

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial



**Contribuciones al cálculo de la  
resistencia de puesta a tierra de  
electrodos en condiciones no habituales  
y aplicaciones a la modelización de los  
parámetros eléctricos del suelo**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Gregorio Denche Castejón**  
Ingeniero Industrial

Madrid, 2024

**Doctorado en Ingeniería de Producción y Diseño Industrial**

**Contribuciones al cálculo de la  
resistencia de puesta a tierra de  
electrodos en condiciones no habituales  
y aplicaciones a la modelización de los  
parámetros eléctricos del suelo**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Gregorio Denche Castejón**

Ingeniero Industrial

Bajo la dirección de:

Dr. Eduardo Faleiro Usanos

Madrid, 2024

Título: Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra de electrodos en condiciones no habituales y aplicaciones a la modelización de los parámetros eléctricos del suelo

Autor: Gregorio Denche Castejón

Programa de Doctorado: Ingeniería de Producción y Diseño Industrial

Dirección de tesis:

Dr. Eduardo Faleiro Usanos

Prof. Titular de Universidad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:



*<A mi querida esposa, Sandra, por ser mi compañera de vida, mi apoyo incondicional y mi mayor fortaleza. Gracias por tu paciencia, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, y por ser la luz que guía mi camino. Sin ti, este logro no habría sido posible.>*

*<Y a mi adorada hija, Alejandra, cuyo amor y sonrisa me han dado la fuerza y la motivación para seguir adelante cada día. Esta tesis es para ti, con la esperanza de que algún día te inspire a conseguir tus propios sueños.>*



# Agradecimientos

La finalización de esta tesis doctoral ha sido un viaje largo y desafiante, y no hubiera sido posible sin el apoyo y la colaboración de muchas personas a quienes quiero expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mi director de tesis, el Dr. Eduardo Faleiro Usanos, por su orientación, paciencia y apoyo constante. Su sabiduría y dedicación han sido esenciales para guiarme a lo largo de este proceso, y le estaré eternamente agradecido por su compromiso y tiempo.

Quiero extender mi gratitud a mis compañeros y amigos del grupo de investigación RIBAT. Sus aportes, compañía y el ambiente de colaboración han hecho de este recorrido algo mucho más llevadero y gratificante.

A mi esposa, Sandra, no tengo palabras para expresar lo agradecido que estoy por su amor, apoyo incondicional y paciencia infinita. Su comprensión en los momentos de mayor estrés y su constante ánimo han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi hija, Alejandra, gracias por ser una fuente constante de alegría y motivación. Su amor y energía han sido un recordatorio diario de lo que realmente importa en la vida y me han ayudado a mantener el equilibrio entre el trabajo y la familia.

A mi familia, en especial a mis padres, María Mercedes y Gregorio, por su apoyo constante, por inculcarme el valor de la educación y por estar siempre ahí cuando los he necesitado.

Finalmente, agradezco a INGESCO Lighting Solutions, Red Eléctrica de España S.A.U. y UFD Distribución Electricidad S.A., por los datos reales proporcionados amablemente para su uso exclusivamente con fines académicos en el desarrollo de esta tesis.

A todos, gracias por acompañarme en este viaje y por creer en mí. Esta tesis es tanto un logro mío como de cada uno de vosotros.



# Abstract

The thesis was designed with several key objectives: to optimize the design of grounding systems in high-voltage electrical installations, estimate the grounding resistance of large electrodes using unconventional methods, analyze the influence of internal electrode resistance, include the effect of oxidation in the calculation of resistance, and improve the Driven-Rod (*DR*) method for modeling the electrical parameters of the soil.

Firstly, an estimator was developed for the grounding resistance of large electrodes, which reduces computation time compared to the Charge Simulation Method (*CSM*). This estimator has been validated through applications to real electrical substation grids, demonstrating its accuracy.

Additionally, the thesis incorporates the internal resistance of electrodes into the grounding resistance calculation using a Circuit-Based Model (*CBM*). Calculations were performed for different materials, showing that internal resistance is more significant in large electrodes, particularly when replacing copper with other materials such as steel 1020 or stainless steel 304.

The effect of electrode oxidation or surface coating was also considered, introducing a model that allows estimating the impact of these factors on grounding resistance. It was concluded that oxidation increases grounding resistance, and the effectiveness of coating electrodes with low-resistivity materials as a method to reduce resistance was evaluated.

Regarding the determination of the soil electrical structure, the Driven-Rod method (*DR*), was improved, creating the "Resistive Driven-Rod" (*RDR*), which includes the internal resistance of the rod and its joints. Although this method presents challenges, such as coarse sampling and the complexity of the minimization process, it offers a valid alternative to non-invasive methods like Wenner.



# Resumen

Esta tesis se planteó con varios objetivos clave: optimizar el diseño de sistemas de Puesta a Tierra (*PaT*) en las instalaciones eléctricas de alta tensión, estimar la resistencia de *PaT* de grandes electrodos mediante métodos no convencionales, analizar la influencia de la resistencia interna de los electrodos, incluir el efecto de la oxidación en el cálculo de la resistencia y mejorar el método Driven-Rod (*DR*) para la modelización de los parámetros eléctricos del suelo.

En primer lugar, se desarrolló un estimador para determinar la resistencia de *PaT* de grandes electrodos, que reduce el tiempo de computación en comparación con el Método de Simulación de Cargas (*CSM*). Este estimador ha sido validado con aplicaciones a mallas de subestaciones eléctricas reales, demostrándose su precisión.

Además, en esta tesis se incorpora el parámetro de la resistencia interna de los electrodos en el cálculo de la resistencia de *PaT*, utilizando un Modelo Basado en Circuitos (*CBM*). Se realizaron cálculos para diferentes materiales, demostrándose que la resistencia interna es más significativa en electrodos de gran tamaño, especialmente al sustituir el cobre por otros materiales como el acero 1020 o el acero inoxidable 304.

También se consideró el efecto de la oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos, introduciéndose un modelo que permite estimar el impacto de estos factores en la resistencia de *PaT*. Se concluyó que la oxidación aumenta la resistencia de *PaT*, y se evaluó la efectividad de recubrir los electrodos con materiales de baja resistividad como método para reducir la resistencia.

En cuanto a la determinación de la estructura eléctrica del suelo, se mejoró el método de la varilla hincada o “Driven-Rod” (*DR*), creándose el método “Resistive Driven-Rod” (*RDR*), que incluye la resistencia interna de la varilla y sus uniones. Aunque este método aún presenta desafíos, como el muestreo grueso y abordar la complejidad del proceso de minimización, ofrece una alternativa válida a métodos no invasivos como el de Wenner.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Abreviaturas y acrónimos</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamentos matemáticos y modelización</b>	<b>11</b>
2.1. Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (PaT) en terrenos homogéneos.....	12
2.2. Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) de electrodos de gran tamaño.....	17
2.3. Modelo de electrodo con resistencia interna.....	21
2.4. Modelo con oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos.....	29
2.5. Modelo para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo mediante la técnica Resistive Driven-Rod (RDR).....	33
<b>3. Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra</b>	<b>37</b>
3.1. Estimador de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) para electrodos de gran tamaño.....	38
3.1.1. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Balaidos.....	38
3.1.2. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Loeches 45 kV.....	39
3.1.3. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Tiendas 220 kV.....	41
3.1.4. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Arbillera 400 kV.....	42
3.1.5. Resultados del estimador de la resistencia de $PaT$ .....	44
3.2. Electrodos con resistencia interna no despreciable sin oxidación o recubrimiento.....	45
3.2.1. Caso 1: Apoyo línea eléctrica aérea.....	45
3.2.2. Caso 2: Centro de transformación en edificio en área industrial.....	47
3.2.3. Caso 3: Centro de transformación en interior de edificio residencial.....	48
3.2.4. Caso 4: Subestación tipo intemperie de pequeño tamaño.....	49
3.2.5. Caso 5 y Caso 6: Subestación eléctrica tipo intemperie de gran tamaño.....	50
3.2.6. Resultados del cálculo de la resistencia de $PaT$ considerando la resistencia interna de los electrodos sin oxidación ni recubrimiento.....	50
3.3. Electrodos oxidados o con recubrimiento sin considerar su resistencia interna.....	55
3.3.1. Oxidación en malla S.E. Balaidos.....	55

3.3.2.	Recubrimiento de electrodo en apoyo de línea eléctrica aérea .....	56
3.4.	Electrodos con resistencia interna no despreciable y con oxidación o recubrimiento .....	58
3.4.1.	Varilla horizontal parcialmente corroída.....	59
3.4.2.	Sistema de PaT en apoyo de línea eléctrica aérea.....	61
3.4.3.	Sistema de PaT del centro de transformación situado en área industrial .....	64
3.4.4.	Sistema de PaT del centro de transformación de un edificio residencial .....	66
3.4.5.	Sistema de PaT en subestación tipo intemperie .....	69
<b>4.</b>	<b>Determinación de la estructura eléctrica del suelo - Método Resistive Driven-Rod</b>	<b>75</b>
4.1.	Ejemplos sintéticos sin resistencia interna.....	76
4.1.1.	Ejemplo sintético 1 .....	76
4.1.2.	Ejemplo sintético 2 .....	77
4.2.	Ejemplos sintéticos con resistencia interna no despreciable .....	80
4.3.	Ejemplos reales con resistencia interna no despreciable .....	83
4.3.1.	Suelo real en Girona.....	84
4.3.2.	Suelo real en Castelldefels .....	85
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>89</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>93</b>
	<b>Anexo: Contribuciones derivadas de la tesis</b>	<b>99</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Configuración general de electrodos en interacción. En este caso, $V_2$ es igual a $V_3$ debido a la conexión eléctrica. ....	12
Figura 2.2: Alambre delgado y conductor curvado donde se muestran algunas de las variables utilizadas. ....	14
Figura 2.3: Ilustración de los conceptos de potenciales de paso y contacto .....	17
Figura 2.4: Configuraciones de electrodos consideradas para definir el estimador de resistencia de $PaT$ de electrodos de gran tamaño .....	19
Figura 2.5: Modelo Basado en Circuitos ( $CBM$ ) de una barra conductora .....	24
Figura 2.6: Esquema de las magnitudes utilizadas en la rama k. ....	25
Figura 2.7: Electrodo de $PaT$ recubierto con una capa de material de espesor $e$ . ....	31
Figura 2.8: Esquema del método “Resistive Driven-Rod” ( $RDR$ ) .....	34
Figura 3.1: Malla de $PaT$ de la subestación eléctrica de Balaidos .....	38
Figura 3.2: Malla de $PaT$ del parque de 45kV/15kV de la subestación eléctrica de Loeches propiedad de $UFD$ .....	40
Figura 3.3: Malla de $PaT$ de la S.E. Tiendas 220 kV .....	41
Figura 3.4: Malla de $PaT$ de la S.E. Arbillera 400 kV .....	42
Figura 3.5: Plano de la red de tierras de la S.E. Arbillera 400 kV .....	43
Figura 3.6: Electrodo de $PaT$ típico en apoyo de línea eléctrica aérea .....	46
Figura 3.7: Ejemplo de sistema de $PaT$ de un centro de transformación en edificio en área industrial .....	47
Figura 3.8: Ejemplo de sistema de $PaT$ de un centro de transformación en el interior de un edificio residencial .....	48
Figura 3.9: Ejemplo de sistema de $PaT$ de una subestación tipo intemperie de pequeño tamaño .....	49
Figura 3.10: Malla de la S.E. Balaidos parcialmente afectada por oxidación .....	56
Figura 3.11: Electrodo de $PaT$ típico en apoyo de línea eléctrica aérea mostrando en color negro las partes recubiertas .....	57

Figura 3.12: Curvas de nivel que representan la elevación del potencial del suelo ( <i>GPR</i> ) sobre la varilla .....	59
Figura 3.13: Paneles superiores: varilla horizontal ideal. Paneles inferiores: varilla horizontal resistiva y recubierta de óxido. ....	60
Figura 3.14: Curvas de nivel que representan la elevación del potencial del suelo ( <i>GPR</i> ) sobre el sistema de <i>PaT</i> del apoyo .....	62
Figura 3.15: Paneles superiores: Sistema de <i>PaT</i> del apoyo considerando los electrodos ideales. Paneles inferiores: Sistema de <i>PaT</i> del apoyo considerando los electrodos con resistencia interna y recubiertos de material de baja resistividad.....	63
Figura 3.16: Curvas de nivel del potencial en el suelo por encima del electrodo de <i>PaT</i> del centro de transformación situado en área industrial.....	65
Figura 3.17: Gráfico de superficie 3D del potencial en el suelo por encima del electrodo de <i>PaT</i> del centro de transformación situado en área industrial .....	65
Figura 3.18: Curvas de nivel del potencial en el suelo por encima del electrodo de <i>PaT</i> del centro de transformación en edificio residencial .....	67
Figura 3.19: Gráfico de superficie 3D del potencial en el suelo por encima del electrodo de <i>PaT</i> del centro de transformación en edificio residencial.....	68
Figura 3.20: Diagrama de contorno que representa el <i>GPR</i> por encima de la malla de <i>PaT</i> de la subestación tipo intemperie .....	70
Figura 3.21: Paneles superiores: Malla ideal. Paneles inferiores: Malla con resistencia interna y parcialmente oxidada .....	71
Figura 3.22: Error relativo en el <i>GPR</i> y en el potencial de los nodos al considerar una malla ideal y una malla real.....	72
Figura 4.1: Ejemplo sintético 1: Resistencia de <i>PaT</i> simulada y calculada .....	77
Figura 4.2: Ejemplo sintético 2: Resistencia de <i>PaT</i> simulada y calculada .....	79
Figura 4.3: Detalle de la unión entre secciones de la varilla .....	80
Figura 4.4: Resistencia de <i>PaT</i> vs longitud enterrada de una varilla compuesta por tramos de 1,5 m de longitud (panel izquierdo) y 0,5 m de longitud (panel derecho) unidos por segmentos resistivos .....	82
Figura 4.5: Ejemplo suelo real Girona: Resistencia de <i>PaT</i> medida en campo y calculada mediante el método <i>RDR</i> .....	84

Figura 4.6: Ejemplo suelo real Castelldefels: Resistencia de  $PaT$  medida en campo y calculada mediante el método  $RDR$ ..... 85



# Lista de Tablas

Tabla 3.1: Resistencia de $PaT$ – Estimador vs Cálculo $CSM$ .....	44
Tabla 3.2: Resistividad eléctrica a 20°C (fuente IEEE Std 80TM-2013 [11]) .....	51
Tabla 3.3: Resistencia de $PaT$ – Electrodo de diferentes materiales con resistencia interna no despreciable .....	51
Tabla 3.4: Resistencia de $PaT$ – Varilla horizontal .....	61
Tabla 3.5: Resistencia de $PaT$ – Apoyo línea eléctrica aérea .....	64
Tabla 3.6: Resistencia de $PaT$ – Centro de transformación situado en área industrial .....	66
Tabla 3.7: Resistencia de $PaT$ – Centro de transformación en edificio residencial .....	69
Tabla 3.8: Resistencia de $PaT$ – Subestación tipo intemperie .....	73
Tabla 4.1: Ejemplo sintético 1: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y la resistencia de $PaT$ correspondiente $R$ ( $\Omega$ ) .....	76
Tabla 4.2: Ejemplo sintético 2 con medidas cada 1,5m: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y la resistencia de $PaT$ correspondiente $R$ ( $\Omega$ ).....	78
Tabla 4.3: Ejemplo sintético 2 con medidas cada 0,5m: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y la resistencia de $PaT$ correspondiente $R$ ( $\Omega$ ).....	79
Tabla 4.4: Ejemplo sintético con resistencia interna no nula y medidas cada 1,5 m: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y el valor de la resistencia de $PaT$ asociada $R$ ( $\Omega$ ).....	81
Tabla 4.5: Ejemplo sintético con resistencia interna no nula y medidas cada 0,5 m: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y el valor de la resistencia de $PaT$ asociada $R$ ( $\Omega$ ).....	82
Tabla 4.6: Ejemplo suelo real Girona: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y la resistencia de $PaT$ asociada $R$ ( $\Omega$ ) .....	84
Tabla 4.7: Ejemplo suelo real Castelldefels: Longitud de varilla enterrada $L$ (m) y la resistencia de $PaT$ asociada $R$ ( $\Omega$ ).....	85
Tabla 4.8: Perfil de resistividad aparente frente a la separación de los electrodos Wenner $a$ (m) en el suelo localizado en Castelldefels .....	86



## Abreviaturas y acrónimos

BEM	Método de los elementos de contorno, en sus siglas en inglés “Boundary Elements Method”
CBM	Modelo basado en circuitos, en sus siglas en inglés “Circuit-Base Model”
CEER	Radio equivalente de electrodo recubierto, en sus siglas en inglés “Coated Electrode Equivalent Radius”
CSM	Método de simulación de cargas, en sus siglas en inglés “Charge Simulation Method”
DR	Método de la varilla hincada, en sus siglas en inglés “Driven-Rod”
ECM	Método de Corrientes de Foucault, en sus siglas en inglés Eddy-Current Method”
ERT	Tomografía de resistividad eléctrica, en sus siglas en inglés “Electrical Resistivity Tomography”
ESCD	Distribución equivalente de carga superficial, en sus siglas en inglés “Equivalent Surface Charge Distribution”
FEM	Método de elementos finitos, en sus siglas en inglés “Finite Elements Method”
GPR	Elevación del potencial de la superficie del terreno, en sus siglas en inglés “Ground Potential Rise”
MoM	Método de los momentos, en sus siglas en inglés “Method of Moments”
NRL	Registro de resistividad normal, en sus siglas en inglés "Normal Resistivity Logging"
PEC	Conductores eléctricos perfectos, en sus siglas en inglés Perfect Electrical Conductor”
PaT	Puesta a Tierra
RDR	Método de la varilla hincada resistiva, en sus siglas en inglés “Resistive Driven-Rod”

UFD	UFD Distribución Electricidad S.A.
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
VES	Sondeo eléctrico vertical, en sus siglas en inglés “Vertical Electrical Sounding”

# 1. Introducción

Los sistemas de Puesta a Tierra (*PaT*) son esenciales para garantizar la seguridad, protección y funcionamiento eficaz de las instalaciones eléctricas, contribuyendo a la prevención de accidentes y daños materiales. Entre las principales razones que justifican su importancia podemos destacar:

1. **Seguridad de las personas y animales:** Al conectar los equipos eléctricos a tierra, se garantiza que cualquier corriente no deseada, como una fuga, provocada por un defecto de aislamiento, se dirija de manera segura a tierra. Esto previene contactos eléctricos que podrían causar lesiones graves o incluso la muerte a personas y animales que entren en contacto con los equipos.
2. **Protección de los equipos:** La *PaT* protege a los equipos eléctricos y electrónicos de daños causados por sobretensiones, como las que pueden ocurrir debido a rayos o fallos en los sistemas eléctricos. Al proporcionar un camino de baja resistencia para la corriente excesiva, se evita que los equipos se dañen.
3. **Estabilidad del sistema eléctrico:** La red de *PaT* proporciona una referencia de potencial constante para el sistema eléctrico. Esto es esencial para mantener la estabilidad y el equilibrio del sistema, permitiendo un funcionamiento eficiente y fiable.
4. **Prevención de incendios:** La correcta *PaT* reduce el riesgo de incendios por causas eléctricas, ya que las corrientes de falta son desviadas al suelo en lugar de incidir en los equipos o cables, lo que podría generar calor excesivo y provocar incendios.
5. **Cumplimiento normativo:** Las regulaciones y estándares de seguridad eléctrica en la mayoría de los países requieren la instalación de sistemas de *PaT* adecuados. Cumplir con estas normas no solo es una cuestión de seguridad, sino también de legalidad, evitando sanciones y responsabilidades legales.
6. **Funcionamiento de dispositivos de protección:** Los sistemas de protección, como los interruptores diferenciales, dependen de una buena *PaT* para detectar corrientes de fuga y desconectar el suministro eléctrico

rápidamente en caso de una falta. Esto contribuye a la protección tanto de las personas como de los equipos o bienes.

Las normas y recomendaciones, tanto nacionales como internacionales, establecen diversos criterios para garantizar la seguridad de las personas y especifican los materiales adecuados para la construcción de las redes de *PaT*. Generalmente, estas normas indican los valores máximos tolerables de las tensiones de paso y contacto, así como la evaluación de los potenciales transferidos dentro de una subestación o entre ésta y su entorno.

La red de *PaT* debe soportar corrientes de cortocircuito durante el intervalo de tiempo entre la aparición de la falta y la intervención de los dispositivos de protección e interruptores, sin perder sus propiedades mecánicas ni eléctricas. Además, debe ser capaz de derivar las corrientes inyectadas a tierra, ya sea de descargas atmosféricas o de la acción de pararrayos que actúan frente a sobretensiones, sin generar diferencias de potencial significativas que puedan causar el deterioro prematuro de los equipos cruciales en subestaciones, plantas industriales, edificaciones o líneas de transmisión de energía eléctrica.

Actualmente, la red de *PaT* desempeña un papel crucial en la protección de los sistemas de comunicación y control. Computadoras, robots industriales y otros equipos electrónicos requieren condiciones específicas de *PaT* para funcionar correctamente. Las redes de comunicación telefónica convencional dependen en gran medida de su sistema de *PaT*, *y en el diseño de este sistema se deben considerar los aspectos técnicos necesarios* para reducir las interferencias en estas redes y protegerlas entre las fuerzas electromotrices inducidas.

Modelar el comportamiento de un sistema de *PaT*, tanto en régimen permanente como transitorio, es un desafío complejo debido a los numerosos factores que influyen en su análisis. El planteamiento analítico del problema se formuló ya de forma incipiente en 1945 por Rüdember [1] y posteriormente en 1968, de modo mucho más completo, por Sunde [2], entre otros. No obstante, la complejidad de las soluciones y de los métodos matemáticos involucrados, unida a la carencia de ordenadores, hacía difícil el uso de los tratamientos analíticos a los diseñadores de sistemas de *PaT*. Por esta razón algunos investigadores intentaron simplificar el problema mediante la búsqueda de relaciones sencillas entre las diversas variables. Para este fin se utilizaron métodos empíricos que no siempre proporcionaban los resultados esperados,

principalmente debido a la estructura eléctrica del suelo, considerado homogéneo en la mayoría de los métodos empleados.

