

Métodos de Programación Lineal en el Cálculo de Instalaciones de Puesta a Tierra

E. Bendito, A. Carmona, A.M. Encinas y M.J. Jiménez

Departamento de Matemática Aplicada III

Universitat Politècnica de Catalunya. España

1. Introducción

Uno de los elementos de protección más importantes en subestaciones eléctricas y centros de transformación son las puestas a tierra. Aunque es objetivo de éstas preservar las instalaciones y mantener una tensión de servicio, el fin principal de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas que se encuentran en la propia instalación o en las inmediaciones de su emplazamiento y es con esta finalidad con la que deben ser diseñadas.

Las redes de tierra suelen estar constituidas por mallas de electrodos enterradas bajo las instalaciones eléctricas. Para que cumplan su cometido, deben estar proyectadas de manera que, cuando se produzca una corriente de defecto y se derive a tierra, disipen dicha corriente en el terreno de forma que los potenciales que afloran a la superficie, proporcionen unas tensiones de contacto y de paso que verifiquen las prescripciones generales de seguridad. Por lo tanto, una de las principales herramientas del proyectista será el procedimiento de cálculo del potencial eléctrico producido al derivar una corriente a una red de tierra.

En este artículo examinamos someramente algunos aspectos de las técnicas habituales de cálculo, concretamente de los denominados métodos de potencial medio, en algunas configuraciones de electrodos tipo. Para analizar el efecto de la hipótesis, frecuentemente aplicada en estos métodos, de suponer que la corriente se distribuye uniformemente sobre la puesta a tierra, calculamos el potencial sobre los propios electrodos. Constatamos entonces que la admisión de dicha hipótesis no permite verificar el fenómeno físico que indica que la distribución de corriente produce un potencial que es constante sobre la puesta a tierra.

Las propiedades del potencial eléctrico nos han permitido adaptar el método que denominamos de cargas extremas a la estimación de la distribución de corriente sobre las redes de tierra. Tras el empleo de una serie de recursos de índole teórica, el cálculo de tal distribución se lleva a cabo mediante la aplicación de un algoritmo de programación lineal.

Para estimar la calidad de las aproximaciones, utilizamos esta metodología sobre algunos ejemplos de tipo académico, comenzando por comprobar que la solución obtenida al aplicar el algoritmo, permite construir un potencial que es prácticamente constante sobre la red de tierra. Posteriormente, discutimos algunos aspectos de la utilización de mallas no equiespaciadas y de la incorporación de picas en la periferia, y analizamos si la adopción de estas geometrías, más acordes con la distribución de corriente, mejora los valores de los parámetros fundamentales en el diseño de redes.

Una de las conclusiones que podemos extraer es que disponer de un método de cálculo ágil pero preciso permite por una parte discriminar entre diferentes configuraciones adaptando el diseño de las puestas a tierra a las necesidades concretas y por otra, conocer con precisión las zonas en las que se localizan los mayores riesgos. Es claro que la incorporación adecuada de electrodos a una malla reduce los valores de sus parámetros fundamentales. Otra forma de disminuirlos es alterar la configuración de la malla, manteniendo las condiciones de emplazamiento y la cantidad de material fijas. Los resultados obtenidos nos indican que la utilización de mallas con configuraciones óptimas puede permitir ahorros importantes de material preservando la seguridad en las instalaciones.

2. Modelo Físico

La función de una red de tierra es disipar la intensidad de corriente acumulada ante una situación de fallo o accidente que genere una sobretensión. El terreno sobre el que se encuentra la instalación constituye el medio difusor de la corriente y desde el punto de vista eléctrico es un semiconductor cuya resistividad varía en función de su heterogeneidad geológica. Aunque esta heterogeneidad es prácticamente inevitable, si consideramos instalaciones de alta tensión en las que usualmente se realizan desmontes y movimientos de tierras, y si las condiciones meteorológicas no son tan extremas como para suponer la existencia de capas de hielo en períodos de tiempo muy prolongados, es razonable asumir que el terreno es homogéneo. Esta hipótesis está presente en buena parte de las modelizaciones y será también asumida a lo largo de este trabajo. No obstante, la consideración de la heterogeneidad del terreno, que suele plasmarse como un modelo multicapa, no crea ninguna disfunción en el método de cálculo que aquí proponemos y sólo incrementa el número de operaciones a realizar para calcular los coeficientes del sistema que modela el fenómeno y que resolvemos por programación lineal.

Las redes de tierra están constituidas por mallas de electrodos metálicos, generalmente de cobre y, por tanto, asimilables a conductores perfectos que no ofrecen resistencia apreciable al paso de la corriente. En consecuencia, puede suponerse que la corriente se distribuye instantáneamente por la superficie de la malla.

El potencial eléctrico producido en el terreno está determinado por la densidad de corriente sobre la red de tierra y como dicha densidad queda caracterizada fundamentalmente por la geometría de la red, lo mismo le ocurre al potencial. Por tanto, en las inmediaciones del terreno situado sobre la malla los valores que toma el potencial están muy condicionados por la forma de la puesta a tierra.

Dado que el potencial eléctrico depende del inverso de la distancia, si con la puesta a tierra sólo se buscara reducir la tensión en la superficie del terreno, bastaría con enterrar los electrodos a la mayor profundidad posible. Sin embargo, esto tendría efectos dramáticos para las personas que estuvieran en contacto con elementos metálicos exteriores conectados con la red de tierra. Por otra parte, acercar demasiado la red de tierra a la superficie del terreno generaría en el suelo zonas con un elevado gradiente de potencial, lo que sería muy peligroso para las personas que caminaran por las inmediaciones. Por tanto, el diseño de las puestas a tierra debe realizarse con el fin de alcanzar un compromiso entre los valores del potencial en el terreno y la diferencia de potencial entre puntos del mismo, para que las tensiones de contacto y de paso queden del lado de la seguridad [1], (ver Figura 1 (a)).

