

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE PROBLEMAS DE POTENCIALES TRANSFERIDOS POR REDES DE TIERRA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

I. Colominas, F. Navarrina y M. Casteleiro*

* GMNI — Grupo de Métodos Numéricos en Ingeniería,
Depto. de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de A Coruña,
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Campus de Elviña, 15192 A Coruña, España
e-mail: ice@udc.es, web: <http://caminos.udc.es/gmni>

Palabras clave: Tomas de tierra, Método de Elementos de Contorno, Potenciales transferidos.

Resumen. *El análisis y diseño de tomas de tierra en subestaciones eléctricas requiere el cálculo de la distribución de los niveles de potencial sobre la superficie del terreno y la resistencia equivalente de la red de tierras, cuando tiene lugar una derivación de corriente eléctrica al terreno.*

En este artículo se presenta una formulación numérica basada en el método de elementos de contorno para el análisis de un problema común en la ingeniería eléctrica, como es la existencia de potenciales transferidos en una instalación de puesta a tierra. La transferencia de potenciales entre la zona puesta a tierra y puntos exteriores de la misma a través de conductores enterrados (por ejemplo, circuitos de comunicación, neutros, tuberías, raíles o cierres periféricos metálicos) puede producir serios problemas de seguridad. Dado que se dispone de una herramienta de cálculo efectiva y fiable para el análisis de redes de tierra, se propone su empleo para el análisis de estos potenciales inducidos. Para ello, en este artículo se resume brevemente la formulación numérica empleada y se presenta el análisis del problema de transferencia de potenciales. Finalmente, se muestran algunos ejemplos haciendo uso de la geometría de tomas de tierra de subestaciones eléctricas reales.

1. INTRODUCCIÓN

Los principales objetivos de un sistema de tierras de una instalación eléctrica son los de garantizar la integridad de los equipos y asegurar la continuidad del suministro de electricidad, y salvaguardar que una persona que se encuentre en las proximidades de la instalación no pueda sufrir una descarga eléctrica peligrosa. Para estos fines, la resistencia equivalente del sistema de tierras debe ser lo suficientemente baja para que las corrientes de fallo se disipen principalmente en el terreno a través del sistema de tierras, en tanto que las mayores diferencias de potencial entre puntos en los que una persona pueda estar en contacto deben ser inferiores a determinados límites máximos establecidos por las normativas de seguridad de este tipo de instalaciones (tensiones de malla, tensiones de paso y tensiones de contacto) [1, 2].

Desde los años sesenta se han propuesto un gran número de métodos para el cálculo y análisis de este tipo de instalaciones, la mayor parte basados en consideraciones de tipo práctico o en ideas intuitivas [3]. Aunque estas técnicas supusieron un notable avance se han constatado numerosos inconvenientes, tales como sus limitaciones en cuanto al número máximo de conductores de la red de tierras, su disposición y el tamaño de la instalación a proteger [1], o los elevados requerimientos computacionales, los resultados poco realistas que se obtienen al incrementar la discretización de los electrodos, y la incertidumbre en el margen de error [4].

En los últimos años, los autores del presente artículo han desarrollado una formulación numérica basada en el método de elementos de contorno para el análisis de redes de tierra con modelos de terreno isótropo y homogéneo. Muchos de los métodos intuitivos empleados en la práctica se ha podido identificar como casos particulares de esta formulación general [5, 6]. De esta forma se ha podido explicar matemáticamente el comportamiento asintótico anómalo de esos métodos, se han establecido las fuentes de error y cómo subsanarlas y se han propuesto nuevas formulaciones numéricas más eficientes y precisas para la resolución de este tipo de problemas [5, 6]. Asimismo, esta formulación se ha aplicado con éxito al análisis de tomas de tierra reales de grandes instalaciones eléctricas con un coste computacional perfectamente asumible tanto en tiempo de cálculo como de requerimientos de memoria [5, 7]. Recientemente, esta formulación de elementos de contorno se ha generalizado para el análisis de redes de tierra en terrenos estratificados, tanto vertical como horizontalmente [8].

En este artículo se presenta una metodología numérica basada en el método de elementos de contorno para abordar un problema de aplicación en ingeniería eléctrica como es la existencia de potenciales transferidos en una instalación de puesta a tierra.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA FÍSICO