Durante la década de los setenta, el rápido avance de la informática y el perfeccionamiento y reducción de precio de los ordenadores hizo viable la utilización de métodos numéricos en el análisis de los sistemas de *PaT*. En esta época, se plantean las ecuaciones de campo eléctrico, se aplica el método de las imágenes desarrollado por Maxwell y se utilizan los métodos de cálculo matricial para resolver el problema del comportamiento eléctrico en régimen permanente de una red de tierra inmersa en un terreno complejo, generalmente modelizado en dos capas, consiguiéndose una reducción sustancial de los errores cometidos con los anteriores métodos empíricos. En la literatura científica se pueden encontrar algunas publicaciones al respecto, cuales destacan [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Desde la década de los ochenta hasta hoy en día, se han realizado numerosas aportaciones que permiten disponer actualmente de herramientas potentes para el análisis de los sistemas de *PaT* en terrenos estratificados horizontalmente en múltiples capas, aunque para muchas de las aplicaciones y situaciones de interés práctico, un modelo bicapa suele ser suficiente.

El valor teórico de la resistencia de *PaT* de un electrodo se determina aplicando un proceso de cálculo bien conocido, para el que es preciso conocer la geometría de los conductores que componen el electrodo, su ubicación en el suelo, la profundidad de enterramiento, la orientación y el modelo del suelo conductor. El electrodo debe estar compuesto por conductores en forma de hilos delgados, los cuales deben ser segmentados en el proceso de cálculo para construir la matriz de impedancias de la cual, mediante un procedimiento de inversión, se obtiene la distribución de corrientes de fuga al suelo por todos los segmentos en los que se ha dividido el electrodo [11] [12] [13] [14]. El cálculo es posible imponiendo que el electrodo sea equipotencial si el conductor se considera perfecto, o la distribución de potenciales según el punto de entrada de la corriente total a ser filtrada al suelo en el caso de conductores reales con resistividad interna no nula [15]. A medida que el electrodo crece en tamaño, la matriz de impedancias se hace cada vez más grande con el consiguiente aumento del tiempo computacional para llevar a cabo la inversión de la matriz. Una segmentación más gruesa puede ayudar a acelerar el cálculo, pero en electrodos muy grandes esto puede llevar a obtener valores teóricos de resistencia que podrían estar lejos del valor real, aunque siempre por encima de él [16].

A pesar de lo indicado con anterioridad, durante mucho tiempo algunos autores han trabajado en encontrar expresiones de cálculo para la resistencia de  $PaT$  de un electrodo, sin tener que llevar a cabo el cálculo directo basado en la determinación del potencial adquirido por el propio electrodo aplicando técnicas numéricas. Muchos de estos trabajos se centran en la consideración de rejillas o mallas de  $PaT$  para subestaciones. Algunos utilizan propiedades de estos electrodos, como la dualidad entre resistencia y capacitancia. Otros, en cambio, abordan el cálculo de la resistencia  $PaT$  basándose en las superficies equipotenciales del suelo conductor alrededor del electrodo, que se evalúan utilizando el Método de Elementos Finitos, conocido en la literatura inglesa como “Finite Element Method” ( $FEM$ ). Otro grupo de trabajos basa sus estimadores en expresiones empíricas para estructuras simples que, combinadas entre sí, construyen un electrodo complejo [17] [18] [19] [20].

Por otro lado, no es fácil encontrar investigaciones que relacionen la resistencia de  $PaT$  con las propiedades geométricas de los electrodos. En el campo de la geofísica, principalmente dentro del estudio relacionado con configuraciones de electrodos en tomografía de resistividad eléctrica ( $ERT$ ), se pueden encontrar algunos trabajos en los que se intenta establecer una relación entre configuraciones geométricas de electrodos y la resistencia eléctrica para mejorar las mediciones geoelectricas del suelo [21].

Para mejorar las técnicas de cálculo existentes, en esta tesis, se propone una expresión para estimar la resistencia de  $PaT$  de un electrodo enterrado en un suelo homogéneo, basada en un hecho conocido, aunque escasamente citado en la literatura científica. Un electrodo de longitud total,  $L$ , presenta una resistencia de  $PaT$  que es menor cuanto más estirado está, es decir, cuanto más alejadas están algunas partes del electrodo de otras partes del propio electrodo. La resistencia mínima se logra solo al estirar completamente el electrodo en línea recta. Esta propiedad no es más que una consecuencia de la interacción entre conductores, que hace que el potencial disminuya con la distancia entre ellos [22]. Un electrodo de longitud,  $L$ , doblado tiene una resistencia de  $PaT$  más alta que el mismo electrodo estirado en línea recta. Si se define el grado de estiramiento de un electrodo, aquí cuantificado por el llamado índice de estiramiento,  $i_s$ , del electrodo, de modo que sea independiente del tamaño del electrodo y de la segmentación utilizada para dividirlo, se podría establecer una relación entre la resistencia de  $PaT$ ,  $R$ , la longitud del electrodo,  $L$ , y el índice de estiramiento,  $i_s$ . Esta relación depende, en principio, de la

profundidad de enterramiento,  $h$ , del radio,  $r$ , de los conductores en forma de hilos delgados que componen el electrodo y de la resistividad homogénea del suelo,  $\rho$ . Sin embargo, se sabe que la dependencia de  $R$  con  $h$  y  $r$  se atenúa a medida que aumenta la longitud del conductor, por lo que la estimación de  $R$  propuesta aquí dará mejores resultados a medida que aumente la longitud total del electrodo,  $L$ .

La relación entre  $R$ ,  $L$  e  $i_s$ , se determina mediante la realización de experimentos numéricos considerando electrodos de varias longitudes dentro de un amplio rango. Para cada longitud se considerarán varios pliegues del electrodo, desde la configuración rectilínea con el índice de estiramiento más alto posible sin romper el electrodo en partes desconectadas, hasta un pliegue en forma de letra M, donde el índice de estiramiento es bajo debido a la proximidad de algunas partes del electrodo con otras del propio electrodo. Con los datos obtenidos de los experimentos numéricos, se obtendrá la relación deseada, cuya robustez será probada variando las condiciones de los experimentos que implican los parámetros  $h$  y  $r$ , comprobándose su escasa relevancia en el resultado final.

En la etapa de diseño de los sistemas de *PaT*, los cálculos se realizan teniendo en cuenta varias suposiciones simplificadoras. En primer lugar, se asume que los conductores que forman parte de los electrodos de *PaT* son conductores eléctricos perfectos (conocidos en la literatura inglesa como “Perfect Electrical Conductors” (*PEC*)), es decir, estos conductores no tienen resistencia interna. En segundo lugar, se supone que la superficie de estos conductores está en contacto íntimo con el suelo, de modo que se trata como la interfaz entre un medio conductor ideal, sin resistividad, y un medio conductor con un valor finito de resistividad. Suposiciones adicionales comunes son, por ejemplo, que el suelo es semi-infinito y eléctricamente homogéneo, que los conductores que forman parte del electrodo de *PaT* tienen un radio constante, o que la corriente de falta que se filtra al suelo es de baja frecuencia, denominada frecuencia industrial.

El trabajo que se presenta en esta tesis incorpora dos mejoras sustanciales con respecto a los modelos más populares para evaluar los parámetros eléctricos de los electrodos de *PaT*, a saber, la inclusión en el cálculo de la resistencia interna de los electrodos [23] y la consideración de su posible oxidación o recubrimiento [24] [25] [26]. Mientras que la primera no presenta dificultades especiales para ser tenida en cuenta en los modelos ya conocidos, la segunda

conlleva una formidable complicación en los cálculos a menos que algún procedimiento simple haga posible evaluar el efecto producido por el recubrimiento del electrodo.

Las modificaciones necesarias en un modelo inicial basado en el Método de Simulación de Cargas (*CSM*) se presentan en esta tesis. Estas modificaciones tienen en cuenta tanto la resistencia interna de los conductores como su posible afectación por la corrosión, considerándose ambos aspectos de forma conjunta [27]. La oxidación se modela como una capa de un material conductor con alta resistividad que cubre completamente parte de los conductores. Adicionalmente, el nuevo modelo también puede evaluar el efecto de recubrir los conductores con una capa de cualquier material conductor con resistividad arbitraria. Si los conductores se consideran como varillas cilíndricas, el efecto de la oxidación o recubrimiento de estos conductores se modela reemplazando su radio geométrico por el denominado Radio Equivalente de Electrodo Recubierto (*CEER*) [24]. Como resultado de esta sustitución, se obtiene un electrodo compuesto por conductores con diferentes valores de radio geométrico, según su nivel de oxidación o la naturaleza del recubrimiento.

Para tener en cuenta la resistencia interna de los conductores, un Modelo Basado en Circuitos (*CBM*) de todo el electrodo, compuesto por ramas y nodos, donde se consideran las caídas de potencial en las diferentes ramas debido a la resistencia óhmica, da lugar a una descripción completa del comportamiento del electrodo en términos de las corrientes que fluyen a través de las ramas y las que se filtran al suelo [15]. Según el modelo propuesto en este documento [23], la resistencia de *PaT* del electrodo se calcula como la relación entre el potencial del nodo en el que se inyecta la corriente y el valor de la corriente inyectada. Los potenciales de paso y contacto en la superficie del suelo también se evalúan, conociéndose las corrientes de fuga al terreno.

Aunque los dos elementos básicos del trabajo que se presenta, resistencia interna y corrosión superficial han sido previamente modelados por separado por el doctorando, la combinación de ambos en un solo modelo representa un nuevo modelo que es más amplio que los dos modelos anteriores. Aspectos como la mezcla de diferentes radios de conductores en la estructura debido al recubrimiento del electrodo y la combinación de partes de conductores limpios con otras recubiertas, todas ellas embebidas en suelos multicapa, representan una clara extensión de las consideraciones contempladas por los modelos anteriores.

Para terminar esta introducción se indica que la estimación de la resistividad del suelo en función de la profundidad es un factor clave para modelar cualquier sistema de *PaT* [28] [29] [30]. Existen varios métodos para determinar la resistividad del suelo. La mayoría de ellos son métodos indirectos que utilizan una magnitud intermedia como la resistividad aparente. En uno de los métodos más utilizados, la resistividad se estima a partir de un Sondeo Eléctrico Vertical (*VES*) realizado con un dispositivo de cuatro pequeñas picas como en las configuraciones de Wenner y Schlumberger, a partir de las cuales se obtiene la resistividad aparente [31]. A partir de la resistividad aparente, es posible determinar el perfil de resistividad del suelo, siempre y cuando se haya adoptado un modelo multicapa constante [32]. Aunque el *VES* es un método no invasivo, pequeños errores en las mediciones podrían llevar a un modelo del suelo que esté lejos de ser el real. La naturaleza mal condicionada del método, para obtener el perfil de resistividad a partir de la resistividad aparente del suelo, es el fondo del problema [33]. Por otro lado, en cierto sentido, un *VES* podría verse como una prueba no local, ya que se está verificando la conductividad del suelo entre los electrodos activos de la configuración de electrodos. Nótese, por ejemplo, que en la configuración de Wenner los electrodos activos están separados tres veces la distancia entre electrodos adyacentes. Las propiedades del suelo podrían cambiar horizontalmente, llevando a un perfil de resistividad del suelo que no coincidiría con el real. Esto es especialmente importante cuando en un sistema de *PaT* se utilizan varillas verticales como electrodos de *PaT*, como ocurre en el caso de los electrodos de protección contra rayos.

Otro método indirecto que se usa a veces es el método de la varilla hincada o “Driven-Rod” (*DR*). El método *DR* es un método invasivo al igual que otros métodos como el “Normal Resistivity Logging” (*NRL*) en los cuales se lleva a cabo una manipulación del terreno en forma de pozo u orificio vertical, que sirve para sondear la estructura del terreno. En el método *DR* la resistencia de *PaT* de una varilla hincada en el suelo se mide mediante el procedimiento de la caída de potencial [34]. En la presente tesis se modifica el método *DR* incluyendo la resistencia interna de la varilla hincada. Este nuevo método se denomina método de la varilla hincada resistiva o “Resistive Driven-Rod” (*RDR*) [23]. Los objetivos principales de este nuevo método *RDR* son, en primer lugar, establecer un procedimiento sistemático para incluir la resistencia interna de la varilla hincada, y, en segundo lugar, probar la viabilidad del método *RDR*

para determinar los parámetros de un modelo de suelo multicapa a partir de mediciones de resistencia de *PaT* de la varilla hincada, señalando sus limitaciones.

De todo lo avanzado en esta introducción se desprende que este trabajo se va a centrar en dos aspectos del cálculo de la resistencia de *PaT* de electrodos que constituyen un acercamiento a su valor real, para después presentar una aplicación directa a la determinación de la estructura eléctrica del suelo. Por un lado, se presenta un método rápido para evaluar la resistencia de grandes electrodos mediante un procedimiento estadístico aproximado sin necesidad de resolver las ecuaciones de campo. Por otro lado, se incorpora al esquema general de cálculo de la resistencia de *PaT*, la resistencia interna de los conductores que conforman el electrodo de *PaT* y la posible oxidación de la superficie de estos conductores. Ambos factores, no contemplados en los cálculos habituales, pueden alterar sustancialmente el valor de la resistencia de *PaT*, así como también otros parámetros de interés como son los potenciales de paso y contacto. Con un marco legal por medio, la sustitución de materiales con buenas propiedades conductoras, esto es, con resistencia interna casi despreciable, por otros más baratos, pero de mayor resistencia y más fácilmente oxidables, resulta una cuestión principal. Por último, la incorporación de estas mejoras incide directamente en las mediciones efectuadas con el método de la varilla hincada para la determinación de la estructura eléctrica del suelo, por lo que es necesario efectuar las oportunas correcciones para poder obtener los valores adecuados de los parámetros de un modelo del terreno con diferentes capas.

Tras el desarrollo expuesto en esta introducción, a continuación, se indican de forma concisa los **objetivos** planteados en esta tesis doctoral.

- **Optimizar los diseños de los sistemas de *PaT*** en las instalaciones eléctricas de alta tensión.
- **Estimar la resistencia de *PaT*** de grandes electrodos **mediante métodos no convencionales.**
- Analizar la **influencia de la resistencia interna o propia de los electrodos** en el diseño de los sistemas de *PaT*.
- Incluir el **efecto de la oxidación de los electrodos** en el cálculo de la resistencia de *PaT*.

- **Mejorar el método Driven-Rod para la modelización** de los parámetros eléctricos **del suelo**.

Para la consecución de los objetivos descritos anteriormente, esta tesis se ha estructurado en los siguientes capítulos:

- El *Capítulo 1 “Introducción”* presenta una introducción a los aspectos principales abordados por esta tesis tratándose en detalle el estado del arte y las líneas a seguir para el diseño avanzado de los sistemas de *PaT*. También se presentan los objetivos de la tesis y la estructura de la misma.
- El *Capítulo 2 “Fundamentos matemáticos y modelización”* desarrolla los fundamentos matemáticos empleados en el diseño de los sistemas de *PaT*, así como los nuevos modelos aportados por la presente tesis a la comunidad científica.
- El *Capítulo 3 “Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra”* desarrolla las tres principales contribuciones de la presente tesis al cálculo de la resistencia de *PaT*, introduciendo la resistencia interna de los electrodos, el estado de oxidación de los mismos y presentando un estimador para la determinación de la resistencia de *PaT* en electrodos de gran tamaño.
- El *Capítulo 4 “Determinación de la estructura eléctrica del suelo - Método Resistive Driven-Rod”* introduce el efecto de la resistencia interna de los electrodos al método “Driven-Rod” (*DR*) y la aplicación del nuevo método “Resistive Driven-Rod” (*RDR*) a casos reales.
- El *Capítulo 5 “Conclusiones”* presenta las conclusiones de esta tesis.
- Finalmente, en el *Anexo: Contribuciones derivadas de la tesis* se indican las contribuciones en forma de artículos científicos y presentaciones en congresos derivados de esta tesis.



## 2. Fundamentos matemáticos y modelización

Como ya se avanzó en el *Capítulo 1 “Introducción”* esta tesis aborda dos aspectos del cálculo de la resistencia de *PaT* que no han sido considerados de modo sistemático hasta ahora: “Resistencia interna de los electrodos” y “Oxidación y/o recubrimiento superficial de los electrodos”.

En el presente capítulo, los fundamentos matemáticos y los modelos para efectuar los cálculos son presentados y descritos con detalle. Al tratarse de dos cuestiones de diferente naturaleza y que afectan a situaciones distintas, es necesario abordarlas en secciones diferenciadas. Sin embargo, hay un marco teórico común a ambos aspectos y es el esquema de cálculo de la resistencia de *PaT* de un electrodo enterrado en un terreno homogéneo semi-infinito. Se considera que es necesario describir el fundamento de tal esquema pues está en la base de las modificaciones y mejoras que se proponen en esta tesis. La siguiente sección *2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (PaT) en terrenos homogéneos”*, con información obtenida de la referencia [35] de la cual es firmante el autor de esta tesis, recoge lo esencial del procedimiento de cálculo.

En las siguientes secciones *2.2 “Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) de electrodos de gran tamaño”*, *2.3 “Modelo de electrodo con resistencia interna”* y *2.4 “Modelo con oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos”*, se introduce la motivación de parte de las aportaciones de esta tesis y se describen las bases físicas y de cálculo implementadas con estas aportaciones en el esquema general de los sistemas de *PaT*.

Por último, en la sección *2.5 Modelo para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo mediante la técnica Resistive Driven-Rod (RDR)*“ se introduce la aportación de esta tesis relacionada con la implementación del método de la varilla hincada resistiva o “Resistive Driven-Rod” (*RDR*), propuesto como alternativa a los métodos no invasivos de Wenner o Schlumberger para determinar las propiedades eléctricas del suelo.

## 2.1. Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (PaT) en terrenos homogéneos

El problema para determinar la resistencia de *PaT*, el perfil de potencial en el terreno, las tensiones de paso, las tensiones de contacto, creadas por un sistema de conductores en interacción mutua, se resuelve hallando la solución de la ecuación de Laplace que satisface un conjunto de condiciones frontera que definen de manera unívoca la configuración de los conductores y su estado eléctrico.

Suponiendo que tenemos  $P$  conductores  $C_i$ , con  $i=1\dots P$ , en un suelo semi-infinito de conductividad  $\sigma$ , de los cuales  $Q$  están interconectados y disipan juntos una corriente eléctrica,  $I$ , las ecuaciones que deben resolverse son

$$\begin{aligned}\vec{\nabla}^2\phi &= 0 \\ \phi(\vec{r})|_i &= V_i \\ \vec{n} \cdot \vec{\nabla}\phi|_G &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

donde  $\phi(\vec{r})|_i$  es el valor del potencial en el conductor  $C_i$  y la última ecuación tiene en cuenta el medio semi-infinito que comienza desde la frontera  $G$ . Debido a que los conductores  $Q$  están interconectados, sus potenciales deben ser iguales. Además, si  $I_i$  con  $i=1\dots P$ , es la corriente eléctrica liberada por el conductor  $C_i$ , la interconexión de los  $Q$  conductores implica que el potencial de esos conductores es igual y la intensidad disipada en conjunto  $I_C$  es  $I_C = \sum_{j=l+1}^{l+Q} I_j$ , siendo  $l$  el número de conductores libres, esto es, no interconectados.

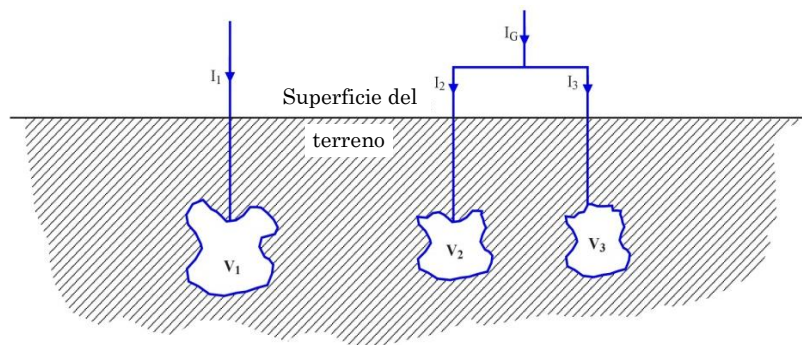


Figura 2.1: Configuración general de electrodos en interacción. En este caso,  $V_2$  es igual a  $V_3$  debido a la conexión eléctrica.

Utilizando la segunda identidad de Green, podemos dar una solución formal de (1) para cada punto del dominio, excluyendo los bordes, que en nuestro problema particular son las superficies de los conductores y también la superficie del suelo, suponiendo que esta última sea horizontal y perfectamente plana.

$$\phi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^P \iint_{S_i} -\rho \frac{\partial \phi(\vec{r}_i')}{\partial n} G(\vec{r}, \vec{r}_i') dS(\vec{r}_i') \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica del suelo, y el símbolo  $\partial/\partial n$  representa la proyección del gradiente a lo largo del vector unitario normal  $\vec{n}$  a la superficie  $S$ , es decir,  $\partial/\partial n = \vec{n} \cdot \vec{\nabla}$ . El integrando  $-\frac{\partial \phi(\vec{r}_i')}{\partial n}$  puede asociarse a una densidad superficial de corriente liberada al suelo (corriente de fuga) a través de la superficie del conductor. Por otro lado, el símbolo  $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|}$  representa la función de Green del Laplaciano. La ecuación (2) es una ecuación integral para el potencial  $\phi(\vec{r})$  cuya solución no es más fácil de resolver que (1) a menos que sea posible hacer algunas simplificaciones sustanciales. Este es el caso que ocurre cuando los electrodos son alambres delgados. Bajo estas condiciones, la ecuación (2) se reduce a una suma de contribuciones de filamentos que liberan corriente al suelo y están ubicados en el eje de los electrodos, simplificación conocida como Método de Simulación de Cargas (CSM)

$$\phi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^P \int_{L_i} \rho \lambda(\vec{r}_i') G(\vec{r}, \vec{r}_i') dl(\vec{r}_i') \quad (3)$$

donde  $\lambda(\vec{r}_i')$  representa la densidad de corriente eléctrica liberada al suelo a lo largo del eje del filamento  $L_i$ , que reemplaza al conductor completo  $C_i$ .