El potencial eléctrico producido en este tipo de problemas queda determinado por ser constante sobre la puesta a tierra y por no existir conducción eléctrica a través de la superficie del terreno. En un buen número de casos se puede suponer que la superficie del terreno es plana, lo que nos permite convertir el campo eléctrico en otro equivalente más sencillo de calcular. La simplificación se logra al duplicar el espacio ocupado por el terreno utilizando el plano de superficie como plano de simetría. Entonces, el potencial quedará determinado por ser constante sobre la puesta a tierra y su simetrizada, lo que establece la aplicación del método de las imágenes, (ver Figura 1 (b)).

3. Métodos de Cálculo

La complejidad geométrica de una red de tierra, aún en el caso de contar con pocos electrodos, hace que no sea posible encontrar expresiones analíticas explícitas del potencial eléctrico, por lo que deberemos obtener soluciones aproximadas. De cualquier modo, el problema de tipo numérico sigue siendo difícil y requiere un tratamiento delicado, por lo que se hace necesario asumir ciertas hipótesis sobre el modelo para facilitar el cálculo de las soluciones. Entre los posibles métodos de resolución, los que tienen mayor uso en el ámbito profesional son los denominados métodos de potencial medio. Tras un breve análisis de este tipo de métodos, presentamos el esquema del método de cargas

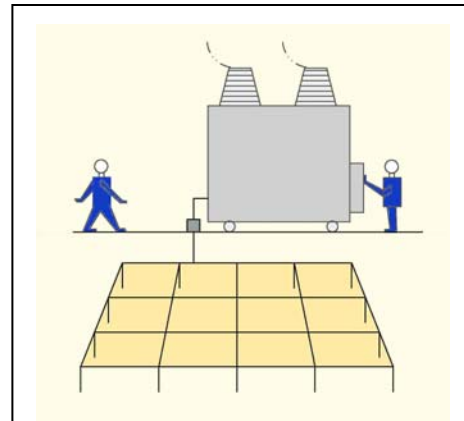


Figura 1 (a): Esquema de instalación de una puesta a tierra

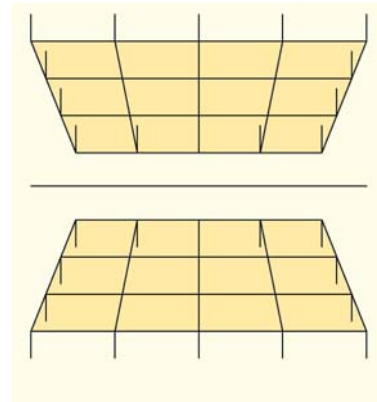


Figura 1 (b): Puesta a tierra y su simetrizada

extremales, desarrollado por los autores de este trabajo y que en cierta medida puede complementar a aquéllos y subsanar alguna dificultad.

3.1 Métodos de Potencial Medio

Aunque existen diferentes iniciativas y técnicas de aplicación, la estrategia común a los métodos de potencial medio podría resumirse en:

- Considerar los electrodos que constituyen la red de tierra como objetos unidimensionales.
- Suponer constante la densidad de corriente en los electrodos o segmentos de electrodos en los que se ha particionado la malla.
- Restringir las geometrías de las mallas a retículas, para que los segmentos resulten perpendiculares o paralelos entre sí.

La combinación de estas tres iniciativas permite reducir las ecuaciones que determinan el potencial eléctrico sobre la red de tierra a un sistema lineal, cuya matriz de coeficientes está constituida por los coeficientes de influencia de unos segmentos sobre los otros. Los valores de los coeficientes de influencia se calculan analíticamente gracias a las simplificaciones de tipo geométrico efectuadas, salvo en los casos de segmentos alineados para los que deberá aproximarse su valor. El potencial en el segmento i -ésimo debido al segmento j -ésimo se expresa como el producto del correspondiente coeficiente de influencia por la densidad de corriente del segmento j -ésimo, y sumando en los segmentos de la malla, se obtiene el potencial en el segmento i -ésimo. Entonces, la densidad de corriente de cada segmento quedará caracterizada por hacer constante el valor del potencial en todos los segmentos de la red de tierra, [2].

La dificultad de disponer de condiciones para asegurar que el sistema algebraico tenga solución con valores de la densidad de corriente estrictamente positivos, ha conducido a menudo a utilizar diferentes iniciativas sustitutivas de la resolución del sistema. La más comúnmente aplicada consiste en considerar uniforme la distribución de corriente en la malla y por tanto asignar como densidad de corriente a cada segmento de electrodo, la parte proporcional de la intensidad de corriente acorde con la longitud del segmento. Otro criterio de estimación de la densidad de corriente consiste en considerarla proporcional a la distancia del segmento de electrodo al centro de la malla, interpretando así el efecto ejercido por la geometría de las redes de tierra sobre la distribución de corriente [3,4].

Con el fin de estimar la repercusión que tiene sobre los valores del potencial eléctrico el suponer uniforme la distribución de corriente, hemos considerado unas configuraciones de electrodos sencillas, utilizadas a veces en centros de transformación y dimensionadas con el fin de aprovechar la cimentación de los locales. Para este tipo de mallas calculamos el potencial sobre los propios electrodos a partir de un método de potencial medio, concretamente del método de Howe.

Los cálculos han sido realizados sobre redes de tierra con las siguientes características:

- Resistividad del terreno, $1\Omega m$.

- Intensidad de corriente, $1 A$.
- Profundidad de la red, $50 cm$.
- Sección de los electrodos, $50 mm^2$.
- Picas de $2 m$ de longitud y $14 mm$ de diámetro.

En primer lugar consideramos una malla cuadrada de $6 m$ de lado. En la Figura 2 presentamos el potencial en sus electrodos así como el potencial medio estimado. Posteriormente, examinamos una malla rectangular de $8 m \times 4 m$ con picas en los vértices y en los puntos medios de los electrodos. En la Figura 3 se muestra el potencial medio y el potencial calculado en los dos tipos de electrodos y en una pica de un vértice.