El problema asociado a la disipación de corriente eléctrica en el suelo se puede modelizar mediante la Teoría del Electromagnetismo de Maxwell [9]. Así, restringiendo el estudio a la obtención de la respuesta electrocinética en estado estacionario [1, 6], y considerando que la resistencia eléctrica interna de los electrodos que forman la red de tierras es despreciable (por tanto el potencial se asume constante en la superficie de los electrodos), las ecuaciones que

rigen la derivación de corriente vienen dadas por

$$\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}) = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} = -\boldsymbol{\gamma} \operatorname{grad}(V) \text{ en } E; \quad \boldsymbol{\sigma}^t \mathbf{n}_E = 0 \text{ en } \Gamma_E; \quad V = V_\Gamma \text{ en } \Gamma; \quad V \rightarrow 0, \text{ si } |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (1)$$

siendo E el terreno, $\boldsymbol{\gamma}$ su tensor de conductividad, Γ_E la superficie del terreno, \mathbf{n}_E su versor normal unitario exterior y Γ la superficie de los electrodos [6]. En consecuencia, cuando el electrodo de tierra adquiere un potencial V_Γ conocido (llamado ‘‘Sobretensi3n de Tierra’’ o GPR, por las siglas del nombre en ingl3s: *Ground Potential Rise*), la soluci3n de (1) permite obtener el potencial V y la densidad de corriente $\boldsymbol{\sigma}$ en cualquier punto \mathbf{x} . Asimismo, se pueden obtener la densidad de corriente de p3rdida σ que emana de un punto de Γ ($\sigma = \boldsymbol{\sigma}^t \mathbf{n}$, siendo \mathbf{n} el versor normal exterior a Γ), la resistencia equivalente del sistema y la intensidad total de corriente [6].

En el presente trabajo se considerar3 un modelo de terreno homog3neo e is3tropo, por lo que el tensor $\boldsymbol{\gamma}$ se puede sustituir por una conductividad escalar aparente γ que en la pr3ctica se determina experimentalmente [1]. La generalizaci3n de estas t3cnicas para modelos multi-capa puede encontrarse en [8]. Por otra parte, si se asume que la superficie del terreno es horizontal, la simetr3a permite reescribir el problema (1) en t3rminos del Problema Exterior de Dirichlet: $\Delta V = 0$ en E , $V = V_\Gamma$ en Γ y Γ' , donde la imagen Γ' es la sim3trica de Γ respecto de la superficie del terreno, y V cumple condiciones normales en ∞ [5, 6]. Si a continuaci3n se aplica la Identidad de Green a este problema se obtiene la siguiente expresi3n integral para el potencial:

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\gamma} \int \int_{\boldsymbol{\xi} \in \Gamma} k(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \sigma(\boldsymbol{\xi}) d\Gamma, \quad \mathbf{x} \in E; \quad k(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}|} + \frac{1}{|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}'|} \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\xi}'$ es el punto sim3trico de $\boldsymbol{\xi}$ con respecto a la superficie del terreno [5, 6].

Dado que la expresi3n integral (2) se verifica tambi3n sobre la superficie de los electrodos Γ en la que el valor del potencial es conocido (la sobretensi3n de tierra V_Γ), la densidad de corriente de p3rdida σ debe satisfacer la ecuaci3n integral de Fredholm de primera clase definida en Γ

$$V_\Gamma = \frac{1}{4\pi\gamma} \int \int_{\boldsymbol{\xi} \in \Gamma} k(\boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{\xi}) \sigma(\boldsymbol{\xi}) d\Gamma, \quad \boldsymbol{\chi} \in \Gamma, \quad (3)$$

que puede escribirse en t3rminos de una forma variacional mediante la ecuaci3n integral

$$\int \int_{\boldsymbol{\chi} \in \Gamma} w(\boldsymbol{\chi}) \left[V_\Gamma - \frac{1}{4\pi\gamma} \int \int_{\boldsymbol{\xi} \in \Gamma} k(\boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{\xi}) \sigma(\boldsymbol{\xi}) d\Gamma \right] d\Gamma = 0, \quad (4)$$

si se impone que se satisfaga la ecuaci3n (3) en el sentido de residuos ponderados para todos los miembros w de una determinada clase de funciones de test definidas en Γ [5]. Es obvio que una formulaci3n basada en el M3todo de Elementos de Contorno parece la mejor elecci3n para resolver esta forma variacional [6].

3. FORMULACI3N NUM3RICA DE ELEMENTOS DE CONTORNO

El punto de partida del desarrollo de la formulaci3n num3rica lo constituye la discretizaci3n de la densidad de corriente de p3rdida σ y la superficie de los electrodos Γ , dados un conjunto

de \mathcal{N} funciones de prueba definidas en Γ , un conjunto de \mathcal{M} elementos de contorno 2D y un conjunto de \mathcal{N} funciones de test definidas en Γ [5, 6]. De este modo es posible obtener las versiones discretizadas del potencial (2) y de la ecuación integral (4), así como una solución aproximada al problema mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales, como es usual en los modelos de elementos de contorno y elementos finitos [5, 6]. No obstante, para el cálculo de los coeficientes de la matriz del sistema de ecuaciones resultante (que es una matriz llena) se requiere integrar dos veces en dominios bidimensionales (la superficie de los electrodos Γ), siendo además muy elevado el número total de grados de libertad cuando se analiza un problema de interés práctico. Por todo ello, se hace necesario introducir hipótesis adicionales que permitan reducir la complejidad del problema [5].