La ecuación (3) es válida tanto para puntos dentro del dominio como para puntos en el borde, en particular en la superficie de los conductores, siempre que se conozca la distribución de densidades de corriente liberadas al suelo  $\lambda(\vec{r}_i')$ .

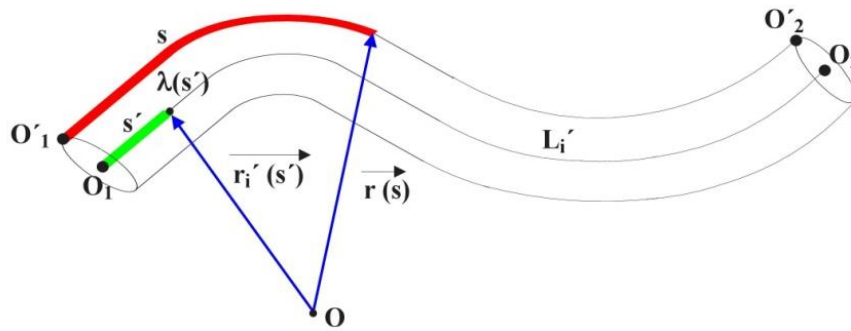


Figura 2.2: Alambre delgado y conductor curvado donde se muestran algunas de las variables utilizadas.

Aprovechando el modelo del alambre delgado, se utilizarán las coordenadas  $s$  y  $s'$  como se muestra en la [Figura 2.2](#). Por lo tanto, los vectores de posición de los puntos que definen el eje y la superficie de los conductores son funciones de las coordenadas  $s$  y  $s'$  respectivamente. Para cada punto en la superficie del conductor delgado  $L_i$ , el potencial es

$$\phi(s_i) = \sum_{j=1}^P \int_{L_{ji}} \rho \lambda(s'_j) G(s_i, s'_j) ds'_j \quad (4)$$

que tiene un valor constante  $V_i$  para cualquier punto,  $s_i$  en la superficie del conductor  $C_i$ .

La resolución analítica de (1), (2), (3) o (4) solo es posible en muy pocos casos, dependiendo fundamentalmente de la *geometría* de los conductores. En situaciones prácticas, casi siempre es necesario utilizar un esquema numérico para el cálculo de la solución. Un método numérico ampliamente utilizado es el Método de los Momentos (*MoM*) o también conocido como método de Galerkin, que se describe brevemente a continuación.

El *MoM* es un procedimiento numérico que permite obtener una solución a la ecuación (4) al reducir la ecuación integral a una ecuación matricial [36] [37]. Para ello, el alambre curvo de longitud  $L$  se divide en  $M$  segmentos rectilíneos de tamaño pequeño  $\Delta s' = L/M$ . Se elige un conjunto seleccionado de funciones conocidas para construir una aproximación lineal a la función desconocida  $\lambda(s')$ ,

$$\lambda(s') = \sum_{n=1}^M \lambda_n \cdot u_n(s') \quad (5)$$

como ejemplo, la función escalón de Heaviside puede elegirse como  $u_n(s')$ ,

$$\begin{aligned} u_n(s') &= 1 \dots \text{si} \dots (n-1)\Delta s' < s' < n\Delta s' \\ u_n(s) &= 0 \dots \text{cualquier otro caso} \end{aligned} \quad (6)$$

Nótese que esta es una aproximación escalonada a la función  $\lambda(s')$  que representa la distribución de corriente de fuga a lo largo del eje del alambre.

La elección de estas funciones  $u_n$  se realiza por simplicidad, pero no son las únicas posibles ni las que proporcionan los mejores resultados numéricos. Las funciones (6) suelen elegirse debido a su fácil manejo, a pesar del riesgo de perder algo de precisión en los resultados finales.

$$\phi(s_i) = \sum_{j=1}^P \sum_{n_j=1}^{M_j} \lambda_{n_j} \int_{\Delta s'(n_j)} \rho G(s_i, s'_j) ds'_j \quad (7)$$

Para completar el esquema numérico, es necesario discretizar  $\phi(s_i)$  a lo largo de la superficie del conductor. Esto se puede hacer utilizando funciones Delta de Dirac como funciones de ponderación, utilizando puntos de muestreo en la superficie del conductor que se denotan como,  $s_i = m_i \Delta s$ , lo que lleva al esquema conocido como "puntos coincidentes" o "matching points".

$$\phi(m_i) = \int_{L_i} \phi(s_i) \delta(s_i - m_i \Delta s) ds_i = \sum_{j=1}^P \sum_{n_j=1}^{M_j} \lambda_{n_j} \int_{\Delta s'(n_j)} \rho G(m_i, s'_j) ds'_j \quad (8)$$

lo que da lugar a un sistema de  $\sum_{j=1}^P N_j$  ecuaciones con  $\sum_{j=1}^P N_j$  incógnitas, que son las  $\lambda_{n_j}$  corrientes asociadas con cada segmento de cada conductor delgado en todo el sistema. Para comprender mejor el significado de la expresión (8), supóngase que tenemos un solo conductor dividido en  $M$  segmentos. En este caso, el potencial generado por el segmento  $m_i$  sobre el segmento  $m_j$  puede expresarse como

$$\phi(m_i, m_j) = \lambda_{n_i} \int_{\Delta s'(n_j)} \rho G(m_i, s'_j) ds'_j = \frac{\rho I_{n_i}}{4\pi |\vec{r}_i - \vec{r}'_j|} \quad (9)$$

donde  $I_{n_i}$  es la corriente liberada al terreno por el segmento  $m_i$ .

Si en lugar de funciones de tipo Delta de Dirac utilizamos las mismas funciones (6) como funciones de ponderación, esto se conoce como el Método de Galerkin, obteniéndose

$$\phi(m_i) = \int_{L_i} \phi(s_i) u_n(s_i) ds_i = \sum_{j=1}^P \sum_{n_j=1}^{M_j} \lambda_{n_j} \int_{\Delta s(m_i)} \int_{\Delta s'(n_j)} \rho G(s_i, s'_j) ds_i ds'_j \quad (10)$$

Debemos recordar que tanto en (8) como en (10),  $\phi(m_i) = V_i$ , es el potencial en cualquier punto del conductor  $C_i$ . Además, estos potenciales  $V_i$ , no son datos iniciales del problema, aunque la corriente total liberada por cada electrodo aislado  $I_i$ , y la corriente total  $I_C = \sum_{j=l+1}^{l+Q} I_j$ , liberada por los electrodos interconectados sean conocidos inicialmente. Toda esta información debe introducirse en el sistema de ecuaciones que satisface la configuración de electrodos, y la solución se da en términos del potencial absoluto.

Es necesario realizar algunos cálculos finales para expresar el resultado en términos de cantidades de interés desde el punto de vista eléctrico. Esto incluye el cálculo de la resistencia de *PaT* y de los potenciales de paso y de contacto asociados con cada punto en el suelo y con cada electrodo pasivo (que no libera corriente al suelo). El potencial de paso, definido como la diferencia de potencial entre dos puntos en la superficie del terreno separados por una distancia de 1 metro, es aproximadamente igual al valor del campo eléctrico tangencial en la superficie del suelo. El potencial de contacto en un punto de la superficie terrestre es la diferencia entre el potencial común de los electrodos activos y el potencial absoluto de ese punto en la superficie del terreno (Figura 2.3). En cuanto a la resistencia de *PaT* de los electrodos activos, esto es, los que liberan corriente neta al terreno, puede ser calculada para cada electrodo como el cociente entre el potencial adquirido por este y la corriente que libera al terreno. Por lo dicho, es claro que la resistencia de *PaT* es un parámetro que depende del potencial del electrodo, el cual a su vez es función de la interacción con electrodos próximos tanto si son activos como si no. El problema, por tanto, ha de ser considerado globalmente como un sistema de

conductores en interacción mutua sujeto a condiciones de contorno y datos iniciales.

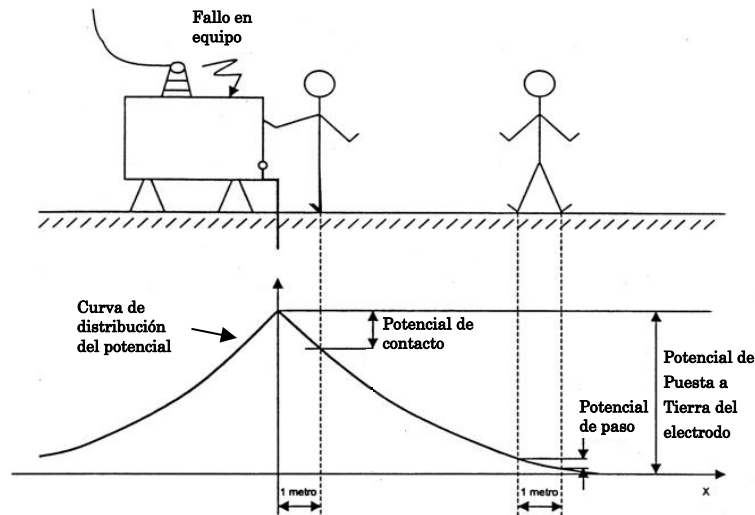


Figura 2.3: Ilustración de los conceptos de potenciales de paso y contacto

## 2.2. Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) de electrodos de gran tamaño

Considérese un electrodo de *PaT* constituido de varillas a las que puede aplicarse la aproximación de hilo delgado discutida en el apartado 2.1 “*Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (PaT) en terrenos homogéneos*”. Si la longitud total de las varillas es  $L$  y se trabaja con una segmentación de  $N$  piezas por unidad de longitud, se tiene un total de  $N \cdot L$  segmentos, lo que, en términos del tamaño de la matriz de impedancias del sistema, nos da una matriz cuadrada  $N \cdot L \times N \cdot L$  que debe ser invertida. Es bien sabido que, para obtener un valor aceptable de los parámetros del electrodo, se precisa una segmentación que permita una resolución suficiente del potencial creado en la superficie del terreno. Las simulaciones numéricas muestran que, para una gran mayoría de electrodos, un valor entre 5 y 15 segmentos por metro de conductor proporciona resultados admisibles. Para electrodos extensos con una longitud total de más de 1000 metros, supone tener que invertir matrices cuadradas de enorme tamaño con el consiguiente coste computacional. Se hace necesario disponer de algún procedimiento más rápido, aun perdiendo algo de precisión, que nos permita

evaluar, al menos, la resistencia de  $PaT$  del diseño de electrodos de gran tamaño.

En esta sección, se presenta una fórmula para calcular la resistencia de  $PaT$  de un electrodo enterrado en un suelo homogéneo o monocapa, basada en un hecho conocido, pero raramente mencionado en la literatura. Un electrodo con una longitud total,  $L$ , tiene una resistencia de  $PaT$  que disminuye cuanto más estirado esté, es decir, cuanto más separadas estén sus partes. La resistencia mínima se obtiene solo cuando el electrodo está completamente estirado en línea recta. Esta característica es una consecuencia de la interacción entre conductores, lo que hace que el potencial disminuya con la distancia entre ellos [38]. Un electrodo de longitud  $L$  doblado presenta una mayor resistencia de  $PaT$  que el mismo electrodo estirado en línea recta. Si se define el grado de estiramiento de un electrodo, aquí cuantificado mediante el llamado índice de estiramiento del electrodo,  $i_s$ , de manera que sea independiente del tamaño del electrodo y de la segmentación utilizada para dividirlo, se podría establecer una relación entre la resistencia de  $PaT$ ,  $R$ , la longitud del electrodo,  $L$ , y el índice de estiramiento,  $i_s$ . Esta relación depende, en principio, de la profundidad de enterramiento,  $h$ , del radio de los conductores delgados,  $r$ , que forman el electrodo y de la resistividad homogénea del suelo,  $\rho$ . No obstante, se sabe que la dependencia de  $R$  con  $h$  y  $r$  se reduce a medida que aumenta la longitud del conductor, por lo que la estimación de  $R$  propuesta aquí será más precisa cuanto mayor sea la longitud del electrodo  $L$ .

Para determinar la relación entre  $R$ ,  $L$  y  $i_s$ , se llevan a cabo experimentos numéricos considerando electrodos de diversas longitudes dentro de un amplio rango. Para cada longitud, se analizarán varias configuraciones del electrodo según la *Figura 2.4*, desde la configuración rectilínea con el mayor índice de estiramiento posible sin dividir el electrodo en partes separadas, hasta una configuración en forma de letra M, donde el índice de estiramiento es bajo debido a la proximidad de algunas partes del electrodo entre sí.

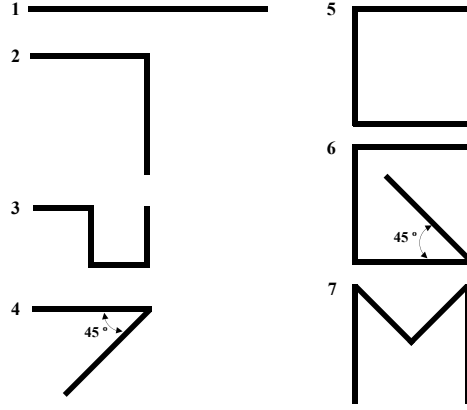


Figura 2.4: Configuraciones de electrodos consideradas para definir el estimador de resistencia de *PaT* de electrodos de gran tamaño

Con los datos obtenidos de los experimentos numéricos, se derivará la relación deseada, cuya solidez se evaluará variando las condiciones de los experimentos que involucran los parámetros  $h$  y  $r$ , verificando su baja relevancia en el resultado final.

Un electrodo de longitud,  $L$ , enterrado en un suelo conductor y sometido a una corriente,  $I$ , presenta una resistencia eléctrica que varía significativamente según su forma geométrica. Cuando el electrodo se estira, su resistencia disminuye. Esto se debe a que el potencial eléctrico entre los electrodos que interactúan disminuye cuando se alejan entre sí (y aumenta cuando se acercan). Para medir cuánto de compacto o estirado está el electrodo, se introduce el índice de estiramiento,  $i_s$ , definido por la siguiente fórmula:

$$i_s = \frac{\sum_{i,j \geq 1}^{N \cdot L} |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}{N^2 L^3} \quad (11)$$

donde  $N$  es el número de segmentos por metro de conductor,  $L$  es la longitud total del electrodo y  $|\vec{r}_i - \vec{r}_j|$  es la distancia entre el segmento  $i$  y el segmento  $j$ .

De la ecuación (11) se deduce que un electrodo estirado tendrá un índice  $i_s$  mayor que uno más compacto con la misma longitud y número de segmentos por metro. El carácter adimensional de la ecuación (11) asegura que  $i_s$  no varíe al considerar electrodos igualmente estirados, pero con diferentes  $L$  y  $N$ .

Para establecer una relación funcional entre la resistencia de *PaT*,  $R$ , la longitud total del electrodo  $L$  y el índice de estiramiento  $i_s$ , se llevan a cabo

experimentos numéricos con electrodos de longitudes  $L = 1$  m, 4 m, 7 m, 10 m y 20 m. Para cada longitud, se evaluarán diversas configuraciones geométricas con distintos niveles de plegado según la *Figura 2.4* para establecer numéricamente la relación [22]. En estos experimentos, se aplicará una corriente  $I=1$ A a los electrodos, que estarán enterrados en un suelo homogéneo con una resistividad,  $\rho$ . De este modo el valor del potencial del electrodo coincidirá con su resistencia de *PaT*. Los electrodos estarán hechos de hilos delgados de conductividad perfecta (resistencia interna nula) con un radio  $r = 6$  mm y se asumirán enterrados horizontalmente a una profundidad  $h = 0,5$  m. Para cada electrodo, con longitud y forma preestablecidas, la resistencia de *PaT* se calculará mediante el Método de los Elementos de Contorno (*BEM*) combinado con el Método de los Momentos (*MoM*), utilizando un código desarrollado por los autores de [22], inspirado en trabajos citados en el *Capítulo 1 "Introducción"*. De manera resumida, el cálculo teórico de la resistencia de *PaT* se realiza calculando el potencial adquirido por el electrodo con respecto al potencial del infinito, que se considera cero. En cuanto al cálculo numérico del potencial, el electrodo se divide en porciones más pequeñas que canalizan parte de la corriente total inyectada al suelo, de modo que juntas generan un potencial total uniforme en todas esas porciones del conductor. Este procedimiento lleva a un sistema lineal de ecuaciones del cual se obtienen las corrientes filtradas por todas las porciones y el potencial común de todas ellas, que es el potencial del propio electrodo. Para diferentes resistividades del suelo,  $R$  debe multiplicarse por el factor  $\rho$ , mientras que los resultados muestran que la dependencia de  $R$  con  $r$  y  $h$  disminuye a medida que  $L$  aumenta.

La expresión que resulta tras los experimentos numéricos con las configuraciones geométricas es

$$R = R_0 \rho L^\alpha i_s^\beta \quad (12)$$

con  $R_0 = 0,457 \pm 0,014$ ,  $\alpha = -0,731 \pm 0,038$  y  $\beta = -0,307 \pm 0,012$

La incertidumbre asociada a la estimación de  $R$  se puede cuantificar mediante

$$\sigma_R = R \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2} + (\log(L))^2 \cdot \sigma_\alpha^2 + (\log(i_s))^2 \cdot \sigma_\beta^2} \quad (13)$$

Siendo  $\sigma_{R_0} = 0,014$ ,  $\sigma_\alpha = 0,038$  y  $\sigma_\beta = 0,012$

Dado que estos valores de los parámetros han sido obtenidos a partir de una pequeña base de datos de electrodos simples, es claro que pueden ser mejor tabulados cuanto más extensa sea la base de datos.

El procedimiento para encontrar la estimación de  $R$  necesita de la determinación del índice,  $i_s$ , y de la longitud del electrodo,  $L$ . La expresión (12) nos da directamente el valor estimado de la resistencia y (13) la incertidumbre.

### 2.3. Modelo de electrodo con resistencia interna

El cálculo de la resistencia de  $PaT$  precisa del conocimiento de la resistividad eléctrica del suelo. Desde una perspectiva general, sería necesario resolver la ecuación  $\vec{\nabla} \cdot (\sigma(\vec{r})\vec{\nabla}\phi(\vec{r})) = 0$  junto con algunas condiciones de contorno, donde  $\phi(\vec{r})$  es el potencial absoluto en el punto  $\vec{r}$  y  $\sigma(\vec{r})$  representa la conductividad del suelo. Para un modelo multicapa, es posible encontrar soluciones semianalíticas aceptables para el potencial. Este modelo asume que la conductividad es simplemente una función constante por tramos y no continua. El suelo está compuesto por capas horizontales de extensión infinita y espesor específico, en las que la conductividad eléctrica toma un valor constante y diferente en cada capa. Así, la conductividad real se reemplaza por una función escalonada, aunque en la práctica, debido a la dificultad de los cálculos, solo se consideran unas pocas capas. Los perfiles de conductividad del suelo de interés para este trabajo comprenden capas con conductividades casi de cualquier valor, con espesores que van desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros. Aunque para aplicaciones en el diseño de sistemas de  $PaT$ , es común trabajar con modelos en los que la capa superior tiene unos pocos metros de espesor, en los cuales se coloca el electrodo de  $PaT$ .

La elección de una conductividad constante en cada capa permite calcular el potencial a partir de la ecuación para una conductividad genérica. La conexión entre las soluciones correspondientes a cada capa se realiza imponiendo la continuidad del potencial en las diferentes interfaces, así como la continuidad de la componente normal de la densidad de corriente a través de las interfaces.

Debido a la supuesta simetría cilíndrica del potencial, que está asociada a una conductividad dependiente solo de la profundidad con la coordenada  $z$ , el procedimiento para resolver la ecuación del potencial se basa en usar el método de separación de variables en un sistema de coordenadas cilíndricas. Así, el

potencial creado en la capa  $j$  por una fuente puntual de corriente eléctrica de intensidad  $I$  en la capa  $i$  se podría escribir como [32] y [39]

$$\phi_{ij} = \frac{\rho_i I}{4\pi|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \delta_{ij} + \int_0^\infty (f_{ij}(\lambda)e^{-\lambda(z_i - z_j)} + g_{ij}(\lambda)e^{\lambda(z_i - z_j)})J_0(\lambda r) d\lambda \quad (14)$$

donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker y las funciones desconocidas  $f_{ij}$  y  $g_{ij}$  deben ser calculadas imponiendo las condiciones de contorno a cada interfaz, es decir,  $\vec{\nabla}\phi_{i1} \cdot \vec{n}_z|_{z=0} = 0$ , ecuación que representa un flujo de corriente nulo a través de la superficie del suelo y

$$\begin{aligned} \phi_{ij}(\vec{r}_{j,j+1}) &= \phi_{i,j+1}(\vec{r}_{j,j+1}) \\ \sigma_j \cdot \vec{\nabla}\phi_{ij} \cdot \vec{n}|\vec{r}_{j,j+1} &= \sigma_{j+1} \cdot \vec{\nabla}\phi_{i,j+1} \cdot \vec{n}|\vec{r}_{j,j+1} \end{aligned} \quad (15)$$

ecuaciones que garantizan la continuidad del potencial y la conservación de la componente normal del flujo de corriente a través de las interfaces que separan las capas  $j$  y  $j+1$ . En (14) y (15),  $\rho_i$ , es la resistividad de la capa  $i$ ,  $r = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  y  $J_0$  es la función de Bessel de orden cero. En la expresión (14) aparecen las funciones  $f_{ij}(\lambda)$  y  $g_{ij}(\lambda)$  las cuales se calculan mediante las condiciones de contorno (15) en las interfaces del sistema. La determinación de las funciones  $f$  y  $g$  puede ser tarea difícil, así como lo es el cálculo de la integral en (14) debido al carácter oscilante de la función de Bessel  $J_0$  y a las singularidades que presentan las propias funciones  $f_{ij}(\lambda)$  y  $g_{ij}(\lambda)$  [40].