A la vista de las gráficas, estimamos que no es tan importante evaluar la diferencia entre el potencial medio y el potencial en los electrodos como extraer algunas conclusiones de tipo cualitativo. Por ejemplo, conforme mayores sean las redes consideradas e incluyan picas, y por tanto cuanto más extremada sea su geometría, más comprometido será aceptar los valores obtenidos del potencial medio como valor de referencia y puede no quedar claro cuando se está del lado de la seguridad [5]. Por otra parte, un error en el cálculo del potencial puede multiplicarse hasta por diez en la estimación del campo eléctrico, lo que hace que las tensiones de contacto y de paso sean muy sensibles a los errores en la determinación del potencial. Además, la utilización de grandes segmentos de electrodo puede producir errores significativos. Estas observaciones nos inducen a concluir que una manera de despejar las incertidumbres es realizar una segmentación de los electrodos adecuada a la red considerada y resolver el

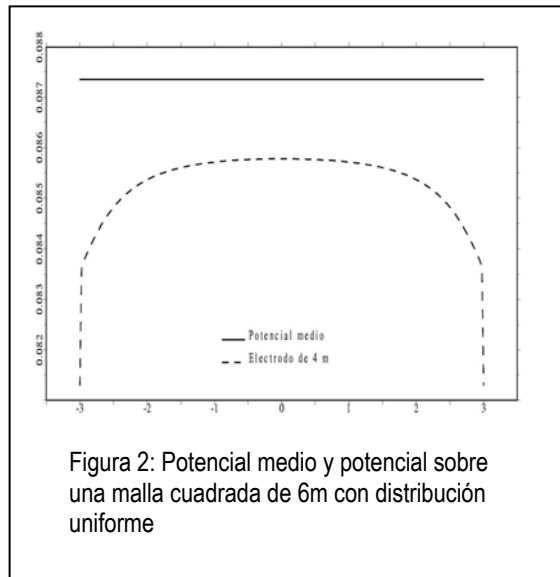


Figura 2: Potencial medio y potencial sobre una malla cuadrada de $6 m$ con distribución uniforme

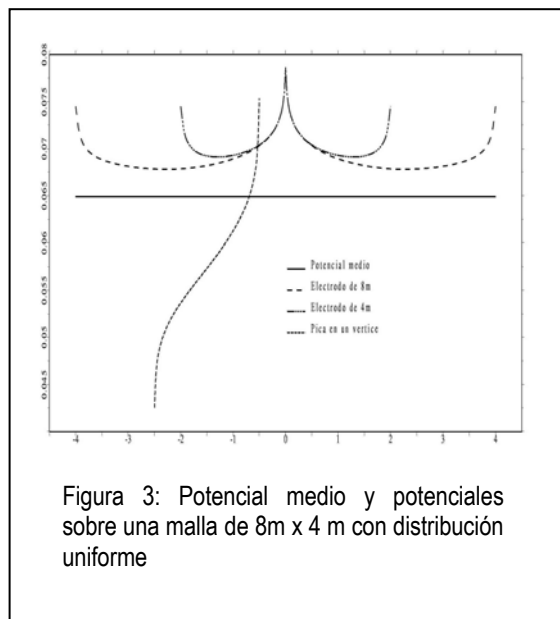


Figura 3: Potencial medio y potenciales sobre una malla de $8 m \times 4 m$ con distribución uniforme

sistema que determina la distribución de corriente sobre la malla. Un análisis de la resolución del sistema puede encontrarse por ejemplo en [6].

No obstante, debemos añadir que, aunque a distancias medias y cortas la geometría de la malla de electrodos es relevante para obtener el potencial eléctrico, a partir de cierta distancia cualquier electrodo es asimilable a uno esférico y las diferencias en los valores del potencial obtenidos al realizar unas u otras hipótesis se mitigan grandemente.

3.2 Método de Cargas Extremales

En este apartado esquematizamos un método alternativo de cálculo del potencial eléctrico. La estrategia del método consiste en utilizar las propiedades de dicho potencial para transformar la condición de ser constante sobre la red de tierra y su simetrizada en un problema de optimización. Concretamente este problema de optimización consiste en obtener el mínimo entre las distribuciones de corriente en la malla, del máximo valor del potencial sobre su superficie, [7,8].

La resolución efectiva de este problema parte de la discretización de la malla, representando la superficie de la misma por un conjunto de puntos de evaluación y concentrando la distribución de corriente en un conjunto de puntos de carga sobre los ejes de los electrodos. Entonces, gracias a la dependencia lineal del potencial respecto de las cargas, el problema de optimización discreto se transforma en un problema de programación lineal. De esta manera, la resolución del sistema que expresaba que el potencial es constante sobre la red de tierra, se ha transformado en la obtención de la mejor solución de un problema de optimización que, en particular, tiene la propiedad de construir una solución positiva del aludido sistema, [8,9].

Nuestro método de cálculo evita problemas similares a los que se producen al calcular los coeficientes de autoinfluencia en los métodos de potencial medio, debido a que diferenciamos las zonas de extracción de puntos de cargas y de puntos de evaluación y por tanto, el mayor coeficiente que podría ser considerado es el inverso del radio de los electrodos. Esto elimina la posible inestabilidad numérica, sin perder la convergencia de la solución aproximada a la del problema inicial. Además, la independencia entre el número de puntos de carga y de puntos de evaluación permite modelizar las mallas considerando mayor número de unos u otros en función del servicio que se busque en la aproximación concreta. Lógicamente, para un primer análisis de las prestaciones de una red de tierra dada, no será necesario un gran número de puntos de evaluación. Por otro lado, una geometría sofisticada y con abundantes electrodos, hará inevitable utilizar bastantes cargas para obtener aproximaciones razonables. Desde el punto de vista algorítmico, las características de los métodos de programación lineal permiten resolver muy rápidamente problemas con un gran número de restricciones; además se incrementa la velocidad de obtención de la solución si alguna de las dimensiones de la matriz de restricciones, número de evaluaciones o número de cargas, no es excesivamente grande.