La formulación numérica final de elementos de contorno 1D (“BEM1D”) propuesta por los autores es la resultante de asumir que la densidad de corriente es uniforme a lo largo del perímetro de la sección transversal de los conductores, no tener en cuenta los efectos de disipación de corriente en los extremos y uniones entre los conductores de la red de tierras, y aproximar las distancias que intervienen en los núcleos integrales en términos de las distancias entre las proyecciones de los puntos sobre el eje de los electrodos. De hecho esta hipótesis es consecuencia de integrar mediante una cuadratura de Newton-Cotes las integrales circunferenciales que se obtienen al introducir la hipótesis de uniformidad circunferencial de la densidad de corriente de pérdida [5, 6]. Tras la aplicación de estas hipótesis, el cálculo de los coeficientes de la matriz del sistema de ecuaciones resultante requiere ahora integrar dos veces en dominios unidimensionales (los ejes de los electrodos), siendo el número total de grados de libertad mucho menor que en el modelo 2D. Desde un punto de vista matemático, existe una diferencia fundamental entre los modelos numéricos 2D y 1D: en el modelo 2D los núcleos integrales son débilmente singulares y en el modelo 1D aproximado no lo son [5].

La diferente selección de tipos de funciones de prueba y de test en el planteamiento numérico 1D permite desarrollar formulaciones específicas, e identificar los métodos intuitivos y de tipo práctico empleados en el cálculo de tierras como casos particulares de la formulación general de elementos de contorno [5]. Gracias a esta identificación es posible explicar desde un punto de vista matemáticamente riguroso los problemas encontrados con la aplicación de estos métodos [3, 4]. Dichos problemas consisten esencialmente en que cuando se aumenta el grado de discretización, los resultados obtenidos con la formulación de elementos 1D de contorno oscilan alrededor de la solución real [4, 5].

El hecho es que la aproximación de las distancias de los núcleos integrales no es válida para distancias pequeñas. Así al aumentar la discretización, el tamaño de los elementos se hace comparable al diámetro de los electrodos lo que introduce errores significativos en los coeficientes del sistema de ecuaciones, especialmente en los términos diagonales. No obstante, este efecto de mal condicionamiento debido a la mala aproximación de las integrales circunferenciales a distancias pequeñas es despreciable cuando la relación longitud/diámetro de los electrodos es elevada, por lo que no se producen resultados anómalos para elementos suficientemente largos [5]. Desde un punto de vista formal, ello es debido a que para las ecuaciones de Fredholm de primera clase el inverso de un operador completamente continuo no está acotado [10], es decir,

no es posible obtener numéricamente la solución del problema 1D simplificado ya que siempre se pueden encontrar densidades de corriente de pérdida diferentes que satisfagan la condición de contorno con errores arbitrariamente pequeños. Esto explica la razón por la que se obtienen resultados poco realistas cuando aumenta la discretización y no se asegura la convergencia [11]. No obstante, se ha comprobado que los resultados obtenidos con niveles de discretización normales son suficientemente precisos en la práctica [5, 6].

4. EL PROBLEMA DE LOS POTENCIALES TRANSFERIDOS

Se denomina “transferencia de potenciales de tierra” al fenómeno por el que un potencial de tierra de una instalación aparece en otra parte [12]. En circunstancias de fallo, la malla de tierra de una subestación eléctrica puede adquirir un potencial de miles de voltios. Este nivel de potencial (o una fracción del mismo) puede ser transferido a otras zonas, incluso fuera de la propia instalación eléctrica, por conductores enterrados tales como tuberías metálicas, raíles, cierres metálicos, etc. Es evidente que esta circunstancia puede producir serios daños y debe ser evitada para garantizar la seguridad de las personas e incluso de animales que se encuentren en las inmediaciones y asegurar la integridad de otros equipos eléctricos o electrónicos [13].

La importancia de este problema radica en las elevadas diferencias de potencial que se producen en zonas inesperadas. El principal peligro suele ser del tipo “potencial de contacto”, esto es, cuando una persona situada en una zona alejada de la instalación eléctrica toca un conductor conectado a la red de tierras, o toca un conductor no directamente unido a la red de tierras pero con un elevado nivel de voltaje producido por una transferencia de potenciales de tierra.

En la mayor parte de los casos, la diferencia de potencial es suficientemente baja para constituir un serio peligro para las personas o animales. No obstante, la diferencia de potencial en puntos cercanos sobre la superficie del terreno puede producir daños a personas sensibles (como niños) o afectar al ganado (por ejemplo, se han constatado problemas en la producción de leche [14]). Por otra parte, la presencia de estos potenciales transferidos a través de conductores enterrados puede producir el funcionamiento anómalo de los equipos electrónicos o distorsiones en los instrumentos de medición [13, 15]. En las referencias [1, 13] se describen algunas medidas que pueden adoptarse para proteger los circuitos de comunicaciones, raíles, neutros de redes de baja tensión, equipos portátiles de la subestación, sistemas de tuberías, edificios auxiliares y vallas perimetrales, etc.