Para implementar correctamente las condiciones de contorno (15), es necesario convertir el primer término en el lado derecho de (14) a una forma integral, de modo que toda la expresión esté en forma integral. Las formas integrales de Lipschitz (16) permiten realizar dicha conversión [41].

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_p|} = \int_0^\infty e^{-\lambda|z - z_p|} J_0(r\lambda) d\lambda \quad (16)$$

Así, las condiciones de contorno (15) conducen a un sistema lineal en las incógnitas  $f_{ij}(\lambda)$  y  $g_{ij}(\lambda)$  que se resuelve mediante cálculo simbólico utilizando el software Wolfram Mathematica.

Los potenciales creados por las fuentes de corriente puntual (14) sirven como base para calcular la resistencia de  $PaT$  de cualquier electrodo,

particularmente de una varilla clavada en el suelo. Si es una varilla perfectamente conductora, el potencial se puede calcular utilizando la ley de superposición y se pueden obtener la resistencia de  $PaT$ , así como los potenciales de paso y de contacto. De hecho, la expresión (14) representa el potencial generado por una única fuente de corriente puntual. Cuando se considera un electrodo extenso que libera una corriente de falta al suelo, expresiones como (14) pueden usarse bajo algunas condiciones impuestas a los electrodos. Se supone que los electrodos están compuestos por piezas de alambre delgado ensambladas para formar el electrodo completo. Así, cada alambre delgado podría considerarse como una distribución de fuentes de corriente puntuales ubicadas en el eje. El potencial en el punto  $\vec{r}$  de la capa  $j$  generado por un alambre delgado de longitud  $L$  ubicado en la capa  $i$  está dado por

$$\begin{aligned} \phi_{ij}(\vec{r}) &= \int_L \frac{\rho_i \cdot \mu(\vec{r}_p)}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_p|} dl_p \cdot \delta_{ij} + \\ &+ \int_L \frac{\rho_i \cdot \mu(\vec{r}_p)}{4\pi} \left[ \int_0^\infty (f_{ij}(\lambda)e^{-\lambda(z-z_p)} + g_{ij}(\lambda)e^{\lambda(z-z_p)})J_0(\lambda r)d\lambda \right] dl_p \end{aligned} \quad (17)$$

donde  $\mu(\vec{r}_p)$  representa la densidad de las fuentes de corriente puntual a lo largo del eje del alambre delgado y las funciones  $f_{ij}(\lambda)$  y  $g_{ij}(\lambda)$  deben ser calculadas, como se ha mencionada antes, imponiendo las condiciones de contorno en cada interfaz. Una situación más general podría ocurrir cuando el alambre delgado se encuentra entre varias capas al mismo tiempo. En la práctica, el alambre delgado se segmenta en  $M$  piezas cortas de longitud  $\Delta l_m$ , cada una con una densidad de fuentes de corriente puntual constante  $\{\mu_m\}_{m=1 \dots M}$ , las cuales se utilizan para calcular el potencial del propio electrodo al imponer un valor constante a dicho potencial. Este potencial es el potencial del electrodo de  $PaT$  [42]. Así, el potencial en el punto  $\vec{r}$  de la capa  $j$  es

$$\begin{aligned} \phi(\vec{r}_j) &= \sum_{m=1}^M \frac{\rho_m \cdot \mu_m \cdot \Delta l_m}{4\pi|\vec{r}_j - \vec{r}_m|} \delta_{mj} + \\ &+ \sum_{m=1}^M \frac{\rho_m \cdot \mu_m \cdot \Delta l_m}{4\pi} \int_0^\infty (f_{mj}(\lambda)e^{-\lambda(z_j-z_m)} + g_{mj}(\lambda)e^{\lambda(z_j-z_m)})J_0(\lambda r)d\lambda \end{aligned} \quad (18)$$

Este procedimiento ya fue presentado en la sección 2.1 “*Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (PaT) en terrenos homogéneos*”. Se trata del Método de los Momentos (*MoM*), el cual conduce a un sistema de ecuaciones lineales cuyas incógnitas son las densidades constantes asociadas a fuentes de corriente puntuales  $\{\mu_m\}_{m=1\dots M}$  [36] [37]. El conocimiento de estas densidades permite calcular el potencial en cualquier punto del suelo por superposición.

Cuando el electrodo es un conductor con resistencia interna no nula, el cálculo del potencial adquirido por el electrodo es algo más complicado ya que deja de ser equipotencial. En este caso, el potencial del electrodo se mide comúnmente en el punto de inyección de corriente, que es el punto del electrodo donde entra la corriente de falta que se va a descargar al suelo. Por lo general, para electrodos con resistencia interna no despreciable, tanto el punto de inyección de corriente como el punto de medición son parámetros importantes, ya que el valor del potencial depende sensiblemente de la distribución interna de las corrientes de fuga al suelo.

Con respecto al modelo utilizado para tener en cuenta la resistencia interna de los electrodos, el utilizado aquí es el Modelo Basado en Circuitos (*CBM*) [15] [43]. Según este modelo, los electrodos se dividen en ramas y nodos a los que se aplica la teoría de circuitos. La *Figura 2.5* muestra en la parte superior una barra conductora que está dividida en  $N$  segmentos, teniendo cada segmento un potencial  $U_k$  y disipando una corriente de fuga al terreno  $I_k$ . En la parte inferior de la *Figura 2.5*, se muestra el Modelo Basado en Circuitos (*CBM*), en el que cada segmento se representa por una rama del circuito estando las ramas unidas por nodos. En cada nodo del circuito, se fija el potencial  $V_t$  y la fuente de corriente de fuga nodal  $J_t$ . También se muestran las corrientes internas  $i_k$  que se mueven dentro del conductor.

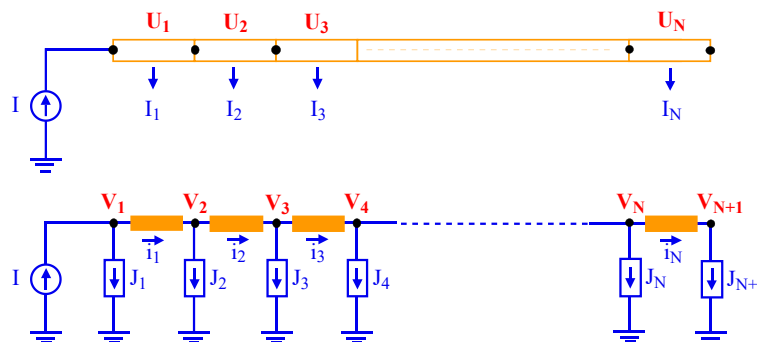


Figura 2.5: Modelo Basado en Circuitos (*CBM*) de una barra conductora

Cada rama satisface una ecuación general para la diferencia de potencial entre los extremos (nodos) que, para la rama genérica  $k$ , toma la forma

$$V_{k^+} - V_{k^-} = i_k \cdot Z_k + \sum_{r=1}^B i_r \cdot Z_{kr}^L \quad (19)$$

donde  $B$  es el número de ramas del sistema de electrodos que contiene  $N$  nodos,  $i_r$  es la corriente a través de la rama  $r$ ,  $Z_k$  es la resistencia interna de la rama  $k$  y  $Z_{kr}^L$  es la impedancia inductiva de la rama  $k$  debido a la rama  $r$  (llamada por algunos autores impedancia longitudinal), la cual puede ser despreciada para corrientes estacionarias o de baja frecuencia. La [Figura 2.6](#) muestra un diagrama de las magnitudes empleadas para una rama del circuito.

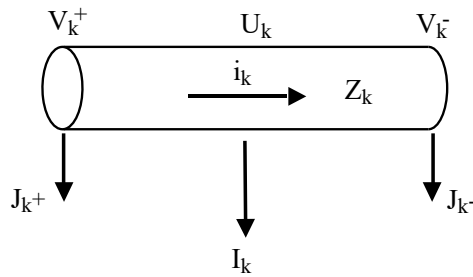


Figura 2.6: Esquema de las magnitudes utilizadas en la rama  $k$ .

Las corrientes de rama  $i_k$  y las corrientes de nodo  $J_n$  están ligadas por las leyes de Kirchhoff, es decir, para el nodo  $n$ , la suma algebraica de todas las corrientes que concurren en el nodo es cero,  $\sum_n i_k + J_n + F_n = 0$ , donde se han introducido las posibles fuentes de corriente o corrientes de inyección  $F_n$  en el nodo  $n$ . Esta expresión debe introducirse en (19) para que solo las corrientes y potenciales del nodo,  $J_n$  y  $V_n$  respectivamente, junto con las corrientes inyectadas  $F_n$  como datos iniciales, se consideren como las variables principales.

Para establecer la relación entre las corrientes en los nodos, es necesario un criterio de signos consistente. Se acordará considerar positivas las corrientes salientes de los nodos, ya sea hacia las ramas  $i_k$ , o hacia el suelo  $J_n$ , y las diferencias de potencial entre los nodos de cada rama se evaluarán desde el nodo por el cual la corriente sale hasta el nodo por el cual entra. Usando esta convención, se puede escribir:

$$J_k + \sum_{l=1}^N G_{lk} \cdot V_l = F_k \quad (k = 1 \dots N) \quad (20)$$

La matriz cuadrada  $G$  se construye a partir de la ley de Kirchhoff en cada nodo, la ley de Ohm en cada rama y las matrices de conexión rama-nodo, todo junto con el criterio coherente de signos para las corrientes.

Al mismo tiempo que se genera una diferencia de potencial debido a la circulación interna de las corrientes de rama en cada rama, también se genera un potencial absoluto (con respecto al potencial nulo del infinito) en cada rama debido a las corrientes de fuga hacia el suelo conductor circundante. Así, cada rama adquiere un potencial  $U_k$ , que depende de las corrientes filtradas al suelo por todas las demás ramas  $I_m$ , incluida la propia rama  $k$ . Así, se puede escribir:

$$U_k = \sum_{m=1}^B I_m \cdot Z_{km} \quad (21)$$

donde la impedancia  $Z_{km}$  (llamada impedancia transversal por algunos autores [44]) tiene por expresión,

$$Z_{km} = \frac{\rho_m}{4\pi} \int_{l_m} dl_m \left[ \frac{1}{|\vec{r}_k - \vec{r}_m|} \delta_{km} + \int_0^\infty (f_{km}(\lambda) e^{-\lambda(z_k - z_m)} + g_{km}(\lambda) e^{\lambda(z_k - z_m)}) J_0(\lambda r) d\lambda \right] \quad (22)$$

Las expresiones (21) y (22) son completamente equivalentes a (18) con  $I_m = \mu_m \cdot \Delta l_m$ . En (22),  $\rho_m$  es la resistividad del suelo alrededor de la rama  $m$  y, como ya ha sido mencionado antes, las funciones  $f(\lambda)$  y  $g(\lambda)$  se calculan mediante las condiciones de frontera en las interfaces [39].

A partir de las expresiones (20) y (21) se muestra que el potencial absoluto adquirido por la rama  $k$  como resultado de la corriente filtrada al suelo, se puede expresar en forma matricial como  $(U)_{B,1} = (Z_T)_{B,B} (I)_{B,1}$ , donde los subíndices indican la dimensión de las matrices ( $B$  denotará el número de ramas y  $N$  denotará el número de nodos) y la matriz cuadrada  $(Z_T)$  es la matriz de las impedancias transversales.

Para una aplicación correcta del análisis de circuitos, es necesario establecer una relación entre las corrientes de fuga y los potenciales en las ramas y nodos. En la *Figura 2.6* se muestran dos tipos de corrientes, la corriente de fuga de la rama  $I_k$  y las que van desde los nodos de la rama  $J_{k^+}$  y  $J_{k^-}$ , ambas hacia el medio circundante. Se convendrá que tanto las corrientes de los nodos como las de las ramas hacia el medio circundante están relacionadas por la ecuación matricial

$$(J)_{N,1} = (C)_{N,B} \cdot (I)_{B,1} \quad (23)$$

donde  $(C)$  es una matriz con  $N$  filas (nodos) y  $B$  columnas (ramas), cuyos elementos son

$$c_{ij} = \begin{cases} 1/2 & \text{si el nodo } i \text{ está conectado a la rama } j \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (24)$$

Esto significa que cada corriente de rama  $I_k$  se divide en dos mitades que resultan ser las corrientes de los nodos  $J_{k^+}$  y  $J_{k^-}$ .

Con respecto al potencial de rama  $U_k$  y a los potenciales en los nodos de la rama  $V_{k^+}$  y  $V_{k^-}$ , se cumplirá

$$(U)_{B,1} = (K)_{B,N} \cdot (V)_{N,1} \quad (25)$$

siendo  $(K)$  una matriz con  $B$  filas (ramas) y  $N$  columnas (nodos), cuyos elementos son,

$$k_{ij} = \begin{cases} 1/2 & \text{si la rama } i \text{ está conectada al nodo } j \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (26)$$

lo que en realidad significa que el potencial de rama es el promedio de los potenciales en los nodos  $U_k = \frac{V_{k^+} + V_{k^-}}{2}$ .

Con las ecuaciones (20), (21), (23) y (25) se propone el siguiente sistema de ecuaciones,

$$\begin{aligned}
(J)_{N,1} + (G)_{N,N} \cdot (V)_{N,1} &= (F)_{N,1} \\
(U)_{B,1} &= (Z)_{B,B} \cdot (I)_{B,1} \\
(J)_{N,1} &= (C)_{N,B} \cdot (I)_{B,1} \\
(U)_{B,1} &= (K)_{B,N} \cdot (V)_{N,1}
\end{aligned} \tag{27}$$

Si se define un vector con las incógnitas que consiste en las corrientes y los potenciales de nodo  $I_n$  y  $V_n$

$$(W)_{B+N,1} = \begin{pmatrix} (I)_{B,1} \\ (V)_{N,1} \end{pmatrix} \tag{28}$$

entonces, el sistema de ecuaciones (27) puede ser escrito de forma compacta como

$$\begin{pmatrix} (Z)_{B,B} & -(K)_{B,N} \\ (C)_{N,B} & (G)_{N,N} \end{pmatrix} \cdot (W)_{B+N,1} = \begin{pmatrix} (0)_{B,1} \\ (F)_{N,1} \end{pmatrix} \tag{29}$$

lo que nos permite encontrar la solución del problema en términos de potenciales y corrientes nodales.

El potencial del electrodo es el correspondiente al nodo por el cual entra la corriente al electrodo y la resistencia de  $PaT$  es el cociente entre este potencial y la corriente inyectada. Es importante destacar que ambos dependen de los parámetros del modelo multicapa elegido a través de  $\rho_m$  y de las funciones  $f(\lambda)$  y  $g(\lambda)$  en (22).

Para finalizar esta sección, se discutirán algunas consideraciones sobre el modelo presentado aquí. La resistencia interna de un electrodo de  $PaT$  juega un papel importante por varias razones. En primer lugar, como se mencionó anteriormente, el electrodo ya no es equipotencial, y la resistencia de  $PaT$  debe definirse como se indicó anteriormente. El punto de inyección de corriente es una elección importante y debe seleccionarse para que su potencial sea lo más bajo posible. En segundo lugar, los cálculos realizados con este modelo permiten validar o descartar materiales a utilizar en electrodos bajo la condición de verificar los requisitos técnicos sobre el valor de la resistencia de  $PaT$  y los potenciales de paso y contacto requeridos en una instalación. Téngase en cuenta que aumentar el tamaño de los electrodos puede ayudar a disminuir la resistencia de  $PaT$  siempre que la resistencia interna de los conductores no provoque un aumento final en la resistencia de  $PaT$ .

## 2.4. Modelo con oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos

Esta sección del *Capítulo 2 “Fundamentos matemáticos y modelización”* describe el modelo empleado para incorporar el estado de oxidación de un electrodo o bien el efecto de un recubrimiento de cualquier electrodo compuesto de hilos delgados. La información recogida aquí proviene de la referencia [24] en la cual ha participado el autor de esta tesis.

El modelo para estudiar el efecto de una capa de recubrimiento sobre las propiedades eléctricas de un conductor consiste en un conductor metálico cilíndrico de radio,  $r_c$ , rodeado por una capa cilíndrica de óxido o material conductor de espesor,  $e$ , y resistividad,  $\rho_{ox}$ . El electrodo está enterrado en un suelo semi-infinito y homogéneo de resistividad,  $\rho$ . El radio de la superficie exterior,  $r_l$ , es la interfaz material-suelo y  $e = r_l - r_c$  es el espesor.

Para modelizar el efecto de la capa de óxido, el radio de la interfaz,  $r_l$ , se fija en principio al radio inicial del electrodo metálico,  $r_c$ , mientras que este radio disminuye debido a la conversión del metal a óxido, dando cuenta del grado de oxidación. En cambio, para una capa de material de recubrimiento, es  $r_c$  el radio fijo mientras que  $r_l$  varía con el espesor del material recubridor.

El cálculo del potencial en cualquier punto del suelo se realiza utilizando el Método de los Elementos de Contorno (*BEM*). Para esto, se asume que la superficie del núcleo metálico del electrodo,  $S_c$ , contribuye al potencial con una distribución de puntos de corriente superficial de densidad,  $\lambda(\vec{r}_c)$ , mientras que según el modelo de Distribución Equivalente de Carga Superficial (*ESCD*) [45], la interfaz material-suelo,  $S_l$ , contribuye con una distribución de puntos de corriente superficial de densidad,  $\mu(\vec{r}_l)$ . De este modo, el potencial,  $\phi(\vec{r})$ , en el punto  $\vec{r}$  es

$$\phi(\vec{r}) = \iint_{S_c} \frac{\rho_{ox} \cdot \lambda(\vec{r}_c) dS_c}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_c|} + \iint_{S_l} \frac{k \cdot \mu(\vec{r}_l) dS_l}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_l|} + IMGS \quad (30)$$

donde  $\rho_{ox}$  es la resistividad del óxido del material y  $k$  un factor necesario para que  $\mu(\vec{r}_l)$  se pueda tratar como una densidad superficial de puntos de corriente. El término IMGS incluye todas las contribuciones de las imágenes relativas a la superficie del suelo. Para suelos semi-infinitos, solo contiene la contribución al

potencial de las distribuciones de puntos de corriente superficial de una imagen especular del electrodo recubierto con respecto a la superficie del suelo. Esto es consecuencia de la condición de contorno  $\vec{n} \cdot \vec{\nabla}\phi|_{S_S} = 0$  en la superficie del suelo, lo que significa que no hay flujo de corriente desde el suelo hacia el exterior. Para suelos multicapa, también incluye las contribuciones debido a las interfaces entre las diferentes capas del suelo [46]. Es importante destacar que la expresión (30) no es la que comúnmente utilizan otros autores, quienes asumen que la corriente inyectada al electrodo proviene de una distribución lineal de puntos de corriente en el eje del cilindro metálico. Esta simplificación funciona bien siempre y cuando la interfaz material-suelo tenga un radio mucho más grande que el radio del metal. De lo contrario, se debe utilizar la expresión (30).

En la *Figura 2.7* se pueden ver las variables utilizadas en la expresión (30). La expresión para el potencial necesita completarse con las condiciones de contorno en la interfaz material-suelo, es decir

$$\frac{1}{\rho_{ox}} \vec{\nabla}\phi_-(\vec{r}) \cdot \vec{n}|_{S_I} = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla}\phi_+(\vec{r}) \cdot \vec{n}|_{S_I} \quad (31)$$

donde  $\phi_{\pm}(\vec{r})|_{\vec{r} \in S_I}$  representa el potencial a ambos lados de la interfaz y  $\vec{n}$  el vector normal unitario a la interfaz en  $\vec{r}$ .

La ecuación (31) puede escribirse como,

$$k \cdot \mu(\vec{r}_I) + 2K \left[ \iint_{S_C} \frac{\rho_{ox} \cdot \lambda(\vec{r}_C)}{4\pi} \vec{\nabla}\left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_C|}\right) \cdot \vec{n} dS_C + \iint_{S_I} \frac{k \cdot \mu(\vec{r}_I')}{4\pi} \vec{\nabla}\left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_I'}|\right) \cdot \vec{n} dS_I' + GIMGS \right] = 0 \quad (32)$$

con  $K = \frac{\rho_{ox} - \rho}{\rho_{ox} + \rho}$ , la cual es conocida como el coeficiente de reflexión y *GIMGS* representa los gradientes de potencial de las contribuciones de las imágenes que provienen de (30).

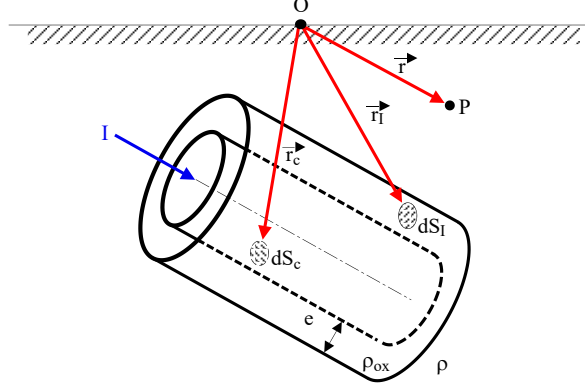


Figura 2.7: Electrodo de *PaT* recubierto con una capa de material de espesor  $e$ .