El hecho de que en el método de cargas extremales se trabaje con puntos de carga y de evaluación en vez de con segmentos, libera a las redes de tierra de restricciones de tipo geométrico, pudiendo adaptarse a las configuraciones que el proyectista considere adecuadas para cada instalación concreta.

Debe observarse que la expresión del potencial obtenida mediante el método de cargas extremales es más simple que las correspondientes expresiones debidas a los

métodos de potencial medio, ya que al cambiar los segmentos de electrodos por puntos, las operaciones de integración que aparecen en los métodos de potencial medio se transforman ahora en sumas. Concretamente, si consideramos una carga de valor a_j en el punto p_j y en su simetrizado p'_j , el potencial eléctrico en el punto x_i vendrá dado por la expresión

$$V_i = \sum_{j=1}^n a_j \left(\frac{1}{d_{ij}} + \frac{1}{d'_{ij}} \right)$$

En la Figura 4 esquematizamos el proceso seguido para discretizar los electrodos y sus simetrizados.

Antes de presentar un conjunto de ejemplos donde se muestra la eficacia del método de cargas extremales consideramos interesante precisar que es posible crear una zona de encuentro para los dos métodos de cálculo aquí presentados. Entendemos que el método de cargas extremales puede aportar a los métodos de potencial medio una serie de iniciativas con el

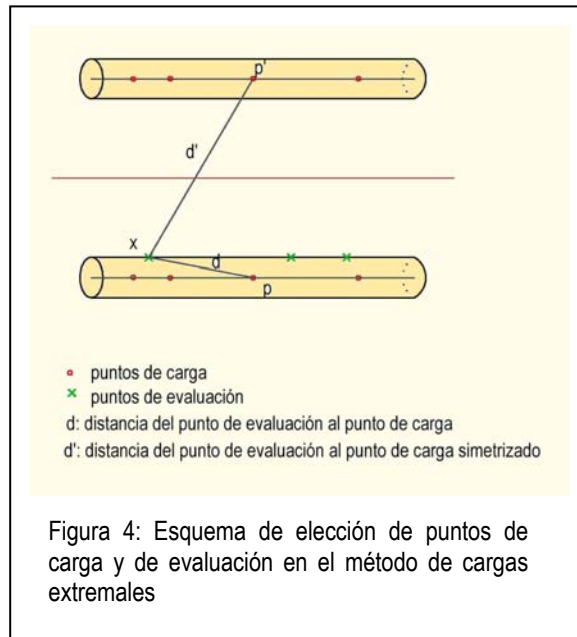


Figura 4: Esquema de elección de puntos de carga y de evaluación en el método de cargas extremales

fin de resolver el sistema que verifica el potencial eléctrico sobre los electrodos, garantizando además la verificación de las propiedades de tipo físico de la solución y sin necesidad de aproximar las aportaciones producidas por electrodos alineados. El esquema básicamente consistiría en utilizar aproximaciones unidimensionales diferentes al considerar los segmentos de los electrodos como segmentos de evaluación del potencial o como segmentos con densidad de corriente. Cuando los segmentos de electrodo actúan como elementos con densidad de corriente pueden ser representados por los ejes de dichos segmentos, mientras que la evaluación del potencial del electrodo debería ser realizada sobre una generatriz del cilindro al que hayamos asimilado el segmento de electrodo. Entonces, puede construirse una matriz de coeficientes de influencia, no necesariamente cuadrada, con la metodología del potencial medio y resolver el correspondiente sistema por programación lineal.

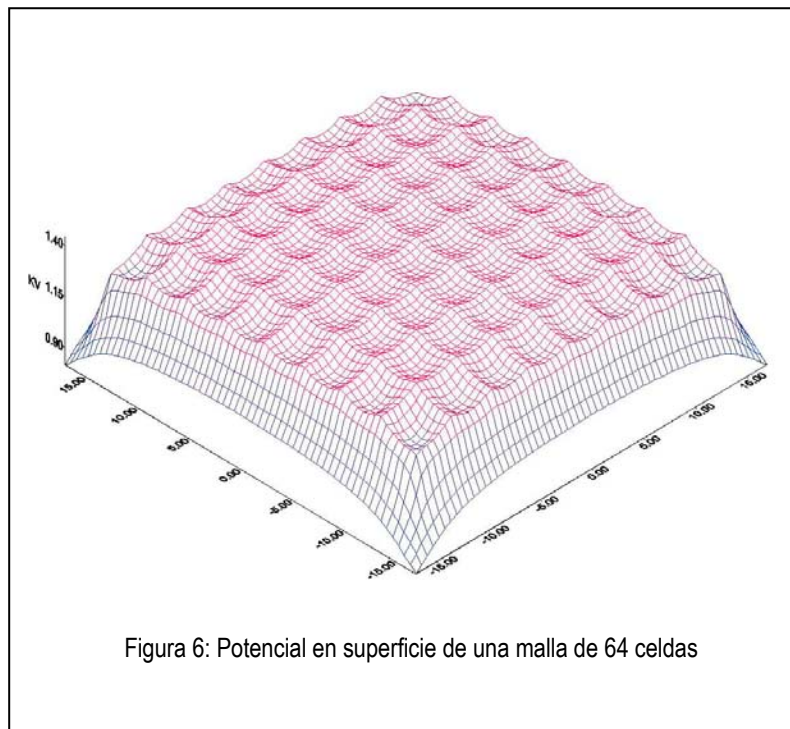
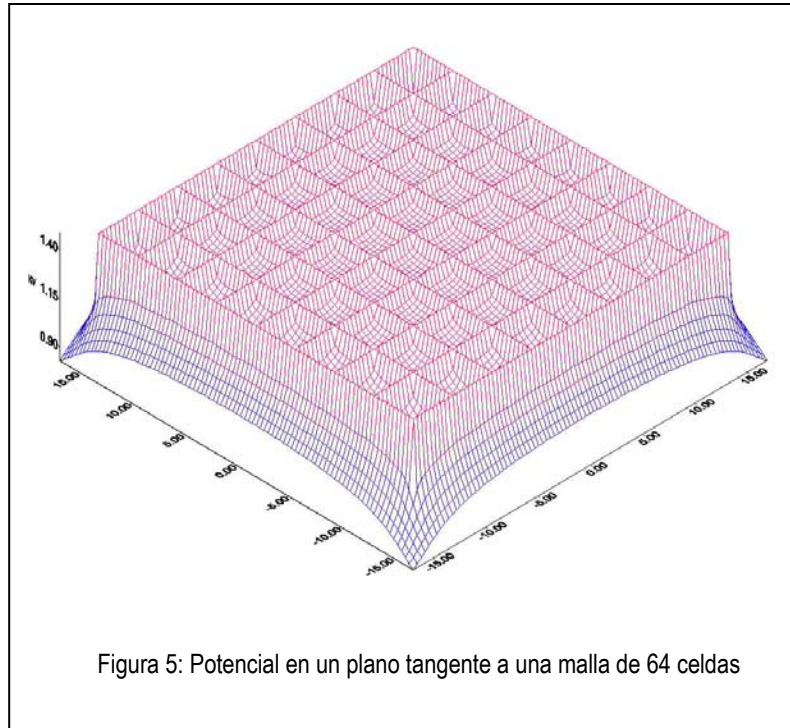
A continuación, ilustramos el método de cargas extremales, presentando algunos ejemplos de tipo académico para los que calculamos el potencial y los parámetros fundamentales de diseño en las puestas a tierra [10].