En general, pueden considerarse dos casos principales de potenciales transferidos: **a)** la transferencia de la Sobretensión de Tierra (*Ground Potential Rise, GPR*) a puntos distantes de la instalación por medio de un conductor unido directamente a la red de tierras; y **b)**, la transferencia de una fracción del GPR a puntos alejados de la instalación debido a la presencia de conductores próximos a la red de tierras pero no conectados directamente a ella. En ambos casos, la distribución del potencial en la superficie del terreno se modificará significativamente, lo que puede dar lugar a un serio problema de seguridad cuando afecta a zonas no protegidas [12].

Obviamente, el mejor modo de tratar estos problemas es evitando los potenciales de tierra transferidos, aunque ello no siempre es posible. Por ejemplo, en grandes subestaciones eléctricas a menudo existen raíles para la instalación de los transformadores y otros grandes equipos.

Estos ramales de ferrocarril frecuentemente se extienden fuera de la subestación y pueden ser elementos que transfieran potenciales de tierra a puntos lejanos de la instalación eléctrica durante una situación de fallo [16].

Los métodos que se emplean para prevenir estos peligrosos potenciales (por ejemplo, el uso de juntas aislantes o la retirada de algunos tramos de los raíles) están basados generalmente en la experiencia profesional, en cálculos muy aproximados y, en algunas ocasiones, en mediciones experimentales [1, 13, 15, 16, 17]. En la actualidad, el desarrollo de métodos computacionales para el cálculo de las redes de tierra permite una determinación precisa de los potenciales de tierra transferidos. A continuación se propone una metodología para el análisis de estos potenciales basado en una formulación numérica de elementos de contorno.

5. ANÁLISIS DE POTENCIALES DE TIERRA TRANSFERIDOS

Cuando existe conexión eléctrica directa entre la red de tierras y los conductores que transfieren potenciales, el análisis de los potenciales transferidos no implica cambios significativos en la formulación numérica. Como se ha expuesto previamente, el potencial se asume constante en la superficie de todos los conductores dado que su resistividad se puede considerar despreciable. En consecuencia todos los electrodos (los de la red de tierras y los conductores adicionales) adquieren la Sobretensión de Tierra (GPR), de modo que los conductores adicionales actúan formalmente como parte de la toma de tierras [5].

Sin embargo, si no existe interconexión entre la red de tierras y los conductores adicionales, el análisis de los potenciales transferidos se complica. El problema radica en que el potencial que adquieren dichos conductores (una fracción del GPR) por su proximidad a la red de tierras es desconocido *a priori*. En consecuencia, el objetivo principal consiste en obtener dicho potencial, así como los demás parámetros que caracterizan un sistema de toma de tierras: la distribución de potencial en superficie, los potenciales de paso y contacto, la resistencia equivalente, etc.

La idea fundamental para resolver este problema consiste en considerar que la malla de electrodos de tierra (que adquiere el potencial dado por el GPR) es una “malla activa” (que disipa al terreno una intensidad de tierra desconocida I_G), mientras que los conductores adicionales responsables de la transferencia de potenciales (que adquieren una fracción desconocida del potencial dado por el GPR) constituyen una “malla pasiva” (de la que no emana corriente al terreno). La importancia de estos potenciales transferidos obviamente disminuirá si la “malla pasiva” está alejada de la “malla activa”, y sus efectos serán locales; no obstante, en general se pueden producir diferencias de potencial no despreciables en la superficie del terreno en zonas en las que no se esperan, incluso fuera del recinto de la instalación eléctrica.

El análisis de los potenciales transferidos desde la “malla activa” a la “malla pasiva” se puede llevar a cabo por superposición de estados elementales, dado el carácter lineal de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de la disipación de corriente eléctrica en un medio. Los dos estados elementales que se pueden considerar son: **estado 1**) la “malla activa” con una sobretensión de 1 V y la “malla pasiva” a 0 V; y **estado 2**) la “malla activa” con una sobretensión de 0 V y la “malla pasiva” a 1 V. Con estos valores unitarios de potencial en los distintos electrodos

Tabla 1. Red de Tierras: Características

Datos	
Número de electrodos:	534
Diámetro de los electrodos:	11.28 mm
Profundidad de la malla:	0.75 m
Número de picas verticales:	24
Diámetro de las picas:	15.00 mm
Longitud de las picas:	4 m
Dimensiones máximas de la red:	230×195 m ²
Resistividad del terreno:	60 Ωm
Sobretensión de Tierra (GPR):	10 kV

puede aplicarse la formulación numérica presentada en las secciones anteriores y calcular para cada estado elemental las intensidades de corriente totales que fluyen por unidad de voltaje para cada “malla”: i_{A1} , i_{A2} , i_{P1} y i_{P2} (donde “A” se refiere a la “malla activa”, “P” denota la “malla pasiva”, y los números indican cada estado elemental).