La implementación numérica de (29) y (32) requiere que ambas superficies, la superficie del electrodo y la interfaz, sean malladas de manera que las densidades de puntos de corriente superficial  $\lambda(\vec{r}_c)$  y  $\mu(\vec{r}_t)$  sean constantes en cada parche de las mallas [47]. Cuando se calcula la resistencia de *PaT*, el potencial en cada parche de la superficie del conductor necesita ser evaluado mediante (29), y (32) se aplica en cada parche de la interfaz material-suelo. Como resultado, la expresión (29) se convierte en un sistema lineal con  $N_C + N_I$  ecuaciones con  $N_C + N_I + 1$  incógnitas  $\lambda_n$  ( $n = 1 \dots N_C$ ) y  $\mu_t$  ( $t = 1 \dots N_I$ ), las densidades constantes en los parches del conductor  $N_C$  y los parches de la interfaz  $N_I$  respectivamente, y el potencial común  $V = V_i$  ( $i = 1 \dots N_C$ ) de todos los parches del conductor  $N_C$ . Para completar el sistema lineal, queda añadir una última condición impuesta a las densidades de los parches del conductor. Es la ley de conservación de la corriente eléctrica que representa la intensidad de corriente inyectada en el conductor y liberada al suelo a través de su superficie. Esto resulta en el sistema lineal no homogéneo de dimensión  $N_C + N_I + 1$

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1..N_C} \lambda_n \int_{S_{C_n}} \frac{\rho_{ox} dS_{C_n}}{4\pi |\vec{r}_i - \vec{r}_n|} + \sum_{t=1..N_I} \mu_t \int_{S_{I_t}} \frac{k dS_{I_t}}{4\pi |\vec{r}_i - \vec{r}_t|} + IMGS = V_i, \quad (i = 1 \dots N_C) \\
 k\mu_s + 2K \left[ \sum_{n=1..N_C} \lambda_n \int_{S_{C_n}} \frac{\rho_{ox}}{4\pi} \vec{\nabla} \left( \frac{1}{|\vec{r}_s - \vec{r}_n|} \right) \cdot \vec{n} dS_{C_n} \right. \\
 \left. + \sum_{\substack{t \neq s \\ t=1..N_I}} \mu_t \int_{S_{I_t}} \frac{k}{4\pi} \vec{\nabla} \left( \frac{1}{|\vec{r}_s - \vec{r}_t|} \right) \cdot \vec{n} dS_{I_t} + GIMGS \right] = 0, \quad (s = 1 \dots N_I) \\
 \sum_{j=1}^{N_C} \frac{\lambda_j}{\rho_{ox,j}} \Delta S_{C_j} = I
 \end{aligned} \tag{33}$$

A partir del sistema lineal (33), se puede obtener la solución para las densidades con las que se pueden calcular las magnitudes que caracterizan un sistema de *PaT*. Sin embargo, este sistema es, por su naturaleza, mal condicionado, especialmente para pequeños espesores de la capa de material, para los cuales se necesita un mallado muy denso para lograr buenos resultados. Por lo tanto, se necesita usar un procedimiento de regularización de la matriz del sistema, aunque no se puede evitar que los tiempos de cálculo sean muy largos.

El procedimiento de regularización consiste básicamente en imponer que la corriente saliente a través de la superficie del conductor recubierto alcance la interfaz material-suelo, o, en otras palabras, que la suma de las corrientes salientes de los parches del conductor recubierto sea igual a la suma de las corrientes que alcanzan los parches de la interfaz, sin alterar el resto de los requisitos impuestos a las corrientes. Esta regularización se impone durante la etapa de resolución del sistema lineal (33) mediante un solucionador de mínimos cuadrados lineales. La referencia [48] contiene algunos detalles sobre este proceso de regularización.

A partir de este punto, con las herramientas de cálculo presentadas, se establece el objetivo de encontrar una magnitud denominada Radio Equivalente de Electrodo Recubierto o “Coated Electrode Equivalent Radius” (*CEER*) que representa el radio,  $r_{eq}$ , que tendría un electrodo oxidado o recubierto con material de resistividad,  $\rho_{ox}$ , rodeado de un medio de resistividad,  $\rho$ , para que su resistencia de *PaT* sea igual a la del mismo electrodo sin oxidar o recubrir. Dicho de otro modo, el efecto del óxido o del recubrimiento sobre las propiedades eléctricas del electrodo se traslada al efecto que produce sobre la resistencia de *PaT* una variación en el radio del conductor. Con este propósito, se estudia la variación de la resistencia de una varilla con el espesor de la capa de material de recubrimiento y se minimiza la expresión  $\chi^2 = (R_G^{ox}(e, r_i, \rho_{ox}, \rho) - R_G(r_{eq}, \rho))^2$ , donde  $R_G^{ox}$  es la resistencia de la varilla con el recubrimiento y con un radio inicial  $r_i$ , mientras que  $R_G$  es la resistencia que tendría sin recubrimiento pero con un radio  $r_{eq}$ .

El parámetro importante es  $\frac{\rho_{ox}}{\rho}$  y las expresiones propuestas para calcular el *CEER* son, en el caso de una capa de óxido de espesor,  $e$ , y resistividad  $\rho_{ox}$ :

$$r_{eq} = r_C \frac{\rho_{ox}}{\rho} \cdot r_I^{-\left(\frac{\rho_{ox}}{\rho}-1\right)} = (r_I - e) \frac{\rho_{ox}}{\rho} \cdot r_I^{-\left(\frac{\rho_{ox}}{\rho}-1\right)} \quad (34)$$

mientras que la expresión del *CEER* para una capa de material conductor de recubrimiento de espesor,  $e$ , y resistividad  $\rho_{ox}$ , toma el valor de:

$$r_{eq} = r_C \frac{\rho_{ox}}{\rho} \cdot r_I^{-\left(\frac{\rho_{ox}}{\rho}-1\right)} = r_C \frac{\rho_{ox}}{\rho} \cdot (r_C + e)^{-\left(\frac{\rho_{ox}}{\rho}-1\right)} \quad (35)$$

Aunque estas expresiones han sido obtenidas para electrodos en suelos homogéneos, pueden ser aplicadas a electrodos enterrados en suelos multicapa siempre que los electrodos se sitúen íntegramente en la capa superior del suelo.

## 2.5. Modelo para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo mediante la técnica Resistive Driven-Rod (RDR)

Como se mencionó en el *Capítulo 1 “Introducción”*, la técnica de la varilla hincada o “Driven-Rod” (*DR*) puede ser usada como alternativa a los métodos no invasivos que miden los potenciales en superficie con las configuraciones de electrodos como las de Wenner o Schlumberger.

Si la varilla se modela como un cilindro de longitud,  $L$ , y radio,  $r$ , con  $L \gg r$  y con una semiesfera en su extremo, la resistencia de *PaT* en un medio homogéneo de resistividad  $\rho$ , es  $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{d}\right)$ . Por otro lado, si la varilla se modela como un semielipsoide de revolución, cuyo eje mayor es  $L$  y su eje menor es el diámetro  $d$ , la expresión  $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right)$  puede ser usada. Otra expresión ampliamente usada para estimar teóricamente la resistencia de *PaT* es  $R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right]$  [49] en la cual se asume adicionalmente que la corriente de fuga al suelo tiene una distribución constante a lo largo de la varilla. Al variar la longitud de la varilla, se puede obtener un perfil de resistividad aparente,  $\rho_{app}$ , que representa la resistividad vista por la varilla de longitud  $L$ . La *Figura 2.8* avanza los datos necesarios para implementar el método.

Una ventaja del método de varilla hincada o “Driven-Rod” es que permite obtener información valiosa sobre la viabilidad de un sistema de *PaT*. Conocer

la profundidad necesaria para obtener una resistencia de  $PaT$  determinada podría facilitar enormemente el ajuste final del diseño del sistema de  $PaT$ .

Una observación importante es que el método del Sondeo Eléctrico Vertical ( $VES$ ) no es muy sensible al estado o tipo de electrodos utilizados, excepto a poca profundidad, donde los electrodos están muy cerca y su tamaño y forma influyen algo en el potencial [50]. En general, no importa si los electrodos están corroídos o si tienen una gran resistencia interna, ya que lo que se mide es una diferencia de potencial en el suelo. Por el contrario, el método de varilla hincada se ve muy afectado por la oxidación y la resistencia interna de la varilla. Las expresiones anteriores para la resistencia de  $PaT$ ,  $R$ , como función de la longitud de la varilla,  $L$ , se encontraron bajo la condición de que las varillas son conductores ideales sin resistencia interna. Por lo tanto, es de esperar que este hecho debe ser tenido en cuenta al buscar un modelo para la resistividad del suelo.

Hay más razones, además de las ya expuestas, para incorporar la resistencia interna de los conductores en el esquema de cálculo de las propiedades eléctricas de un electrodo de  $PaT$ . La tendencia actual de utilizar materiales con resistencia interna no despreciable, como el acero al carbono u otros, para los electrodos de un sistema de  $PaT$  hace necesario estudiar su efecto en los parámetros del sistema. Después de establecer un modelo de cálculo para los electrodos que tenga en cuenta su resistencia interna, el método aquí denominado varilla hincada resistiva o “Resistive Driven-Rod” ( $RDR$ ), que tiene en cuenta la resistencia interna de la varilla, se aplicará tanto a suelos sintéticos como reales.

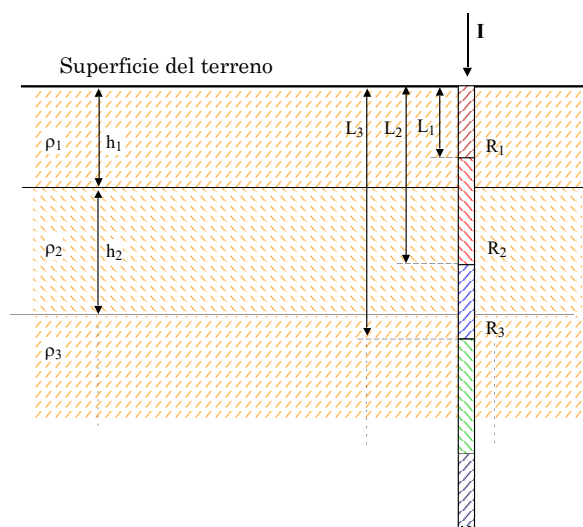


Figura 2.8: Esquema del método “Resistive Driven-Rod” ( $RDR$ )

Un método directo e invasivo para determinar la resistividad en función de la profundidad es conocido en la literatura como "Normal Resistivity Logging" (*NRL*) [51]. Este es un método geofísico para determinar la conductividad de las rocas mediante el estudio del perfil geológico de perforación en un pozo. Sin embargo, esta técnica requiere la perforación de un pozo de una sección lo suficientemente grande para introducir las sondas. La resistividad se mide con un dispositivo de tres o cuatro pequeñas picas tomando una separación corta entre ellas para que se pueda medir la resistividad en las paredes del pozo.

Para completar esta breve revisión de varios métodos utilizados para investigar la estructura eléctrica de los suelos, se debe mencionar los métodos de corrientes de Foucault basados en el campo magnético o "Eddy-Current Method" (*ECM*), enmarcados en la clase de métodos electromagnéticos transitorios. Mediante una bobina cerca de la superficie del suelo, se produce un campo magnético variable. Se generan corrientes de Foucault en el suelo conductor, produciendo campos magnéticos que dependen de la estructura de las capas. Aunque se basan en principios muy diferentes a los de los métodos descritos hasta ahora, los *ECM* son claramente métodos no invasivos con alta resolución a poca profundidad [52].

A partir de los datos de resistividad aparente obtenidos con los métodos indirectos descritos anteriormente, se puede obtener el perfil de resistividad del suelo planteando un problema inverso. Partiendo de expresiones semianalíticas para la resistencia de *PaT* en función de los parámetros de un modelo multicapa, se implementa un algoritmo de optimización para encontrar el conjunto de parámetros del modelo que minimice las diferencias cuadráticas entre los valores de la resistencia medida en el campo y los valores calculados con las expresiones teóricas que contienen los parámetros. Sin embargo, las técnicas utilizadas en el problema inverso con las mediciones realizadas con la configuración Wenner no se pueden extender cuando las mediciones provienen de un registro de varilla hincada. La resistividad aparente tiene un significado diferente según el tipo de medición.

Para una longitud  $L$  de varilla hincada en el suelo de parámetros  $\{\rho_1, \rho_2, \dots, h_1, h_2, \dots\}$ , la resistencia de *PaT* de esta se denotará por  $R_{calc}(L; \{\rho_1, \rho_2, \dots, h_1, h_2, \dots\})$ . En la práctica, se realiza una medida directa en campo de la resistencia *PaT*,  $R_{meas}$  de la varilla, mediante el método de la caída de potencial ("Fall-of-Potential"). La variable de control es la longitud hincada de la varilla,  $L$ , en el suelo, de este modo se dispone de un conjunto de valores de

resistencia de *PaT* correspondientes a longitudes crecientes de la varilla. A partir de estas mediciones, se implementa un algoritmo de optimización que minimiza la expresión

$$\chi^2 = \sum_j [R_{meas}(L_j) - R_{calc}(L_j; \{\rho_1, \rho_2 \dots, h_1, h_2 \dots\})]^2 \quad (36)$$

Este problema cae dentro de la categoría de los llamados problemas inversos, los cuales frecuentemente se dice que están mal condicionados. Esto significa en la práctica que las incertidumbres en las mediciones de la resistencia de *PaT* pueden llevar a cambios muy dramáticos en los valores de los parámetros del modelo multicapa. Como consecuencia, puede no existir una única solución para el perfil de resistividad a partir de la serie de resistencias de *PaT* medidas.

Para finalizar esta sección, se discutirán algunas consideraciones sobre el modelo presentado en esta tesis. La resistencia interna de un electrodo de puesta a tierra juega un papel importante por varias razones. En primer lugar, como se mencionó anteriormente, el electrodo ya no es equipotencial y la resistencia de puesta a tierra debe definirse como se indicó anteriormente. La elección del punto de inyección de corriente es crucial y debe seleccionarse de manera que su potencial sea lo más bajo posible. En segundo lugar, los cálculos realizados con este modelo permiten validar o descartar materiales a utilizar en electrodos siempre que se verifiquen los requisitos técnicos sobre el valor de la resistencia de *PaT* y los potenciales de paso y contacto requeridos en una instalación. Nótese que aumentar el tamaño de los electrodos puede ayudar a reducir la resistencia de *PaT* siempre que la resistencia interna de los conductores no resulte en un aumento final de la resistencia de *PaT*. Finalmente, otro efecto a considerar que solo puede evaluarse con modelos como el presentado en esta tesis es el calentamiento por efecto Joule en los electrodos. El calor generado puede causar un aumento no deseado en la resistencia de *PaT* al tener en cuenta la variación de la resistividad con la temperatura. Este efecto debe estudiarse y solo los modelos que tengan en cuenta la resistividad interna de los conductores son válidos para este propósito.

### 3. Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra

Como ya se ha mencionado en los capítulos precedentes, este trabajo recoge tres aportaciones al cálculo de la resistencia de  $PaT$  que se considera contribuyen a mejorar la precisión en el cálculo de su valor, incluyéndose características eléctricas no contempladas en los modelos habituales, como son la resistencia interna de los electrodos y la posible oxidación de su superficie en contacto con el suelo, así como la reducción del tiempo de computación cuando se trata de realizar una primera estimación de la resistencia de  $PaT$  en electrodos de gran tamaño.

Estas contribuciones están recogidas en las siguientes publicaciones de revistas internacionales realizadas por el autor de esta tesis:

- [22] "An Estimator of the Resistance of Large Grounding Electrodes from Its Geometric Characterization", Noviembre 2020.  
<https://doi.org/10.3390/app10228162>
- [23] "Grounding Electrodes with Internal Resistance: Application to Feasibility Study of the Driven-Rod Method for Modeling the Soil Electrical Resistivity Profile", Mayo 2021.  
<https://doi.org/10.3390/app11115032>
- [24] "A fast method to compute the grounding resistance of a coated electrode using the coated electrode equivalent radius", Mayo 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107879>
- [27] "A Fast Calculation of Partially Corroded, Grounding-Resistive Electrode Electrical Parameters", Noviembre 2022.  
<https://doi.org/10.3390/app122312243>

En las siguientes secciones trataremos, por orden cronológico en cuanto a las publicaciones en revistas internacionales, en primer lugar, la estimación de la resistencia de  $PaT$  en electrodos de gran tamaño, para continuar con la aplicación a ejemplos concretos del modelo de cálculo de la resistencia de  $PaT$  de electrodos con resistencia interna y oxidados (parcial o totalmente).

### 3.1. Estimador de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) para electrodos de gran tamaño

A continuación, se muestran los resultados de la estimación de la resistencia de *PaT*, en varios ejemplos reales de electrodos de gran tamaño, mediante la aplicación de la ecuación (12).

El estimador tiene como principal ventaja frente a la determinación de la resistencia de *PaT* de un electrodo mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) resuelto mediante el Método de los Momentos (*MoM*), la enorme reducción en el tiempo de cálculo al no ser necesaria la resolución del sistema de ecuaciones lineales de gran tamaño según sección 2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (*PaT*) en terrenos homogéneos”.

#### 3.1.1. Estimador de la resistencia de *PaT* - Malla S.E. Balaidos

En este apartado se estima la resistencia del electrodo de *PaT* de la subestación eléctrica de Balaidos ubicada en Vigo, Galicia.

La *Figura 3.1* muestra la estructura geométrica del electrodo, que es una red no regular formada por conductores de radio 7 mm y longitud variable con una longitud total de la malla de  $L = 289,8$  m. El electrodo está enterrado a una profundidad de 0,8 m.

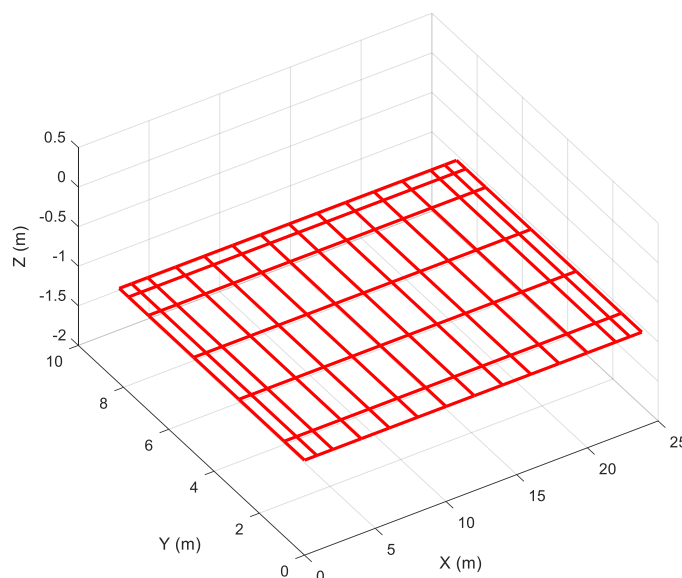


Figura 3.1: Malla de *PaT* de la subestación eléctrica de Balaidos

El parámetro  $k_R = \frac{R}{\rho}$  se ha calculado previamente mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) y resuelto mediante el Método de los Momentos (*MoM*), explicado en la sección 2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (*PaT*) en terrenos homogéneos”, obteniéndose un valor de  $k_R = 0,0273 \Omega/\Omega \cdot \text{m}$ . Este parámetro, representa la resistencia de *PaT*,  $R$ , de un electrodo enterrado en un suelo homogéneo de resistividad  $\rho = 1 \Omega \cdot \text{m}$ .

La resistencia estimada por la ecuación (12) para un suelo monocapa con resistividad la unidad, con una segmentación de  $N = 30$  segmentos por metro y un índice de estiramiento  $i_s = 0,0167$ , proporciona un valor de  $R_{estimada} = 0,0255 \pm 0,0057 \Omega$ , cuyo intervalo contiene el valor calculado de la resistencia de *PaT* del electrodo ( $R_{calculada} = 0,0273 \Omega$ ).

Como puede verse, la estimación de  $R$  para un electrodo específico requiere conocer únicamente su forma geométrica de forma precisa para determinar su longitud total,  $L$ , y calcular  $i_s$ . Con esta información disponible, se puede llevar a cabo una segmentación adecuada eligiendo  $N$  segmentos por metro de conductor recto y así determinar el índice de estiramiento  $i_s$ , mediante un cálculo sencillo según la ecuación (11). Luego se aplica la ecuación (12) y la ecuación (13) para obtener la estimación de  $R$  y su error, respectivamente.

### 3.1.2. Estimador de la resistencia de *PaT* - Malla S.E. Loeches 45 kV

La S.E. Loeches es una subestación eléctrica de la red de distribución de 45 kV ubicada en la localidad de Loeches (Madrid), con dimensiones aproximadas de 70 metros de largo por 60 metros de ancho. La subestación, propiedad de UFD Distribución Electricidad S.A (*UFD*), tiene parques de niveles de tensión de 132 kV, 45 kV y 15 kV, y se encuentra próxima a otra gran subestación propiedad de Red Eléctrica de España S.A.U., con un nivel de tensión de 220 kV y 400 kV.

En la *Figura 3.2* se muestra el electrodo de *PaT* del parque de 45 kV/15kV de la subestación Loeches propiedad de *UFD*.