Con el fin de unificar la presentación de resultados hemos considerado el siguiente conjunto de características físicas y geométricas comunes a todos los ejemplos analizados:

- Suelo homogéneo con resistividad de $100 \Omega m$.

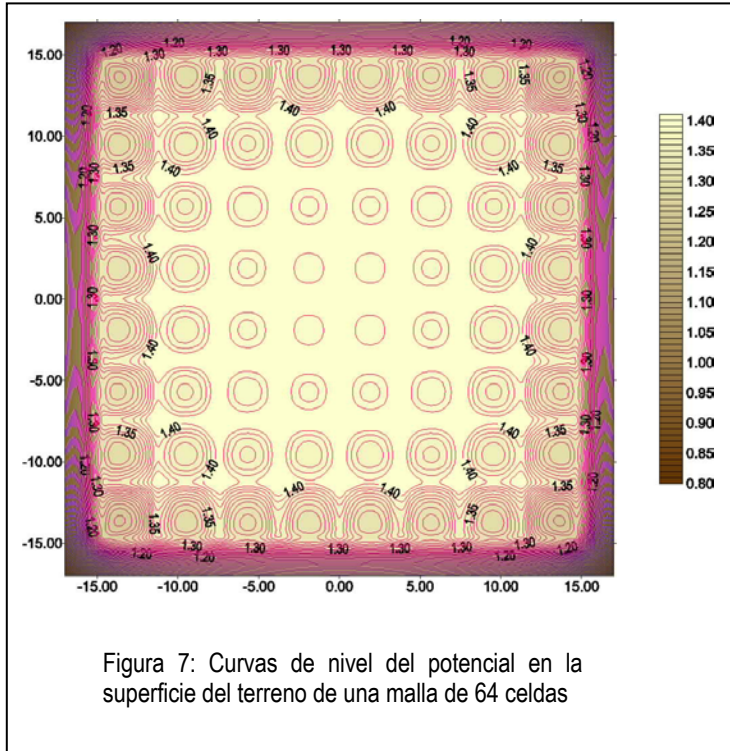
- Intensidad de corriente de fallo de 1 KA .
- Mallas cuadradas y simétricas de 30 m de lado, enterradas a 50 cm de profundidad.
- Electrodo de 2 cm de diámetro.
- Picas de 2 m de longitud y 3 cm de diámetro.

Dado que el método de cargas extremas representa una solución alternativa a la de resolver el sistema de ecuaciones verificado por el potencial en los puntos de la red de tierra, resulta razonable comenzar mostrando que mediante la aplicación de un algoritmo de programación lineal se obtiene un potencial prácticamente constante sobre la superficie de la malla. Para comprobar la fiabilidad de los resultados se ha calculado el potencial, debido a la distribución de



carga óptima, en un número suficiente de puntos de un plano tangente a una malla equiespaciada de 64 celdas y sin picas, lo que representamos en la Figura 5.

Se observa que el potencial toma un único valor perceptible sobre los electrodos de la malla, mientras que en los vanos se produce una importante caída del potencial siendo ésta extremada en la periferia. Este efecto se va amortiguando conforme nos distanciamos de la red de tierra y en particular cuando nos situamos sobre la superficie del terreno. No obstante, la variación del potencial en la superficie del terreno aún mantiene una alta dependencia de la forma de la malla lo que puede comprobarse en la Figura 6. En ella presentamos el potencial producido en un cuadrado de 34 metros de lado



sobre la vertical de la red. Quizás la forma más esclarecedora de observar el comportamiento del potencial eléctrico en la superficie del terreno sea mediante sus curvas de nivel que presentamos en la Figura 7. Podemos comprobar que en la zona central el potencial tiene leves variaciones, lo que está en consonancia con una malla con suficiente número de electrodos; mientras que en la periferia, y sobre todo en los vértices, se producen unas caídas de potencial importantes.