En el estado final la “malla activa” adquiere un potencial igual al GPR de la instalación y la “malla pasiva” adquiere un potencial constante desconocido (esto es, la fracción λ del GPR). En consecuencia, este estado final se obtendrá de la superposición de los estados elementales previos: el estado **1**) ponderado por el GPR de la “malla activa” (V_{Γ}); y el estado **2**) ponderado por la fracción λ del GPR (V_{Γ}).

Finalmente, el coeficiente λ y la intensidad de corriente total que se deriva al terreno I_G se puede calcular imponiendo que la descarga de corriente se produce solamente en la “malla activa” (las corrientes de fallo se derivan únicamente por la toma de tierra) e imponiendo a su vez que no se deriva corriente por la “malla pasiva” (ya que no hay unión eléctrica entre estos conductores y los de la red de tierras) [5]. En consecuencia, hay que resolver el sistema

$$\begin{aligned} I_G &= V_{\Gamma} i_{A1} + \lambda V_{\Gamma} i_{A2} \\ 0 &= V_{\Gamma} i_{P1} + \lambda V_{\Gamma} i_{P2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Una vez se conocen la intensidad de tierra I_G y la fracción λ , es posible calcular la distribución de potencial en cualquier punto de la superficie del terreno y la resistencia equivalente del sistema, así como las tensiones de paso y de contacto en cualquier punto de la instalación eléctrica o de sus alrededores. La extensión de esta formulación para considerar la presencia de varias “malladas pasivas” es inmediata.

6. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE POTENCIALES TRANSFERIDOS

La metodología expuesta se ha aplicado al análisis de los potenciales transferidos por raíles de ferrocarril próximos a la red de tierras de una subestación eléctrica. Con el fin de demostrar la viabilidad de la formulación a un caso práctico se ha elegido la geometría de la red de tierras de una subestación real (el plano de la malla de electrodos de la toma de tierra se muestra en la

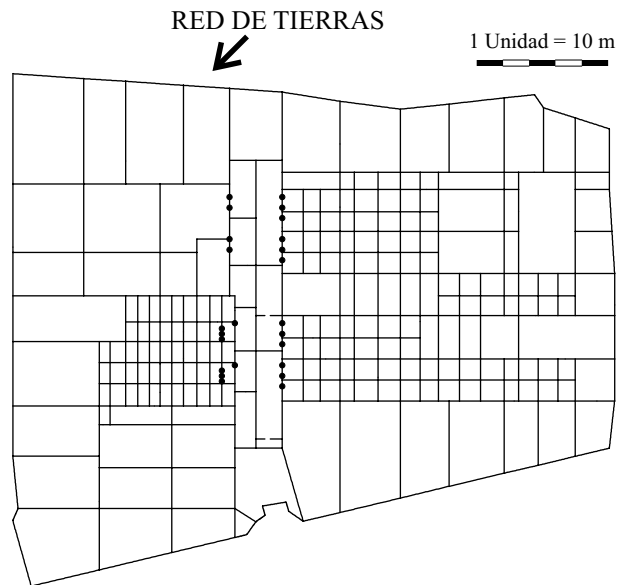


Figura 1. Plano de la red de tierras de la subestación eléctrica (los puntos indican la posición de las picas).

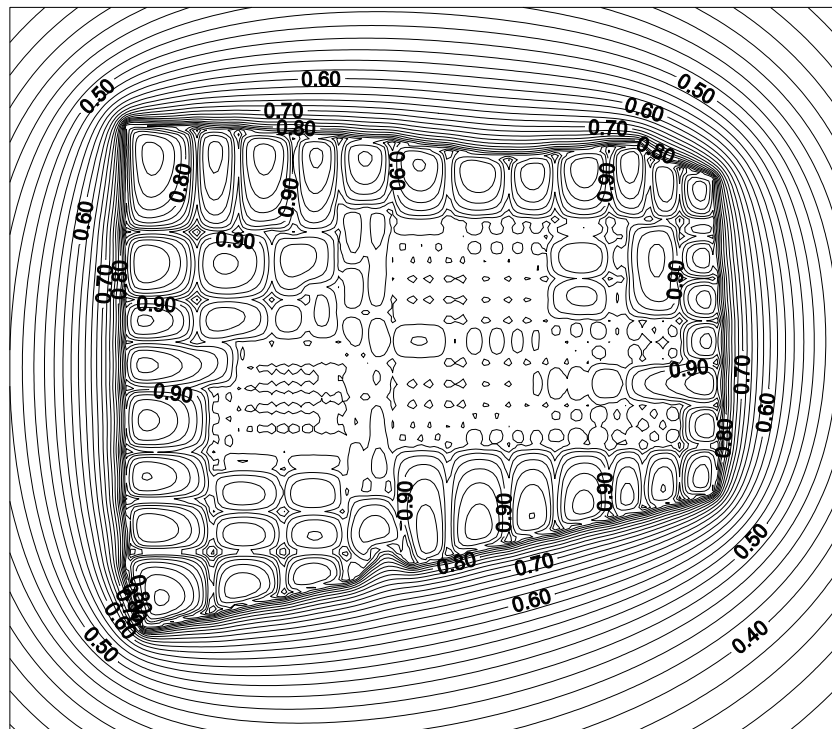


Figura 2. Caso 1: Distribución de potencial ($\times 10$ kV) en la superficie del terreno.