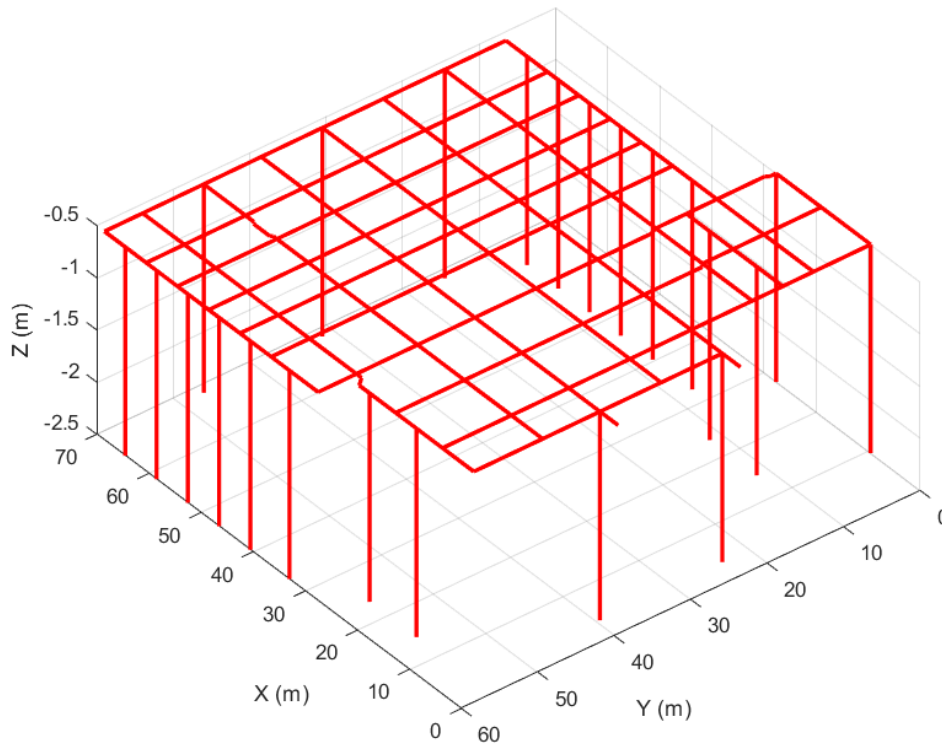


Figura 3.2: Malla de *PaT* del parque de 45kV/15kV de la subestación eléctrica de Loeches propiedad de *UFD*

Los conductores horizontales tienen un radio de 5,642 mm y están enterrados a una profundidad de 0,5 m en un suelo de resistividad  $\rho = 59,5 \Omega \cdot \text{m}$ , mientras que las picas verticales tienen 7 mm de radio y 2 m de longitud. El electrodo en su conjunto tiene una longitud total de  $L = 1094,2 \text{ m}$ .

El parámetro  $k_R = \frac{R}{\rho}$ , equivalente a la resistencia de *PaT* para un terreno homogéneo de resistividad la unidad, se ha calculado mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) resuelto mediante el Método de los Momentos (*MoM*), explicado en la sección 2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (*PaT*) en terrenos homogéneos”, obteniéndose un valor del parámetro  $k_R = 0,0079 \Omega/\Omega \cdot \text{m}$ .

La resistencia estimada por la ecuación (12) para un suelo homogéneo con resistividad la unidad, con una segmentación de  $N = 30$  segmentos por metro y un índice de estiramiento de  $i_s = 0,0151$ , proporciona un valor de  $R = 0,0099 \pm 0,0027\Omega$ , cuyo intervalo contiene el valor calculado de la resistencia de *PaT* del electrodo ( $R_{calculada} = 0,0079 \Omega$ ).

### 3.1.3. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Tiendas 220 kV

La S.E. Tiendas es la subestación eléctrica de 220 kV de evacuación del parque fotovoltaico Carmonitas II, III y IV situado en la provincia Cáceres, cuya malla o electrodo de  $PaT$  tiene unas dimensiones aproximadas de 90 metros de largo por 60 metros de ancho, como se muestra en la *Figura 3.3*.

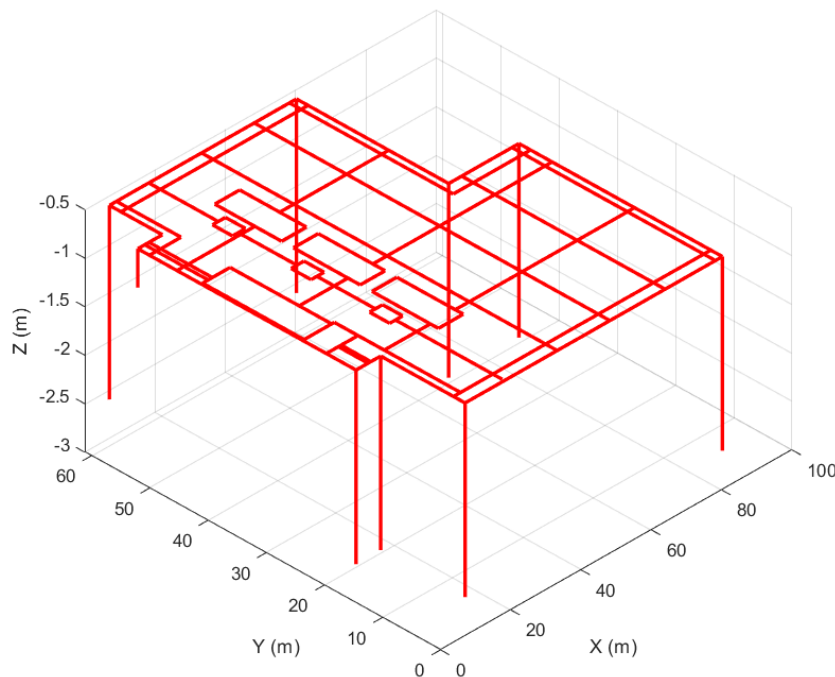


Figura 3.3: Malla de  $PaT$  de la S.E. Tiendas 220 kV

Los conductores horizontales tienen un radio de 5,3 mm y están enterrados a una profundidad de 0,6 m, mientras que las picas verticales tienen 7,9 mm de radio y longitud 0,4 m y 2 m. El electrodo en su conjunto tiene una longitud total de  $L=1188,7$  m.

Del mismo modo que en los casos anteriores, el parámetro  $k_R = \frac{R}{\rho}$ , equivalente a la resistencia de  $PaT$  para un terreno homogéneo de resistividad la unidad, se ha calculado mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) resuelto mediante el Método de los Momentos (*MoM*), explicado en la sección 2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra ( $PaT$ ) en terrenos homogéneos”, obteniéndose un valor del parámetro  $k_R = 0,0071 \Omega/\Omega \cdot m$ .

La resistencia estimada por la ecuación (12) para un suelo homogéneo con resistividad la unidad, con una segmentación de  $N=30$  segmentos por metro y un índice de estiramiento de  $i_s = 0,0166$ , proporciona un valor de  $R_{estimada} = 0,0091 \pm 0,0025 \Omega$ , cuyo intervalo contiene el valor calculado de la resistencia de  $PaT$  del electrodo ( $R_{calculada}=0,0071 \Omega$ ).

### 3.1.4. Estimador de la resistencia de $PaT$ - Malla S.E. Arbillera 400 kV

Por último, con objeto de cubrir una amplia gama de mallas de subestaciones eléctricas de todos los niveles de tensión, se realiza la estimación de la resistencia de  $PaT$  de la subestación eléctrica Arbillera de 400 kV, propiedad de Red Eléctrica de España S.A.U., perteneciente a la red de transporte de energía eléctrica del sistema eléctrico peninsular.

La malla de  $PaT$  según la *Figura 3.4* está constituida por conductores horizontales de sección  $120 \text{ mm}^2$  (radio 7,1 mm) enterrados a una profundidad de 0,6 m. El electrodo en su conjunto tiene una longitud total de  $L= 6892,1 \text{ m}$ .

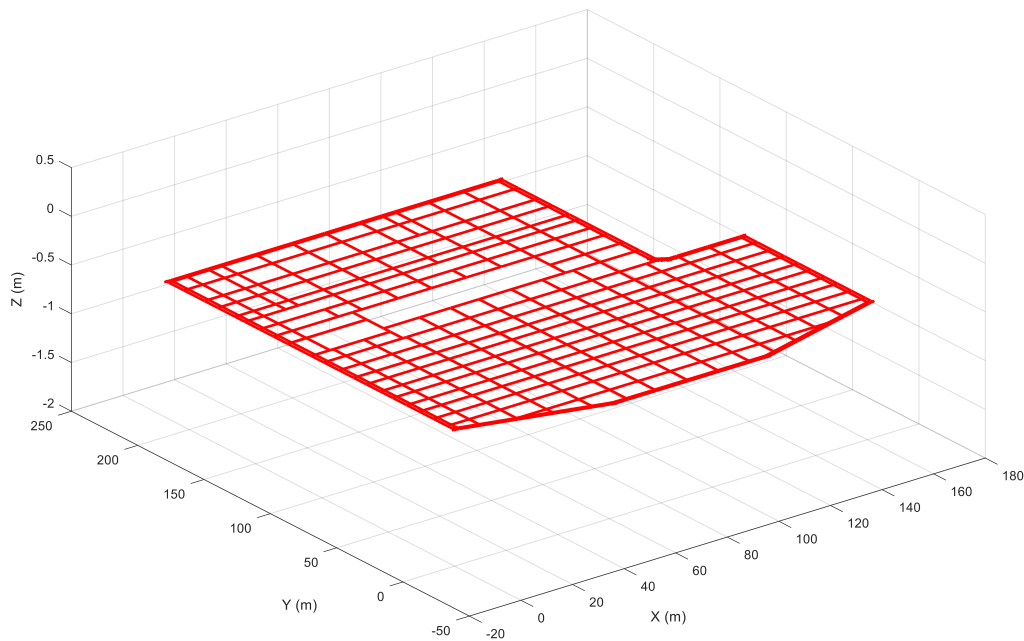


Figura 3.4: Malla de  $PaT$  de la S.E. Arbillera 400 kV

La malla de la S.E. Arbillera tiene aproximadamente 162 metros de ancho y 217 metros de largo según el plano de planta de la red de tierras mostrado en la siguiente *Figura 3.5*.

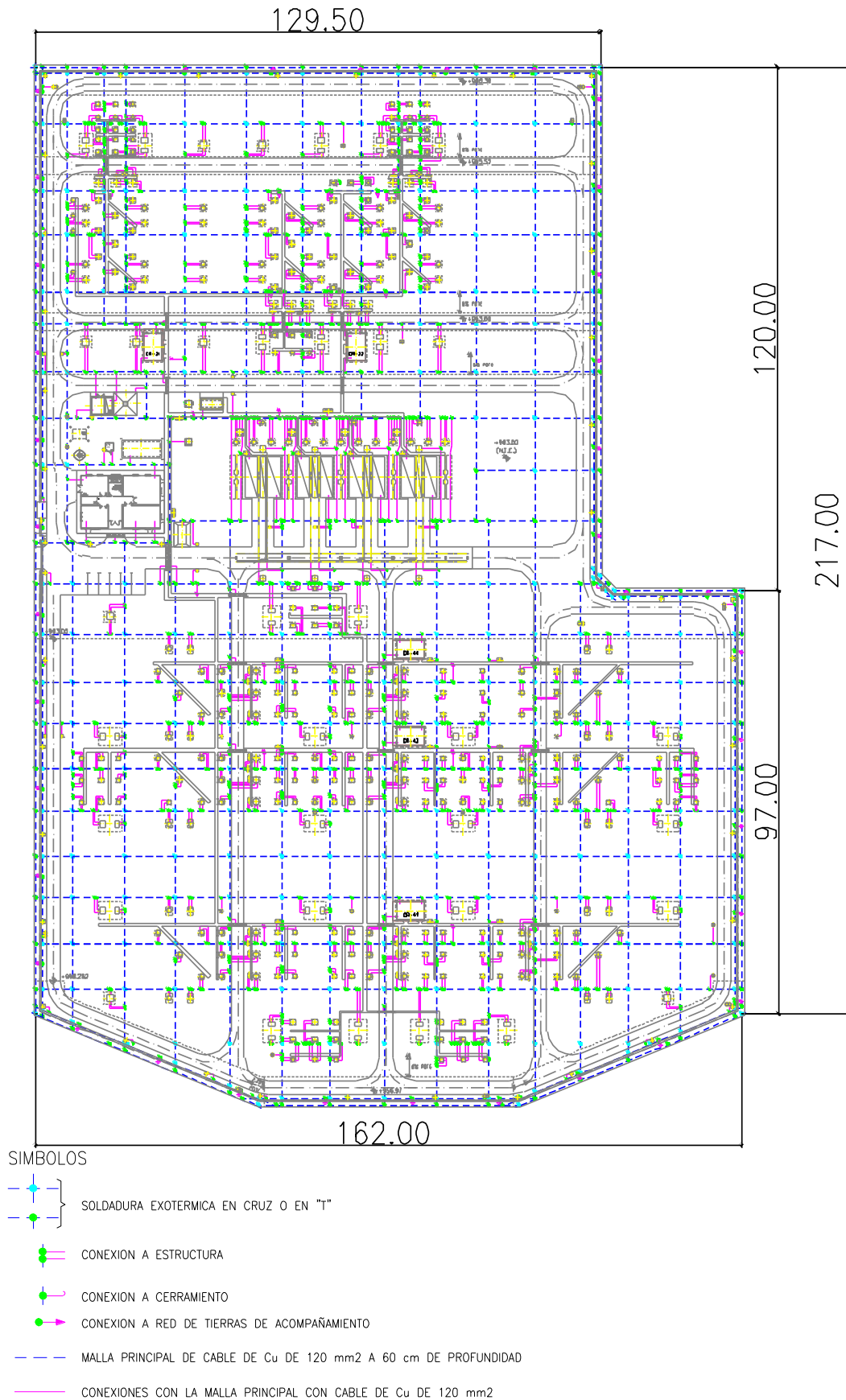


Figura 3.5: Plano de la red de tierras de la S.E. Arbillera 400 kV

Del mismo modo que en los casos anteriores, el parámetro  $k_R = \frac{R}{\rho}$ , equivalente a la resistencia de *PaT* para un terreno homogéneo de resistividad la unidad, se ha calculado mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) resuelto mediante el Método de los Momentos (*MoM*), explicado en la sección 2.1 “Modelo para el cálculo de los parámetros eléctricos de los electrodos de Puesta a Tierra (*PaT*) en terrenos homogéneos”, obteniéndose un valor del parámetro  $k_R = 0,0024 \Omega/\Omega \cdot \text{m}$ .

La resistencia estimada por la ecuación (12) para un suelo homogéneo con resistividad la unidad, con una segmentación de  $N=10$  segmentos por metro y un índice de estiramiento de  $i_s = 0,0079$ , proporciona un valor de  $R_{estimada} = 0,0032 \pm 0,0011 \Omega$ , cuyo intervalo contiene el valor calculado de la resistencia de *PaT* del electrodo ( $R_{calculada}=0,0024 \Omega$ ).

### 3.1.5. Resultados del estimador de la resistencia de *PaT*

En la *Tabla 3.1* se resumen los resultados de los valores de la resistencia de *PaT* del estimador,  $R_{estimada}$ , y los valores obtenidos,  $R_{calculada}$ , mediante la aplicación del Método de Simulación de Cargas (*CSM*) para el caso de un terreno homogéneo de resistividad  $\rho = 1 \Omega \cdot \text{m}$ .

Tabla 3.1: Resistencia de *PaT*– Estimador vs Cálculo *CSM*

Tipo de electrodo de gran tamaño	Longitud total del electrodo L (m)	Índice de estiramiento $i_s$	Resistencia <i>PaT</i> estimada $R_{estimada} (\Omega)$ Tiempo cálculo*	Resistencia <i>PaT</i> calculada <i>CSM</i> $R_{calculada} (\Omega)$ Tiempo cálculo*
Malla S.E. Balaidos	289,8	0,0167	$0,0255 \pm 0,0057$ 0,03 s	0,0273 3,38 s
Malla S.E. Loeches 45 kV	1094,2	0,0151	$0,0099 \pm 0,0027$ 0,09 s	0,0079 48,4 s
Malla S.E. Tiendas 220 kV	1188,7	0,0166	$0,0091 \pm 0,0025$ 0,11 s	0,0071 56,5 s
Malla S.E. Arbillera 400 kV	6892,1	0,0079	$0,0032 \pm 0,0011$ 2,9 s	0,0024 3096 s

\*Para la comparación del tiempo de cálculo se ha tomado una segmentación de 5 trozos por metro, tanto para la resistencia estimada como para la calculada por *CSM*.

Hay que insistir en que la estimación que se obtiene a partir de la ecuación (12) contiene unos valores para los parámetros ( $R_0$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) que pueden ser mejorados añadiendo datos de electrodos conocidos para aumentar la población de electrodos con los que se ha determinado estadísticamente la expresión del estimador.

### 3.2. Electrodos con resistencia interna no despreciable sin oxidación o recubrimiento

En esta sección se aplicará el modelo descrito en la sección 2.3 “*Modelo de electrodo con resistencia interna*” para la determinación de la resistencia de  $PaT$  de varios electrodos utilizados en instalaciones reales [53]. El cálculo se realizará para varios tipos de materiales, comparando los resultados con el caso de no considerar la resistencia interna asociada a los electrodos. Como se mostrará al final de esta sección las diferencias pueden ser significativas.

Se ha estudiado un caso típico de electrodo de  $PaT$  en apoyos de líneas eléctricas aéreas.

Adicionalmente, se analizan los sistemas de  $PaT$  típicamente empleados en los centros de transformación ubicados en edificios y que forman parte de la contribución de esta tesis al *7<sup>th</sup> International Conference on Technological Innovation in Building - VII Congreso internacional de Innovación Tecnológica en Edificación - CITE 2022* [54]

Por último, se consideran las mallas de  $PaT$  de gran tamaño habitualmente empleadas en las subestaciones eléctricas de transporte y distribución de energía eléctrica tipo intemperie.

#### 3.2.1. Caso 1: Apoyo línea eléctrica aérea

En los apoyos de las líneas eléctricas aéreas es típico el electrodo de  $PaT$  de la *Figura 3.6*, constituido por un anillo cuadrado de 2,6 m de lado formado por conductores desnudos de sección 50 mm<sup>2</sup> ( $r_c=3,989$  mm), enterrados a una profundidad de 0,65 m con 4 picas verticales de 1,5 m de largo y misma sección que los conductores, instaladas en cada una de las esquinas.

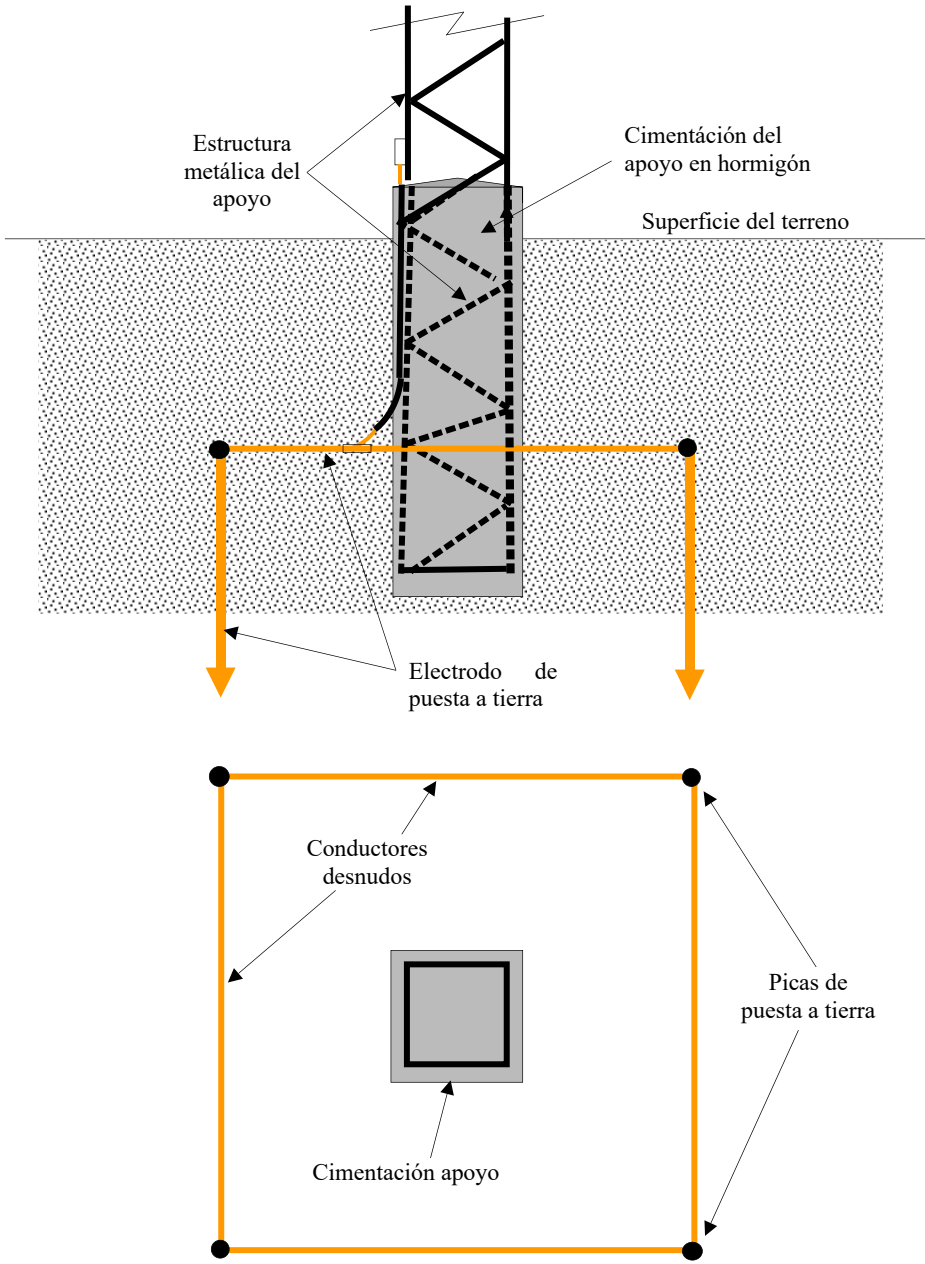


Figura 3.6: Electrodo de *PaT* típico en apoyo de línea eléctrica aérea

### 3.2.2. Caso 2: Centro de transformación en edificio en área industrial

Sistema de *PaT* constituido por un conductor desnudo de sección  $50 \text{ mm}^2$  ( $r_c=3,989 \text{ mm}$ ), enterrado a una profundidad de  $0,5 \text{ m}$  en forma de anillo de  $3 \text{ m}$  de ancho por  $5,2 \text{ m}$  de largo, y picas verticales de diámetro  $14,6 \text{ mm}$  y longitud  $2 \text{ m}$  en cada una de las cuatro esquinas según *Figura 3.7*.

