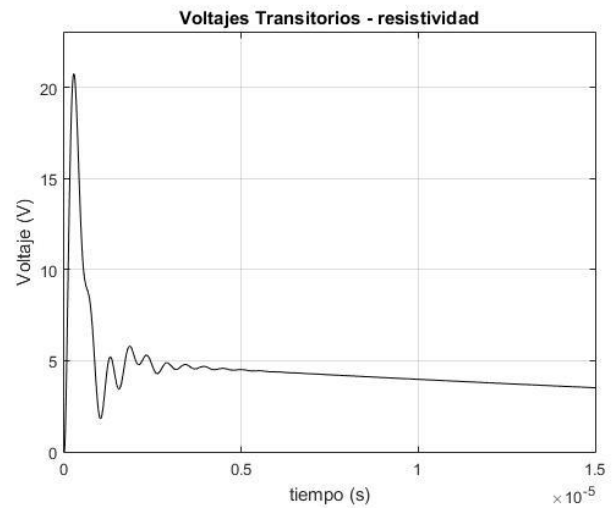


Figura 14. Respuesta de voltaje transitoria para una red de uno y cuatro cuadros y resistividad de $400 \Omega m$. Fuente: elaboración propia.

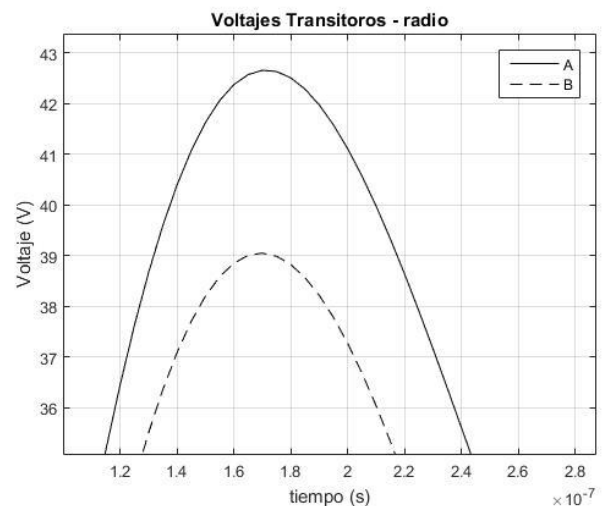


Figura 15. Respuesta de voltaje transitoria para una red de uno y cuatro cuadros y radio mayor. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo se presentó la aplicación del análisis para el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra. Para su obtención, se inició con un conductor enterrado de forma horizontal y, se finalizó, con la configuración de una red de cuatro cuadros.

Los resultados obtenidos fueron calculados en una corrida en MATLAB®. Después, estos datos fueron simulados en ATP y se presentaron en forma de simulaciones y –de las cuales– se obtuvieron las gráficas del comportamiento de los voltajes transitorios de los diferentes sistemas mencionados. Estos voltajes, en comparación con las mediciones en

campo, obtienen una gran similitud con las reglas de la norma vigente para las instalaciones eléctricas en México.

La utilización de circuitos desarrollados facilita la modificación de las características de los conductores y el medio de instalación en donde se encuentra el sistema de puesta a tierra. Esto es el caso de la resistividad del terreno, el cual resultó ser el parámetro más importante en contraste con otros datos de los conductores y el terreno. La resistividad disminuyó las magnitudes de voltajes transitorios generados en el periodo transitorio de los sistemas de tierra.

Referencias

- Chen Shaodong, Zhang Yijun, Zhou Mi, Yan Xu, Lu Weitao, Zheng Dong (2021). Transient Response of Surge Protective Devices during the Potentials Transferred between Independent Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35 (2), pp. 630-638. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2918713.
- Gholinezhad J. y Shariatinasab R. (2019). Time-Domain Modeling of Tower-Footing Grounding Systems Based on Impedance Matrix. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34 (3), pp. 910-918. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2881696.
- Grcev, L. & Markovski, B. (2020). Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3003427.
- Guo Z., Wu G., Chen S., Zhang Y. y Wei W. (2019). Transient Behavior of Common Grounding Grids to Artificially Triggered Lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61 (2), pp. 426-433. DOI: 10.1109/TEMC.2018.2829928.
- Kherif O., Chiheb S., Tegar M., Mekhaldi A. y Harid N. (2018). Time-Domain Modeling of Grounding Systems' Impulse Response Incorporating Nonlinear and Frequency-Dependent Aspects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (4), pp. 907-916. DOI 10.1109/TEMC.2017.2751564.
- Li Jie, Liu Yinliang, Li Chengxin, Zeng Dehui, Li Haifeng, 2022, *Member, IEEE*, and Wang Gang, An FTU-Based Method for Locating Single-Phase High-Impedance Faults Using Transient Zero-Sequence Admittance Resonant Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Lima Antonio C. S., Moura Rodolfo A. R., N. Vieira Pedro Henrique, O. Schroeder Marco Aurelio, Correia de Barros Maria Teresa (2021) A Computational Improvement in Grounding. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* C. S., 62(3): pp. 765-773.
- Sakis Meliopoulos A.P. (1988). *Power System Grounding and Transients*. USA: Marcel Dekker.
- Secretaría de Energía de México (2014). *Norma Oficial mexicana: NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)*. México, CDMX: Editorial Limusa.