Tabla 2. Raíles: Características

Datos	
Número de raíles:	2
Longitud de los raíles:	260 m
Distancia entre raíles:	1668 mm
Diámetro de los raíles:	94 mm
Profundidad:	100 mm

figura 1), formada por 534 conductores cilíndricos enterrados a una profundidad de 75 cm y 24 picas verticales de 4 m de longitud (ver la Tabla 1).

En todos los ejemplos que se presentan en este trabajo se ha considerado que el terreno es isótropo y homogéneo con una resistividad escalar aparente de $60 \Omega\text{m}$, y que la Sobretenión de Tierra (GPR) es de 10 kV.

El primer caso considerado (Caso 1) es el análisis de la red de tierras de la Figura 1, es decir, sin tener en cuenta los raíles de ferrocarril. La Figura 2 muestra la distribución de potencial en la superficie del terreno en condiciones de fallo.

Por otra parte, se ha estudiado el mismo sistema de tomas de tierra pero considerando la presencia de dos raíles en sus inmediaciones. Las características de los raíles y el plano de situación se muestran en la Tabla 2 y la Figura 3. Se han analizado dos situaciones: En el Caso 2, la red de tierras y los raíles no están unidos eléctricamente entre sí, mientras que en el Caso 3 ambos están unidos.

Como se ha explicado en la sección anterior, en el Caso 2 cuando la red de tierras adquiere la Sobretenión de Tierra (GPR), entonces los raíles adquieren un potencial equivalente a una fracción de esta Sobretenión produciendo una transferencia de potenciales en sus alrededores. En el Caso 3, no obstante, dado que la red de tierras y los raíles están directamente conectados ambos adquieren un potencial igual a la Sobretenión de Tierra y los raíles actúan también como electrodos de tierra. La Tabla 3 resume los tres casos considerados y los principales resultados obtenidos con cada uno.

La Figura 4 muestra la distribución de potencial en la superficie del terreno en el Caso 2, y la Figura 5 la distribución de potencial para el Caso 3.

El análisis de potenciales transferidos del Caso 2 se ha efectuado haciendo uso de la metodología expuesta en la sección anterior y la superposición de estados elementales presentada. La fracción del GPR que adquieren los raíles ha resultado ser del 51.6 % (es decir, $\lambda = 0,516$).

En el caso 3, el análisis de potenciales transferidos se ha efectuado mediante la formulación numérica de elementos de contorno para análisis de redes de tierra dado que los raíles son formalmente parte de ella, al estar unidos eléctricamente.

Como es de esperar, es obvio que en los tres casos no hay diferencias significativas en la distribución de potenciales en la superficie del terreno (ni en las tensiones de paso ni de contacto) en el área que comprende la red de tierras de la subestación eléctrica. Con respecto a la resistencia equivalente, hay muy ligeras diferencias entre los casos 1 y 2 (en un caso, los raíles

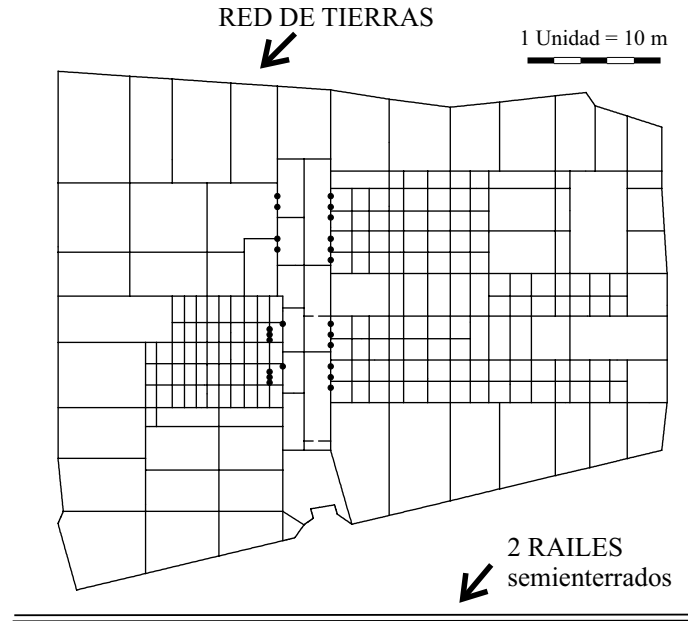


Figura 3. Plano de la red de tierras y de los dos raíles (los puntos indican la posición de las picas).