También hemos calculado para este ejemplo los parámetros fundamentales en el diseño de redes. La tensión de contacto es de 0,488 KV y ha sido calculada como la máxima diferencia entre el potencial en la malla y el potencial en la superficie del terreno en un cuadrado de 31,4 metros de lado sobre la vertical de la malla. La tensión de paso es de 0,212 KV y ha sido calculada como la máxima diferencia entre puntos de la superficie del terreno separados por una distancia de un metro.

Debemos observar que los cálculos han sido realizados considerando cargas puntuales distribuidas de forma equiespaciada sobre los ejes de los electrodos y por tanto, el potencial eléctrico en cualquier punto queda expresado por la suma de aportaciones de los puntos de carga. En el ejemplo analizado, hemos considerado una segmentación de la malla tal que, una vez asumida las simetrías, contiene 450 valores de carga diferentes. El algoritmo de programación lineal calcula los valores de carga óptimos para producir potencial constante sobre 3780 puntos de la superficie de la malla. El potencial en el plano tangente a la malla debido a esa distribución de carga, ha sido calculado en 8281

puntos, mientras que el correspondiente potencial de superficie ha sido calculado en 3721 puntos.

4. Mejora de las prestaciones de las mallas

Claramente, el campo eléctrico fluye con mayor intensidad por los elementos más puntiagudos de las redes de tierra y es bien conocido el efecto placa y frontera de las mallas uniformes, lo que ha quedado parcialmente constatado por la configuración de las curvas de nivel de la Figura 7. Esto hace que los valores que determinan las tensiones de paso y contacto acostumbren a alcanzarse al salir de la vertical de las mallas y fundamentalmente al hacerlo por los vértices de las mismas.

La manera más extendida y útil de amortiguar estas diferencias de potencial es la consideración de picas en puntos de la periferia y en especial en los vértices. Por otra parte, es aceptado en el medio profesional que la utilización de puestas a tierra no equiespaciadas puede mejorar la seguridad respecto de los valores de las tensiones de contacto y de paso.

Bajo la denominación de optimización de la geometría de una malla subyace una generalidad de análisis que está bastante alejada de nuestro propósito. Respetando las propiedades de simetría, la longitud de los electrodos y el número de vanos, el plan de trabajo seguido en esta dirección ha consistido en alterar la posición de los electrodos intermedios desplazándolos desde las zonas interiores hacia la periferia. Para cada una de las configuraciones obtenidas al realizar los desplazamientos han sido calculados los parámetros fundamentales. Lógicamente, el mínimo valor de estos parámetros no se presenta en una misma configuración, por tanto aquí entenderemos por óptima la configuración en la que se alcanza el mejor compromiso posible entre los valores de los parámetros.

Mostramos el efecto producido por la variación de la geometría mediante el análisis de una malla de 16 celdas con picas en todos los nodos de la periferia. La consideración de picas mitiga las

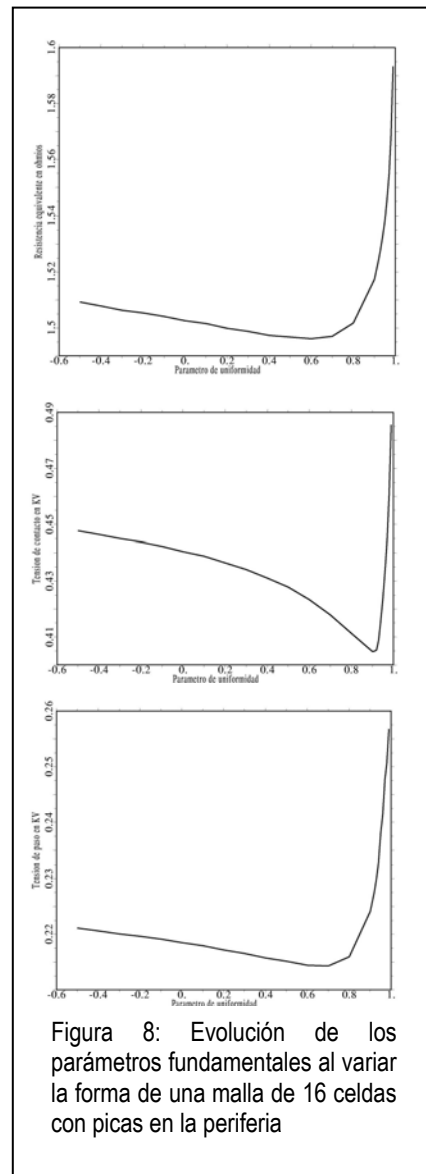


Figura 8: Evolución de los parámetros fundamentales al variar la forma de una malla de 16 celdas con picas en la periferia

diferencias de potencial en el entorno de la frontera por lo que las configuraciones que producen los parámetros óptimos son algo menos forzadas de lo que serían en el caso de mallas sin picas.

En la Figura 8 presentamos la evolución de los valores de la resistencia equivalente, de la tensión de contacto y de la tensión de paso para mallas de 16 celdas según diferentes valores del parámetro de uniformidad. El valor 0 de dicho parámetro está asociado a la malla equiespaciada para la que todas las celdas tienen el mismo área. Los valores negativos corresponden a configuraciones para las que las celdas interiores tienen menor área que las celdas periféricas. El valor del parámetro crece conforme decrece el área de las celdas periféricas, asociando el valor uno al caso degenerado en el que desaparecen los vanos periféricos. En primer lugar debemos constatar que, para el ejemplo considerado, la tensión de contacto decrece de forma ostensible hasta configuraciones excesivamente forzadas en las que la distancia entre picas es demasiado pequeña e incumple las restricciones que en esta materia propone la normativa. Por tanto, en este caso los valores de la resistencia equivalente y de la tensión de paso serán los que determinen la configuración más adecuada. De cualquier forma, es interesante observar el rango de variación de los tres parámetros que indica que se pueden obtener reducciones importantes en el valor de los mismos, alterando únicamente la posición relativa de algunos electrodos. De acuerdo con el aspecto que adquiere la distribución de corriente en una placa cuadrada, las configuraciones de mallas con mejores prestaciones coinciden con aquéllas cuyos vanos periféricos tienen menor área que los centrales. En las Figuras 9 y 10 presentamos las curvas de nivel del potencial en la superficie del terreno de una malla de 16 celdas con picas en la periferia, considerando las celdas equiespaciadas y optimizadas, respectivamente. Para esta última, el valor del parámetro de uniformidad elegido ha sido 0,6, que corresponde a la consideración de una malla con electrodos cuya longitud entre nodos es 10,7 m y 4,3 m.