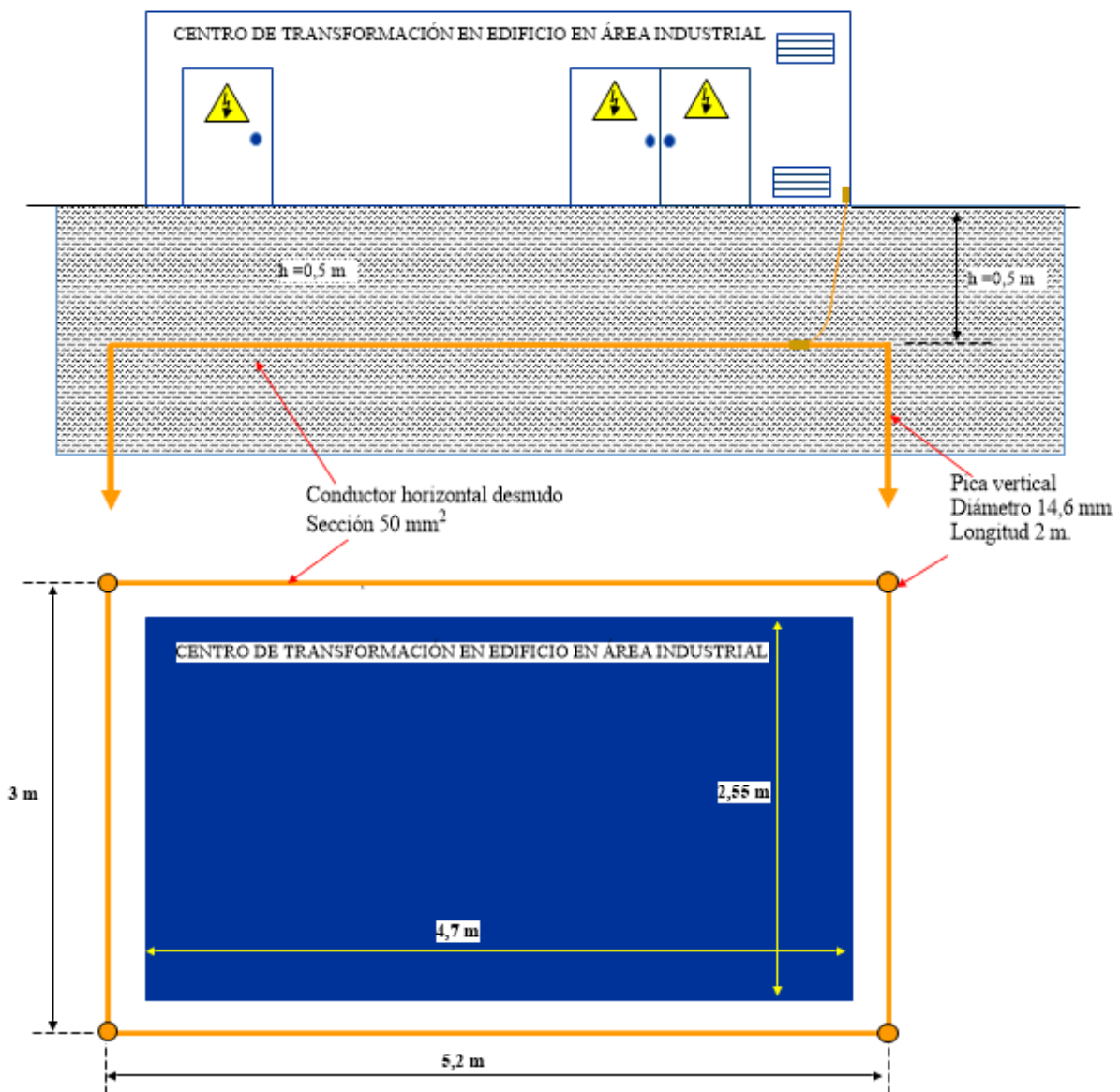


Figura 3.7: Ejemplo de sistema de *PaT* de un centro de transformación en edificio en área industrial

### 3.2.3. Caso 3: Centro de transformación en interior de edificio residencial

Sistema de *PaT* constituido por un conductor desnudo horizontal de sección  $50 \text{ mm}^2$  ( $r_c=3,989 \text{ mm}$ ), longitud total 9 metros y enterrado a una profundidad de  $0,5 \text{ m}$  con cuatro picas verticales de diámetro  $14,6 \text{ mm}$  y longitud  $2 \text{ m}$  según *Figura 3.8*.

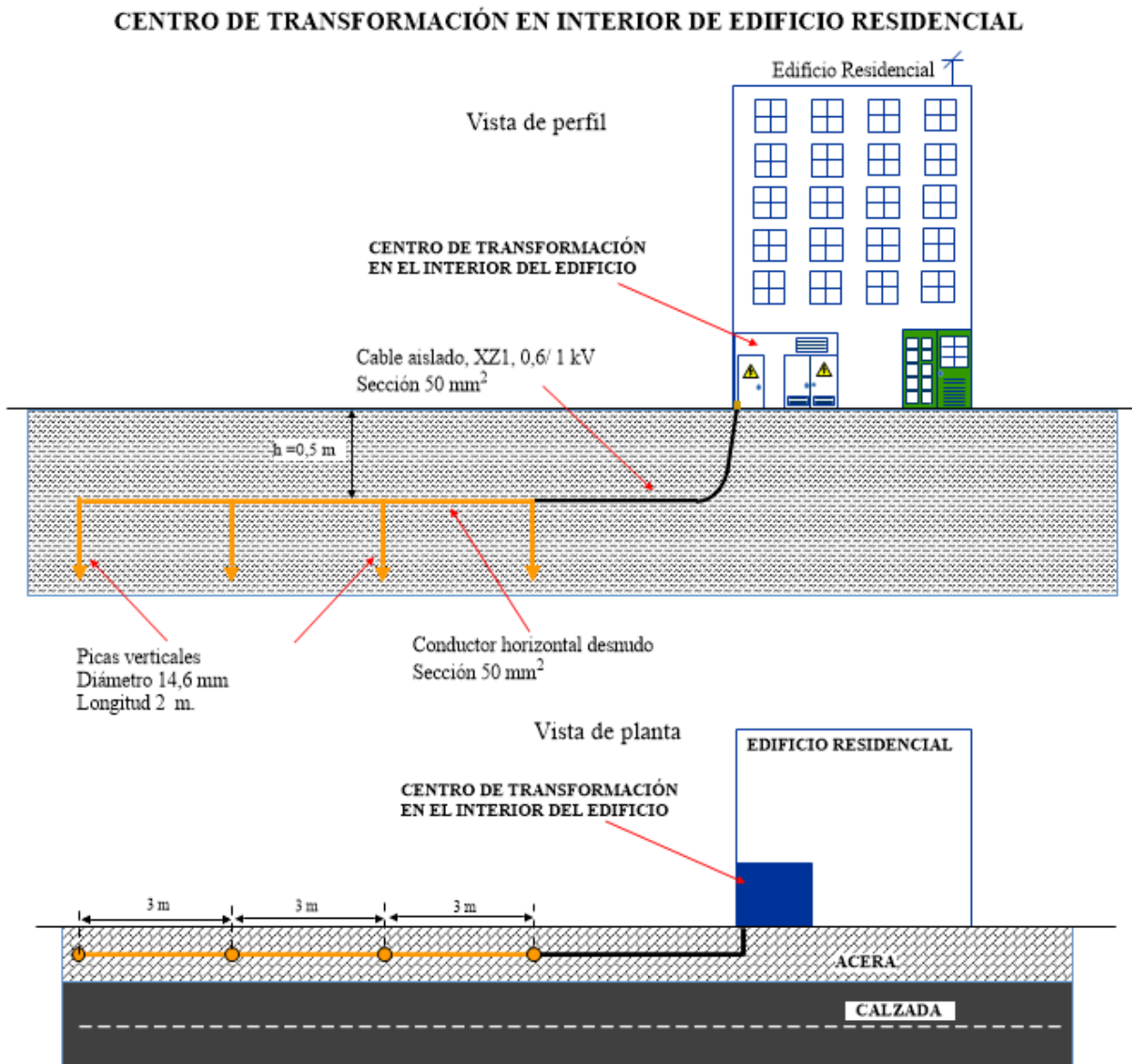


Figura 3.8: Ejemplo de sistema de *PaT* de un centro de transformación en el interior de un edificio residencial

### 3.2.4. Caso 4: Subestación tipo intemperie de pequeño tamaño

Sistema de *PaT* constituido por una malla horizontal de 30m x 20m formada por conductores desnudos de sección  $50 \text{ mm}^2$  ( $r_c=3,989 \text{ mm}$ ), y enterrados a una profundidad de 0,8 m según *Figura 3.9*.

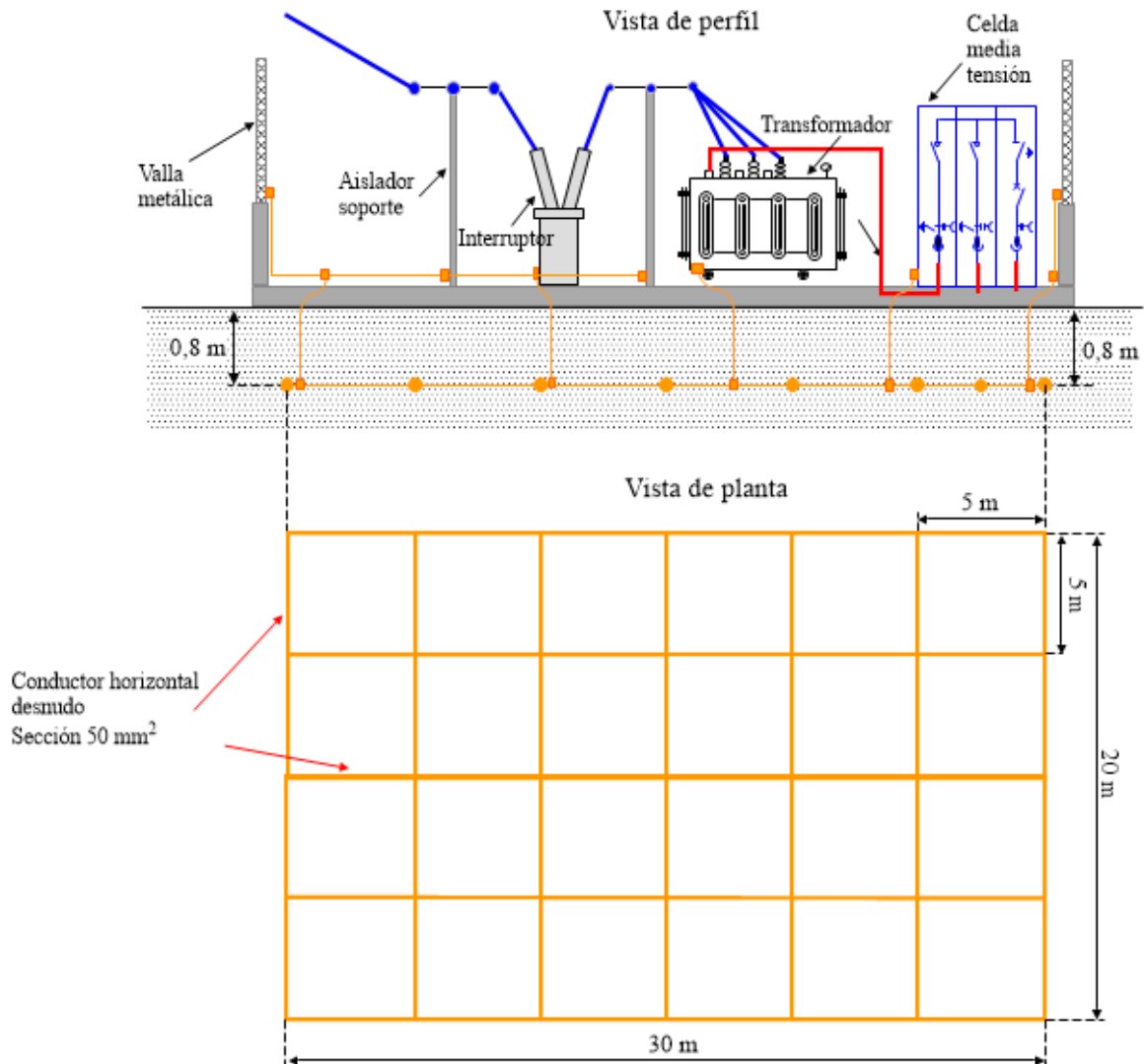


Figura 3.9: Ejemplo de sistema de *PaT* de una subestación tipo intemperie de pequeño tamaño

### 3.2.5. Caso 5 y Caso 6: Subestación eléctrica tipo intemperie de gran tamaño

Como ejemplos de sistema de *PaT* o electrodos empleados habitualmente en las subestaciones eléctricas tipo intemperie de distribución y transporte de energía eléctrica se han considerado dos ejemplos:

- Caso 5: La malla de *PaT* de gran tamaño de la S.E. Loeches 45 kV, analizada en el apartado 3.1.2 “Estimador de la resistencia de *PaT* - Malla S.E. Loeches 45 kV”.

En este caso el electrodo o malla de *PaT* se corresponde con la *Figura 3.2* en la que los conductores horizontales tienen un radio de 5,642 mm y están enterrados a una profundidad de 0,5 m mientras que las picas verticales tienen 7 mm de radio y 2 m de longitud.

- Caso 6: La malla de *PaT* de gran tamaño de la S.E. Arbillera 400 kV, estudiada en el apartado 3.1.4 “Estimador de la resistencia de *PaT*– Malla S.E. Arbillera 400 kV”.

La malla de *PaT* según la *Figura 3.4* y la *Figura 3.5* está constituida por conductores horizontales de sección 120 mm<sup>2</sup> (radio 7,1 mm) enterrados a una profundidad de 0,6 m.

### 3.2.6. Resultados del cálculo de la resistencia de *PaT* considerando la resistencia interna de los electrodos sin oxidación ni recubrimiento

Para los seis sistemas de *PaT* descritos anteriormente, la resistencia de *PaT* se ha calculado considerando dos situaciones diferentes que implican diferentes procedimientos de cálculo:

- Despreciando la resistencia interna de los electrodos.
- Considerando la resistencia interna de los electrodos para diferentes tipos de materiales cuya resistividad eléctrica se indica en la *Tabla 3.2*.

Tabla 3.2: Resistividad eléctrica a 20°C (fuente IEEE Std 80TM-2013 [11])

Tipo de material	Resistividad ( $\mu\Omega$ cm)
Cobre comercial estirado en frío	1,78
Conductor de acero recubierto de cobre	5,86
Pica de acero recubierto de cobre	10,10
Conductor de acero recubierto de aluminio	8,48
Acero, 1020	15,90
Pica de acero inoxidable	17,50
Pica de acero recubierta de zinc	20,10
Acero inoxidable, 304	72,00

Los resultados obtenidos para la resistencia de  $PaT$  de los seis casos o electrodos estudiados para los diferentes tipos de materiales y considerando una resistividad del terreno  $\rho = 500 \Omega \cdot m$  se muestran en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.3: Resistencia de  $PaT$  – Electrodos de diferentes materiales con resistencia interna no despreciable

Sistema de $PaT$	Tipo de material de los electrodos	Resistencia de $PaT$ ( $\Omega$ )	Error respecto de no considerar la resistencia interna de los electrodos %
Caso 1: Apoyo línea eléctrica aérea L=16,4 m	Resistencia interna no considerada	62,42	0,00%
	Anillo con conductor de cobre comercial estirado en frío y 4 picas verticales de acero recubierto de cobre	62,43	0,00%
	La totalidad del electrodo de acero recubierto de cobre	62,43	0,01%
	Anillo con conductor de acero recubierto de aluminio y 4 picas de galvanizado	62,43	0,01%
	Anillo con conductor acero inoxidable 304 y 4 picas de acero inoxidable	62,48	0,10%

Sistema de <i>PaT</i>	Tipo de material de los electrodos	Resistencia de <i>PaT</i> ( $\Omega$ )	Error respecto de no considerar la resistencia interna de los electrodos %
<b>Caso 2:</b> <b>Centro de transformación en edificio en área industrial</b> <b>L = 24,4 m</b>	Resistencia interna no considerada	44,77	0,00%
	Anillo con conductor de cobre comercial estirado en frío y 4 picas verticales de acero recubierto de cobre	44,78	0,01%
	La totalidad del electrodo de acero recubierto de cobre	44,78	0,02%
	Anillo con conductor de acero recubierto de aluminio y 4 picas de acero galvanizado	44,78	0,03%
	Anillo con conductor acero inoxidable 304 y 4 picas de acero inoxidable	44,87	0,21%
<b>Caso 3:</b> <b>Centro de transformación en interior de edificio residencial</b> <b>L = 17 m</b>	Resistencia interna no considerada	51,65	0,00%
	Conductor horizontal de cobre comercial estirado en frío y 4 picas verticales de acero recubierto de cobre	51,65	0,01%
	La totalidad del electrodo de acero recubierto de cobre	51,66	0,03%
	Conductor horizontal de acero recubierto de aluminio y 4 picas de acero galvanizado	51,67	0,04%
	Conductor horizontal de acero inoxidable 304 y 4 picas de acero inoxidable	51,84	0,37%

Sistema de <i>PaT</i>	Tipo de material de los electrodos	Resistencia de <i>PaT</i> ( $\Omega$ )	Error respecto de no considerar la resistencia interna de los electrodos %
<b>Caso 4:</b> Subestación tipo intemperie de pequeño tamaño L=250 m	Resistencia interna no considerada	9,33	0,00%
	Conductor de cobre comercial estirado en frío	9,34	0,09%
	Conductor de acero recubierto de cobre	9,36	0,31%
	Conductor de acero recubierto de aluminio	9,37	0,44%
	Conductor de acero 1020	9,41	0,83%
	Conductor de acero inoxidable 304	9,68	3,75%
<b>Caso 5:</b> Malla S.E. Loeches 45 kV L=1094,2 m	Resistencia interna no considerada	3,95	0,00%
	Conductores de cobre comercial estirado en frío y picas verticales de acero recubierto de cobre	3,96	0,10%
	La totalidad del electrodo de acero recubierto de cobre	3,97	0,45%
	Conductores de acero recubierto de aluminio y picas de acero galvanizado	3,98	0,56%
	Conductores de acero inoxidable 304 y picas de acero inoxidable	4,17	5,58%
<b>Caso 6:</b> Malla S.E. Arbillera 400 kV L=6892,1 m	Resistencia interna no considerada	1,22	0,00%
	Conductor de cobre comercial estirado en frío	1,23	1,04%
	Conductor de acero recubierto de cobre	1,26	3,43%
	Conductor de acero recubierto de aluminio	1,28	4,97%
	Conductor de acero 1020	1,33	9,32%
	Conductor de acero inoxidable 304	1,73	41,93%

Para todos los casos estudiados, es necesario resaltar el aumento de la resistencia de *PaT* por el hecho de considerar la resistencia interna del electrodo. Este efecto es más notorio cuanto más grande o extenso es el electrodo.

Para electrodos de pequeño tamaño como los discutidos en los casos 1, 2 y 3 la sustitución del cobre por otros materiales puede considerarse insignificante su efecto sobre la resistencia de *PaT*. Sin embargo, el ahorro de costes puede ser interesante y adicionalmente hay que tener en cuenta su efecto disuasorio respecto a los robos.

Como ya se ha señalado anteriormente, para electrodos grandes, la sustitución del cobre por otros materiales puede ser crítica. En el caso 4, la sustitución del cobre por acero inoxidable 304 provoca un aumento de casi un 4% en la resistencia de *PaT* del electrodo siendo, en el caso 5, de casi el 6%. En el caso 6, cuyo electrodo es mucho más extenso que en el resto de los casos, el aumento al emplear el acero 1020 es superior al 9% llegando a ser casi un 42% si empleamos acero inoxidable 304.

En electrodos de gran tamaño, con el aumento tan elevado de la resistencia de *PaT*, se puede esperar que los potenciales de paso y contacto queden fuera de los límites máximos permitidos por la legislación aplicable. Este problema se puede corregir parcialmente rediseñando el electrodo, extendiendo los conductores y aumentando su diámetro para reducir la resistencia de *PaT*. También será necesario realizar un estudio comparativo de los costes involucrados por el cambio de material respecto del cobre.

### 3.3. Electrodo oxidados o con recubrimiento sin considerar su resistencia interna

En la referencia [24], publicada por el autor de esta tesis, pueden encontrarse algunos ejemplos en los que se comprueba la validez de las expresiones (34) y (35). El procedimiento de validación consiste en calcular la resistencia de  $PaT$  mediante la resolución numérica de (33) a fin de calcular el potencial del electrodo, para después comparar el resultado con el cálculo de dicho potencial considerando el mismo electrodo, pero con las varillas oxidadas sustituidas por varillas limpias con un radio igual al radio equivalente de electrodo recubierto o “Coated Electrode Equivalent Radius” (*CEER*). Téngase en cuenta que la mayor contribución al potencial de un electrodo proviene del potencial creado en cada segmento por su propio elemento de corriente. Cuanto menor (mayor) sea el radio del segmento, mayor (menor) será el potencial creado por este, incrementando (disminuyendo) así la resistencia de  $PaT$ .

En los siguientes apartados se muestran algunos ejemplos de aplicación del *CEER*.

#### 3.3.1. Oxidación en malla S.E. Balaidos

Tomemos como primer ejemplo la malla de la subestación de Balaidos enterrada a una profundidad de 0,8 m en un terreno homogéneo de resistividad  $\rho = 50 \Omega \cdot m$  y supongamos una gran parte de ella está afectada por una capa de óxido. Para ser más precisos, supondremos que los conductores afectados, los cuales en origen eran conductores de cobre de 7 mm de radio, han quedado reducidos a un núcleo metálico de 5 mm de radio y una capa de material degradado de 2 mm de espesor y resistividad  $\rho_{ox} = 1000 \Omega \cdot m$ . El radio equivalente de estos conductores aplicando la ecuación (34) es  $r_{eq} = 8,4 \cdot 10^{-6} m$ .

Si los conductores afectados por la oxidación son los que aparecen en color negro en la *Figura 3.10*, el cálculo de la resistencia de  $PaT$  tomando una segmentación de 10 segmentos por metro, da un resultado de  $R_{ox}=1,43 \Omega$ .