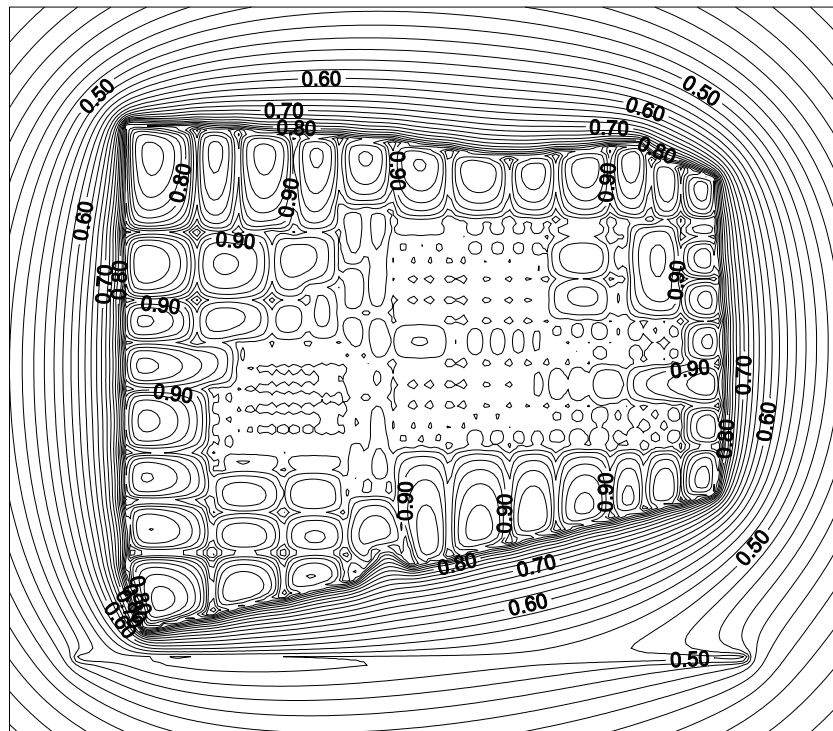


Figura 4. Caso 2: Distribución de potencial ($\times 10$ kV) en la superficie del terreno.

no se consideran; en el otro, se consideran pero no están unidos a la red de tierras), mientras que en el caso 3 la resistencia se reduce sensiblemente ya que los raíles son ahora electrodos de tierra.

No obstante, las mayores diferencias se producen en las distribuciones de potencial en la superficie del terreno especialmente en los alrededores de los raíles. De la comparación entre las Figuras 2, 4 y 5 pueden observarse los importantes gradientes de potencial producidos en esa zona.

Tabla 3. Análisis de la Red de Tierras: Modelo Numérico y Resultados

Caso 1	
Raíles:	No se consideran
Tipo de formulación numérica:	Galerkin
Tipo de elementos de contorno 1D:	Parabólico
Número de elementos:	558
Grados de libertad:	920
Intensidad total de tierra:	67.36 kA
Resistencia equivalente:	0.1484 Ω
Case 2	
Raíles:	Se consideran
Unión Raíles—Red de Tierras:	No
Tipo de formulación numérica:	Galerkin
Tipo de elementos de contorno 1D:	Parabólico
Número de elementos:	560
Grados de libertad:	1002
Intensidad total de tierra:	67.47 kA
Resistencia equivalente:	0.1482 Ω
Caso 3	
Raíles:	Se consideran
Unión Raíles—Red de Tierras:	Sí
Tipo de formulación numérica:	Galerkin
Tipo de elementos de contorno 1D:	Parabólico
Número de elementos:	560
Grados de libertad:	1002
Intensidad total de tierra:	73.27 kA
Resistencia equivalente:	0.1365 Ω

En el caso 2, el peligro no es tanto la magnitud de los potenciales transferidos como las diferencias de potencial: en algunos puntos de los alrededores de los raíles se han calculado tensiones de paso diez veces mayores que las tensiones de paso si no se tienen en cuenta los efectos de la transferencia de potenciales por los raíles. Obviamente, esta situación es peligrosa