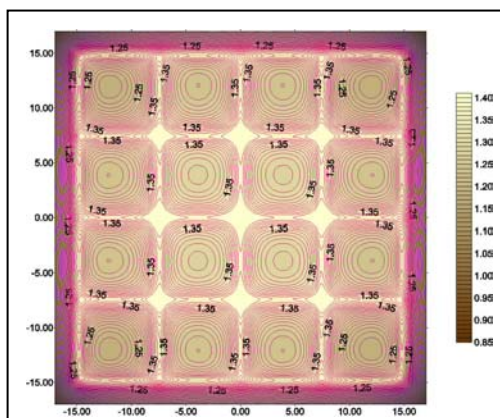


Figura 9: Curvas de nivel del potencial en la superficie del terreno de una malla de 16 celdas con picas en la periferia

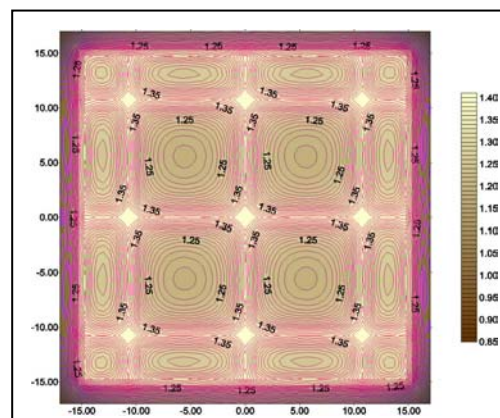


Figura 10: Curvas de nivel del potencial en la superficie del terreno de una malla de 16 celdas optimizada con picas en la periferia

De la observación de las gráficas queda patente la reducción de zonas de potencial elevado en la red con geometría optimizada. Además, la caída de potencial producida en las zonas centrales de esta malla no es lo suficientemente pronunciada como para que se alcancen en ellas las tensiones de contacto y de paso que siguen localizándose en el entorno de los vértices. Estas variaciones del potencial en la malla optimizada pueden observarse también en la Figura 11 en la que presentamos el potencial de superficie.

Para finalizar este artículo, presentamos una comparación de los valores de los parámetros de diseño de una puesta a tierra en un conjunto de mallas, todas ellas con las características comunes especificadas en el apartado 3.2. Lo más destacable de los datos que se presentan en la Tabla 1 es la drástica reducción de los valores de los parámetros de diseño obtenida al incorporar picas a las mallas. No obstante, aunque la optimización de las mallas produce reducciones de menor magnitud, al ser independiente de la utilización de picas, puede incorporarse como una herramienta más en el diseño de puestas a tierra.

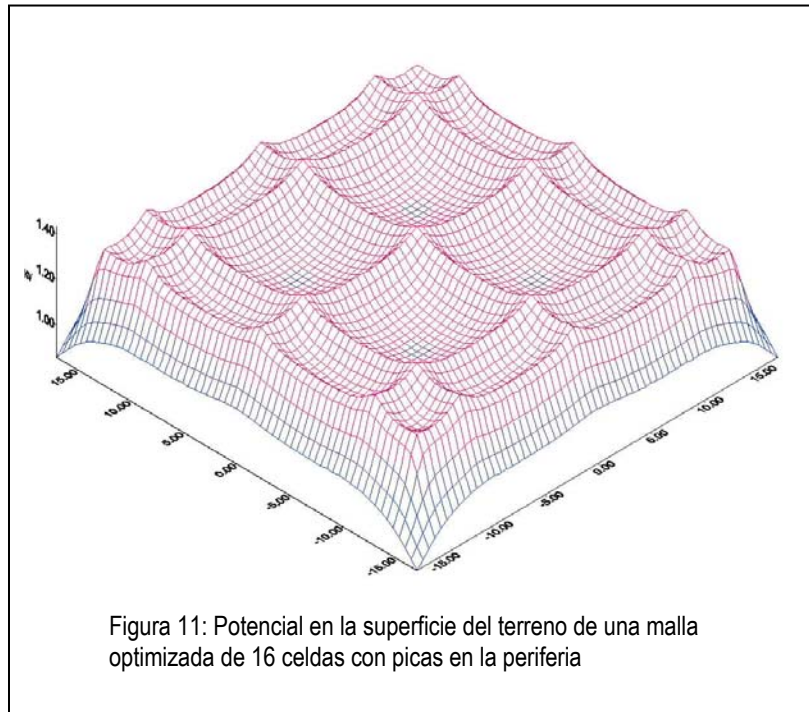


Figura 11: Potencial en la superficie del terreno de una malla optimizada de 16 celdas con picas en la periferia

Tabla 1: Comparación de parámetros fundamentales

Mallas	R	R ópt.	Vc	Vc ópt.	Vp	Vp ópt.
sin picas	1,586	1,576	0,567	0,549	0,239	0,236
16 celdas picas vértices	1,555	1,548	0,479	0,466	0,228	0,225
picas nodos	1,516	1,509	0,454	0,436	0,217	0,213
sin picas	1,483	1,470	0,488	0,462	0,212	0,214
64 celdas picas vértices	1,462	1,451	0,417	0,399	0,203	0,204
picas nodos	1,405	1,398	0,376	0,353	0,186	0,185
sin picas	1,430	1,417	0,440	0,416	0,201	0,214
256 celdas picas vértices	1,413	1,403	0,380	0,361	0,192	0,201
picas nodos	1,337	1,334	0,316	0,302	0,168	0,168