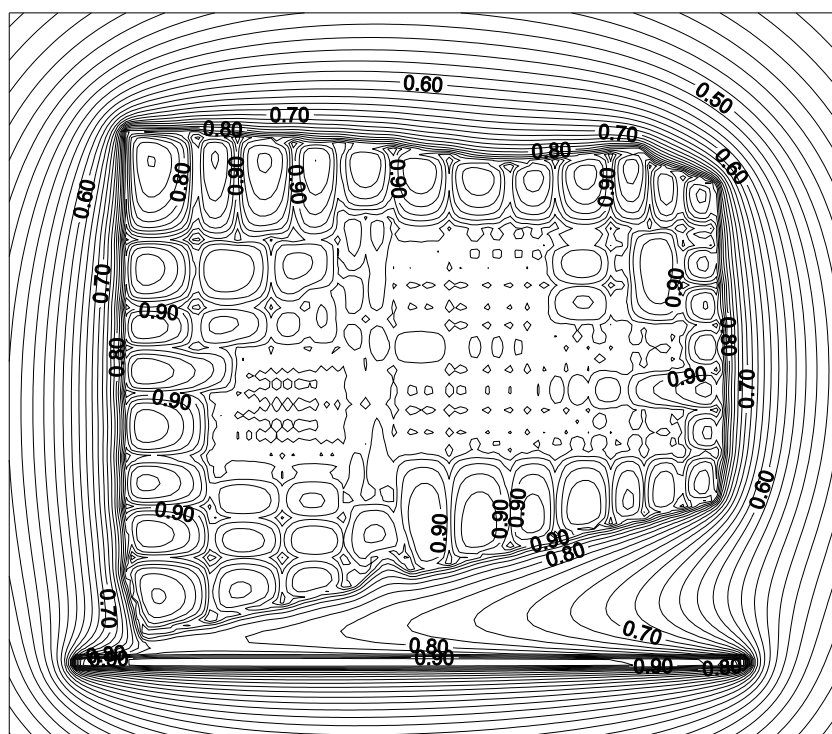


Figura 5. Caso 3: Distribución de potencial ($\times 10$ kV) en la superficie del terreno.

cuando dichos gradientes de potencial se producen en puntos alejados de la subestación eléctrica, o incluso fuera de la misma, en zonas en principio no protegidas por una red de tierras.

El caso 3 es mucho más peligroso dado que las tensiones de contacto en las inmediaciones de los raíles son muy elevadas, como puede verse en la Figura 5. Sin embargo, en la práctica esta situación de unión eléctrica entre los conductores de la red de tierra y los raíles es poco probable que se produzca con medidas preventivas de aislamiento.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha revisado el modelo matemático del fenómeno físico que subyace a la disipación de corriente eléctrica en un terreno a través de una toma de tierra y se han resumido los aspectos más sobresalientes de la formulación numérica de elementos de contorno desarrollada por los autores para el análisis de este tipo de problemas. Asimismo se ha presentado una novedosa formulación numérica que por primera vez permite calcular y cuantificar los efectos debidos a los potenciales transferidos en una instalación eléctrica por la presencia de elementos conductores enterrados en las proximidades de una red de toma de tierras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la SGPICT del Ministerio de Ciencia y Tecnología (#DPI2001-0556) cofinanciado con fondos FEDER, así como por la Secretaría Xeral

de I+D de la Xunta de Galicia y por la Universidad de La Coruña mediante proyectos y becas de investigación.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std.80, *IEEE Guide for safety in AC substation grounding*. New York, 1999.
- [2] J.G. Sverak, W.K. Dick, T.H. Dodds, R.H. Heppe, Safe substation grounding, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **100**,4281-4290, (1981) y **101**, 4006-4023, (1982).
- [3] R.J. Heppe, Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **98**, 1978-1988, (1979).
- [4] D.L. Garrett, J.G. Pruitt, Problems encountered with the APM of analyzing substation grounding systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **104**, 3586-3596, (1985).
- [5] I. Colominas, *Cálc. y D.A.O. de tomas de tierra en instalaciones eléctricas: Una formulación numérica basada en el método integral de Elementos de Contorno*. Tesis Doctoral, ETSICCP, La Coruña, 1995.
- [6] I. Colominas, F. Navarrina, M. Casteleiro, A BE numerical approach for grounding grid computation, *Computer Methods in Applied Mechanics in Engineering*, **174**, 73-90, (1999).
- [7] M. Casteleiro, L.A. Hernández, I. Colominas, F. Navarrina, *Sistema TOTBEM de DAO de tomas de tierra de instalaciones eléctricas*. ETSICCP, La Coruña, 1994.
- [8] I. Colominas, F. Navarrina, M. Casteleiro, A numerical formulation for grounding analysis in stratified soils, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**, 587-595, (2002).
- [9] E. Durand, *Électrostatique*. Masson, Paris, 1966.
- [10] A.N.Kolmogorov, S.V.Fomin, *Introductory Real Analysis*, Dover Pub., USA, 1975.
- [11] F. Navarrina, I. Colominas, M. Casteleiro, Why do computer methods for grounding analysis produce anomalous results?, *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**, 1192-1202, (2003).
- [12] Shipp D.D., Nichols N., *Designing to avoid hazardous transferred earth potentials*, IEEE Transactions on Industry Applications, **1A-18**, no. 4, (1982).
- [13] IEEE Std. 142-1991, *IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems*. New York, (1996).
- [14] Dick W.K., Winter D.F., *Computation, measurement and mitigation of neutral-to-earth potentials on electrical distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, **2**, no. 2, (1987).
- [15] IEEE Std. 81-1983, *IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system*. New York, (1983).
- [16] Garrett D.L., Wallace K.A., *A critical analysis of grounding practices for railroad tracks in electric utility stations*, IEEE Transactions on Power Delivery, **8**, 90-96, (1993).
- [17] IEEE Std. 665-1987, *IEEE Guide for generating station grounding*. New York, (1987).