El parámetro de uniformidad es 0,6 en los tres casos de mallas de 16 celdas y esta triple coincidencia parece indicar que se trata de una configuración adecuada. En el caso de la malla de 64 celdas sin picas o con picas en los vértices el valor del parámetro de uniformidad es 0,4, lo que corresponde a una proporción en la que el electrodo de menor longitud es de 1,5 m, mientras que en el caso de mallas de 64 celdas con picas en todos los vértices de la periferia el valor del parámetro de uniformidad es 0,3, lo que corresponde a una distancia mínima entre picas de 2,1 m. La consideración de una malla de 256 celdas es algo desproporcionada para cubrir un cuadrado de 30 m de lado, por lo que se obtienen valores del parámetro de uniformidad que conducen a dimensiones no construibles en algunos casos. Por ejemplo, en la configuración óptima de la malla con picas en toda la periferia la menor distancia entre éstas es 1,3 m, separación insuficiente para verificar la normativa.

Analizando los valores presentados en la tabla cabe hacer alguna observación en relación con el posible ahorro de material que se puede producir al tener en cuenta la optimización de la geometría de los vanos. Puede comprobarse que, en los casos evaluados, la consideración de picas en los vértices reduce la tensión de contacto de forma más efectiva que considerando la optimización geométrica. Ahora bien, cuando una malla uniforme contiene una cantidad razonable de electrodos, puede resultar más operativo optimizar la forma de sus vanos que aumentar el número de electrodos manteniendo la uniformidad de las mallas. Por ejemplo, en una malla uniforme de 64 celdas y sin picas se ha obtenido una reducción del 5% en la tensión de contacto al optimizar la geometría de sus celdas. Sin embargo, si se compara con una malla también uniforme pero de 256 celdas, lo que supone un incremento del orden del 90% en el material, la reducción de la tensión de contacto es del 10%. Esto muestra que optimizar la geometría de las mallas puede producir reducciones significativas en la tensión de contacto sin necesidad de realizar drásticos incrementos de material.

5. Conclusiones

El diseño de puestas a tierra en instalaciones de alta tensión requiere disponer de un método de cálculo del potencial eléctrico sencillo, versátil y preciso. Estas propiedades pueden ser aportadas por los métodos de potencial medio si se segmentan los electrodos de la red de tierra adecuadamente y se resuelve el sistema de ecuaciones que determina la densidad de corriente. Sin embargo, la ausencia de una metodología simple y sistemática de obtención de dicha densidad conduce en la mayoría de los casos a suponerla constante.

En este artículo hemos presentado una metodología desarrollada por los autores que conduce a la obtención de la densidad de corriente mediante un algoritmo de programación lineal. Entonces, el potencial eléctrico asociado verifica la propiedad de ser constante sobre la red de tierra, lo que lo caracteriza físicamente.

Hemos aplicado este método, que denominamos de cargas extremales, sobre algunas mallas de electrodos y se ha constatado lo ajustado de los cálculos realizados. Por otra parte, la distinción entre zonas de evaluación y zonas de carga permite adecuar el número de unas u otras a las diferentes fases del diseño, además de evitar inestabilidades de tipo numérico.

La versatilidad del método nos ha conducido a abordar el análisis de la influencia de la geometría de la red de tierra en el potencial y en definitiva, en los valores de los parámetros fundamentales. Esto nos ha llevado a obtener configuraciones muy simples en las que se mejoran sustancialmente los valores de dichos parámetros manteniendo fija la cantidad de material utilizado. También se ha mostrado que este proceso de optimización podría hacer decantar al proyectista a diseños de mallas que, manteniendo los requisitos de seguridad, produzcan un ahorro considerable de material.

Del estudio del método de cargas extremales presentado en este artículo y de su comparación con los métodos de potencial medio, se desprende el interés de crear una zona de encuentro para ambos. Su combinación podría conjugar la eficacia del método de cargas extremales en el cálculo efectivo de los potenciales con la sencillez de modelización de los métodos de potencial medio a los que está habituado el proyectista de redes de tierra.

6. Bibliografía

[1] MIE-RAT. Reglamento sobre centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación, Ministerio de Industria y Energía (1999).

[2] Heppe, R.J. "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, N° 6, 1978-1989, (1979).

[3] Dawalibi, F. y Mukhedkar. "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure. Part I- Analytical study", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, N° 2, 252-261, (1975).

[4] Nagar, R.P., Velázquez R., Loeloeian, M., Mukhedkar, D. y Gervais Y. "Review of analytical methods for calculating the performance of large grounding electrodes. Part I: Theoretical considerations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, N° 11, 3124-3133, (1985).

[5] Garret, D.L. y Pruitt, J.G. "Problems encountered with the Average Potential Method of analyzing substation grounding systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, N° 12, 3586—3596, (1985).

[6] Nahman, J. y Salamon, D. "Earthing system modelling by element aggregation", IEE Proceedings, vol. 133, N° 1, 54-58, (1986).

[7] Bendito, E. y Encinas, A.M. "Minimizing energy on locally compact spaces: existence and approximation", Numerical Functional Analysis and Optimization, 17(9&10), 843-865, (1996).

[8] Bendito E. y Encinas A.M. "Extremal masses in Potential Theory", Proceedings of the sixth International Colloquium on Numerical Analysis and Computer Science with Applications, Minchev, E. (ed.) 9-19, Academic Publications (1997).

[9] Bendito E. y Encinas A.M. "Sobre la utilización de cargas extremales en la estimación de la capacidad electrostática", Métodos Numéricos en Ingeniería, Navarrina, F. y Casteleiro M. (ed.), 2, 1559-1565, (1993).

[10] Jiménez, M.J. "Métodos de programación lineal en el diseño de elementos de protección de instalaciones eléctricas", Proyecto final de carrera, ETSETB, UPC (1999).