La misma malla sin oxidar en el mismo terreno y con la misma segmentación tendría una resistencia de  $R = 1,37 \Omega$ . Nótese que este resultado es  $R = \rho \cdot k_R$  donde  $k_R = 0,0273 \Omega/\Omega \cdot m$ , parámetro de la malla de Balaidos introducido previamente en el apartado *3.1.1 Estimador de la resistencia de PaT - Malla S.E. Balaidos*.

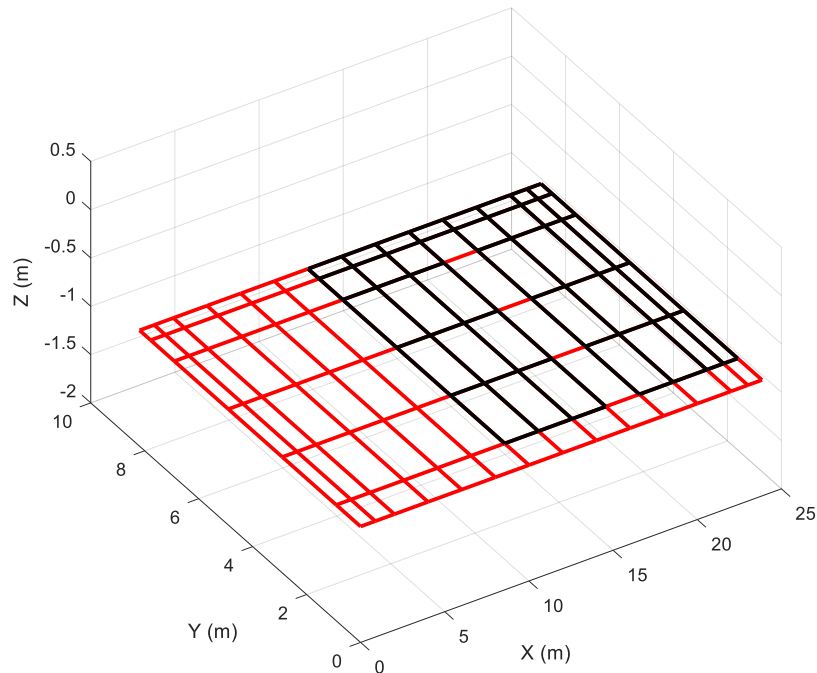


Figura 3.10: Malla de la S.E. Balaidos parcialmente afectada por oxidación

### 3.3.2. Recubrimiento de electrodo en apoyo de línea eléctrica aérea

Como segundo ejemplo de aplicación del *CEER* vamos a estudiar un electrodo de *PaT* comúnmente empleado en apoyos de líneas eléctrica aéreas según la *Figura 3.6*.

Es frecuente encontrar que los apoyos de las líneas eléctricas aéreas deben ser colocados en suelos que presentan una elevada resistividad. En estos casos, la resistencia de *PaT* suele alcanzar valores demasiado elevados para cumplir con los requisitos reglamentarios de seguridad. Es necesario reducir la resistencia de *PaT* y para ello existen varias estrategias. Se puede aumentar la extensión del electrodo y al mismo tiempo incrementar el diámetro de los conductores. O bien, recubrir el electrodo del diseño original con un material de muy baja conductividad para así reducir el potencial. Esta última actuación es la que puede ser cuantificada mediante el uso del *CEER*.

El electrodo de *PaT* de la *Figura 3.6* consiste en un anillo cuadrado de 2,6 m de lado formado por conductores desnudos de sección transversal  $50 \text{ mm}^2$  ( $r_c=3,989 \text{ mm}$ ), enterrados a una profundidad de 0,65 m con 4 picas verticales de 1,5 m de largo y misma sección que los conductores, instaladas en cada una de las esquinas. El electrodo está enterrado en un suelo con una resistividad muy alta de  $\rho = 1000 \Omega \cdot \text{m}$ . Para disminuir la resistencia de *PaT* del electrodo, es necesario cubrir

parcialmente algunos de los electrodos con un material de muy baja resistividad  $\rho_{ox} = 2,5 \Omega \cdot m$ . Supondremos que la capa de material tiene un espesor de  $e = 2 \text{ cm}$ , resultando un radio equivalente para los conductores y las picas recubiertas  $r_{eq} = 23,88 \text{ mm}$  según la ecuación (35).

En la *Figura 3.11* pueden verse los electrodos recubiertos del material en color negro. El cálculo de la resistencia de *PaT* con el electrodo desnudo ideal da un valor de  $R = 124,85 \Omega$ , mientras que, con el recubrimiento parcial, este valor se reduce a  $R_{ox} = 111,75 \Omega$ , lo que supone más de un 10% de reducción de la resistencia de *PaT*.

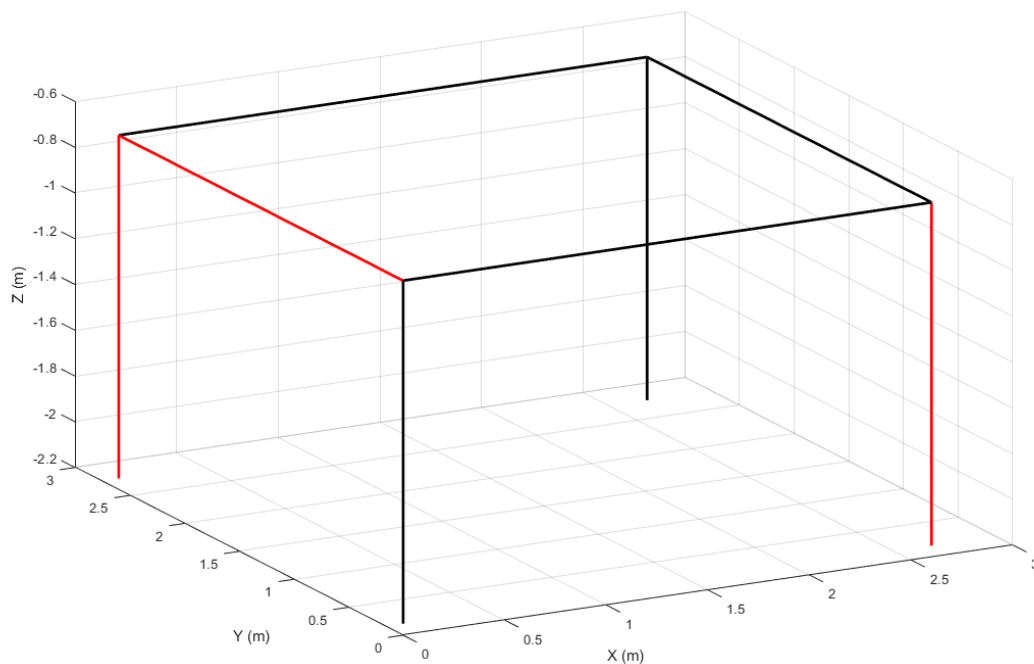


Figura 3.11: Electrodo de *PaT* típico en apoyo de línea eléctrica aérea mostrando en color negro las partes recubiertas

### 3.4. Electrodo con resistencia interna no despreciable y con oxidación o recubrimiento

En esta sección, el modelo presentado en las secciones 2.3 “Modelo de electrodo con resistencia interna” y 2.4 “Modelo con oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos” se aplicará para calcular la resistencia de  $PaT$  y el potencial en la superficie del terreno por encima de los electrodos en cinco ejemplos de aplicación de forma similar a los ejemplos divulgados por el autor de esta tesis en las siguientes aportaciones derivadas de la misma:

- [27] "A Fast Calculation of Partially Corroded, Grounding-Resistive Electrode Electrical Parameters", November 2022.  
<https://doi.org/10.3390/app122312243>.
- [55] "Electrical characterization of partially corroded grounding resistive-electrodes under fault condition", ICEME 2022 - 2. Interdisciplinary Conference on Mechanics, Computers and Electrics, 06-07 October 2022, Barcelona - Spain.  
<https://oa.upm.es/83093/>

El software utilizado en los cálculos, basado en Matlab, y desarrollado por el autor de esta tesis, incluye todos los elementos necesarios para obtener parámetros relevantes en los electrodos de  $PaT$ . Las entradas necesarias son el perfil geométrico y los parámetros de los conductores (radio y resistividad eléctrica del material de cada electrodo), junto con las características eléctricas del suelo (resistividad). Además, es necesario especificar el espesor de la capa de oxidación o recubrimiento y el valor de la resistividad de dicha capa. En todos los cálculos, se asume que la capa de óxido o recubrimiento tiene un espesor constante y afecta a ramas completas de la estructura del electrodo. El software utilizado permite especificar el espesor del óxido o recubrimiento segmento por segmento de cada rama del electrodo para una mejor adaptación a situaciones reales.

### 3.4.1. Varilla horizontal parcialmente corroída

Para ilustrar la aplicación del modelo con resistencia interna y con oxidación o recubrimiento de los electrodos, comenzaremos examinando un escenario que involucra una varilla horizontal. La varilla tiene una longitud  $L = 40$  m y un radio inicial  $r_c = 5$  mm. Está enterrada a una profundidad de 0,5 m debajo de la superficie de un suelo homogéneo o monocapa con una resistividad  $\rho = 100 \Omega \cdot m$ . Además, la mitad de la superficie de la varilla está cubierta con una capa de material conductor, con una resistividad  $\rho_{ox} = 500 \Omega \cdot m$  y un espesor  $e = 1,5$  mm. El material de la propia varilla tiene una resistividad eléctrica interna  $\rho_e = 7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ . El punto de inyección de corriente está situado en un extremo de la varilla, y se aplica una corriente de falta de 1 A. La varilla se segmenta en 30 trozos por metro. La *Figura 3.12* muestra un gráfico de contorno de los potenciales en el suelo o “Ground Potential Rise” (*GPR*) generado por la varilla resistiva cubierta parcialmente, ilustrando perfiles de contorno distintos en cada mitad de la varilla.

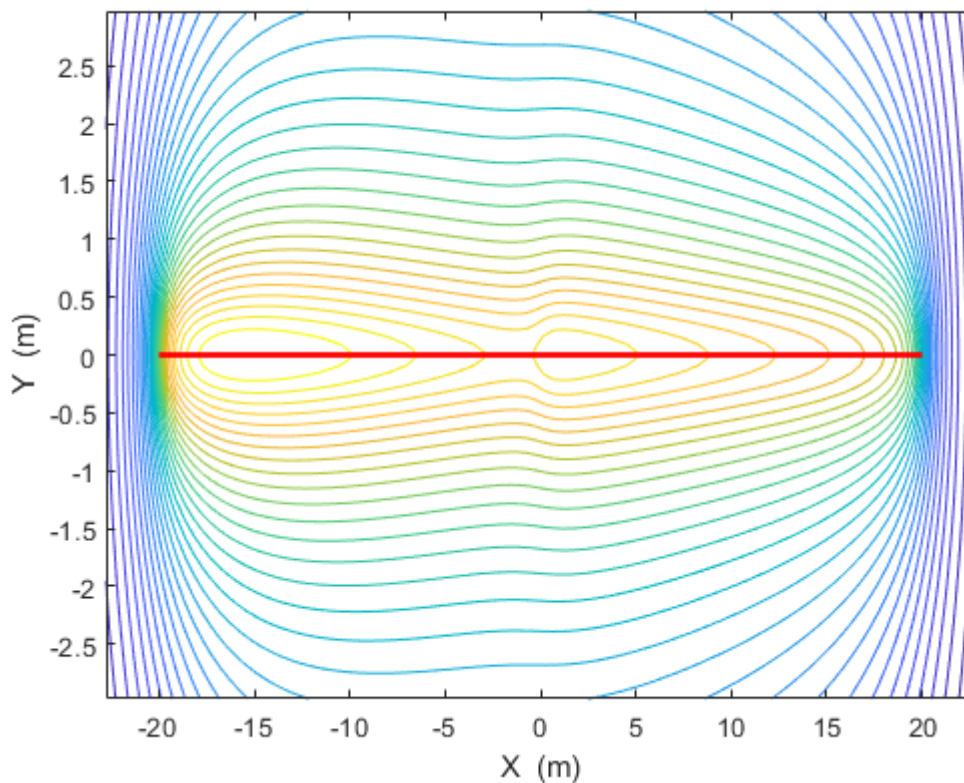


Figura 3.12: Curvas de nivel que representan la elevación del potencial del suelo (*GPR*) sobre la varilla

Para facilitar una comparación entre el electrodo ideal y el real, se proporciona la *Figura 3.13*.

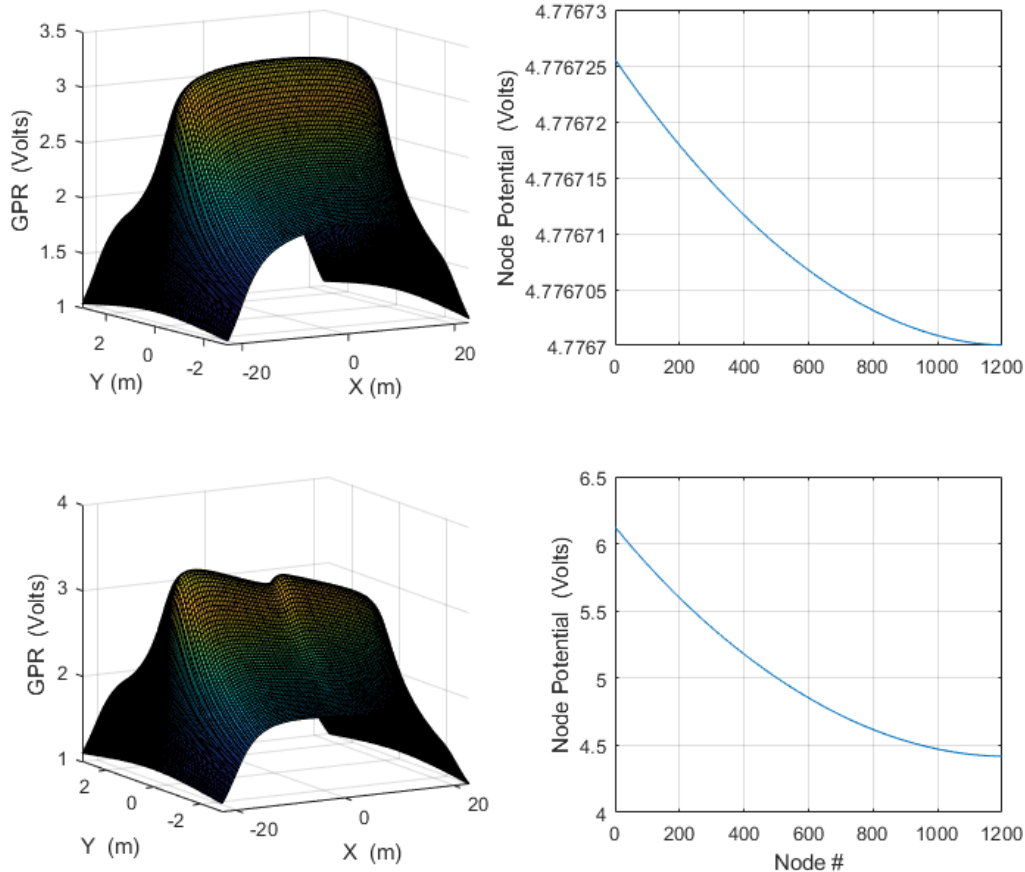


Figura 3.13: Paneles superiores: varilla horizontal ideal. Paneles inferiores: varilla horizontal resistiva y recubierta de óxido.

En el panel superior izquierdo de la *Figura 3.13*, se ilustra una gráfica que muestra el *GPR* generado por la varilla horizontal ideal, sin tener en cuenta ni la resistencia interna ni la oxidación, en la superficie del suelo. En el panel derecho, se muestran los potenciales en los nodos que conectan los 1200 segmentos que forman la varilla, indicando un potencial relativamente constante a lo largo de la longitud de la varilla horizontal ideal.

En los paneles inferiores, se presentan los resultados para la misma varilla, ahora considerando tanto la resistencia interna como la influencia del recubrimiento de óxido en la mitad de su longitud. Aquí se observa un gradiente de potencial

significativo a lo largo de la varilla junto con un perfil de potencial distinto en la superficie del suelo que resalta la disparidad entre las dos mitades de la varilla.

Adicionalmente, en la *Tabla 3.4* se muestran los valores de la resistencia de *PaT* de la varilla para el modelo de electrodo ideal, para el modelo de electrodo considerando la resistencia interna sin oxidación y para el modelo de electrodo considerando ambos efectos, la resistencia interna y la oxidación.

Tabla 3.4: Resistencia de *PaT*– Varilla horizontal

Tipo de modelo	Resistencia <i>PaT</i> ( $\Omega$ )	Incremento resistencia <i>PaT</i> respecto electrodo ideal (%)
Electrodo ideal o <i>PEC</i>	4,78	0,0%
Electrodo con resistencia interna y sin oxidación	5,87	22,9%
Electrodo con resistencia interna y con oxidación	6,12	28,2%

Los valores de resistencia de *PaT* mostrados en la *Tabla 3.4* ponen de manifiesto la importancia de disponer de un modelo que tenga en consideración la resistencia interna de la varilla pues el incremento de resistencia de *PaT* debido a esta circunstancia no se puede considerar despreciable siendo aproximadamente un 23%. Por otro lado, la oxidación parcial de la varilla supone un incremento adicional del 5% en la resistencia de *PaT*, resultando el incremento total debido a ambos efectos (resistencia interna + oxidación) de aproximadamente un 28%.

### 3.4.2. Sistema de PaT en apoyo de línea eléctrica aérea

En el siguiente ejemplo de aplicación se va a considerar un electrodo de *PaT* comúnmente empleado en apoyos de líneas eléctrica aéreas según la *Figura 3.6* del apartado *3.2.1 “Caso 1: Apoyo línea eléctrica aérea”*. El sistema de *PaT* está formado por un anillo cuadrado de 2,6 m de lado de conductores desnudos de sección transversal 50 mm<sup>2</sup> ( $r_c=3,989$  mm), enterrados a una profundidad de 0,65 m con 4 picas verticales de 1,5 m de largo y misma sección que los conductores, instaladas en cada una de las esquinas. Tanto los conductores como las picas tienen una resistividad eléctrica interna  $\rho_e = 72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  correspondiente al acero inoxidable (“stainless steel 304” según [11]). El electrodo está enterrado en un suelo con una resistividad muy alta de  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$ . Para disminuir la

resistencia de  $PaT$  del electrodo, es necesario cubrir parcialmente algunos de los electrodos con un material de muy baja resistividad  $\rho_{ox} = 2,5 \Omega \cdot m$ . En este caso, se asumirá que la capa de material tiene un espesor de  $e = 2 \text{ cm}$ .

La *Figura 3.14* muestra un gráfico de contorno de los potenciales en el suelo o “Ground Potential Rise” ( $GPR$ ) generado por el sistema de  $PaT$  del apoyo. Los electrodos recubiertos de material con baja resistividad se representan en color negro.

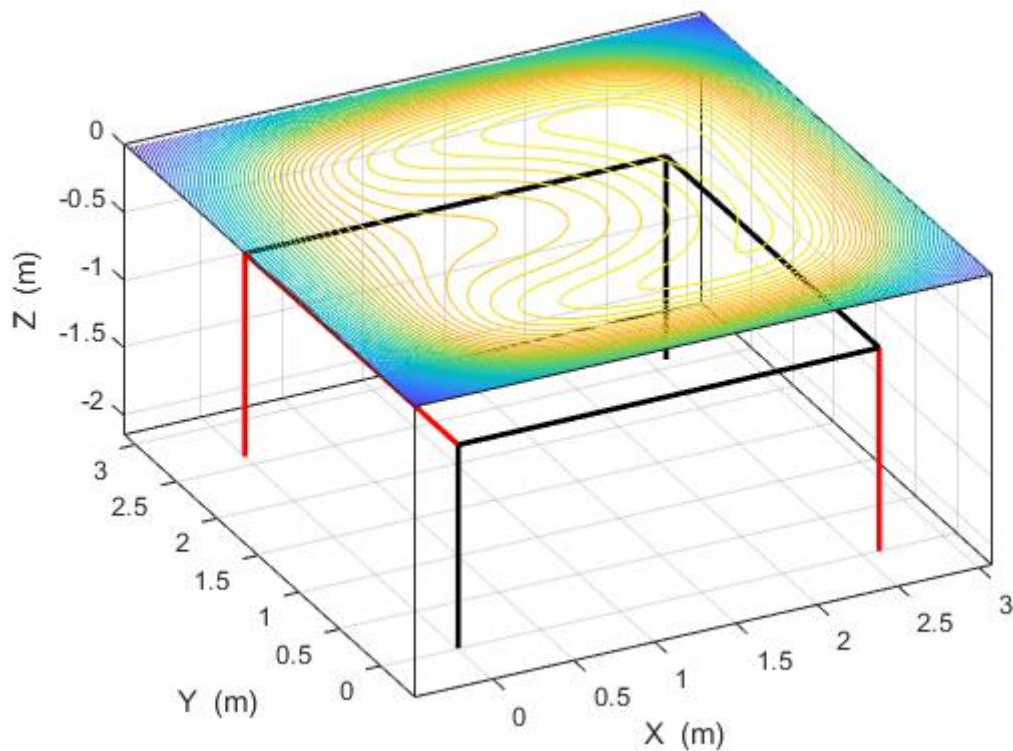


Figura 3.14: Curvas de nivel que representan la elevación del potencial del suelo ( $GPR$ ) sobre el sistema de  $PaT$  del apoyo

Al igual que en el ejemplo del apartado 3.4.1 “*Varilla horizontal parcialmente corroída*”, la *Figura 3.15* muestra las diferencias entre considerar el sistema de  $PaT$  del apoyo formado por electrodos o conductores ideales sin resistencia interna ( $PEC$ ) y sin considerar el recubrimiento de algunos de ellos (paneles superiores), y el caso real en el que ambas consideraciones se incorporan al cálculo de la resistencia de  $PaT$  (paneles inferiores).

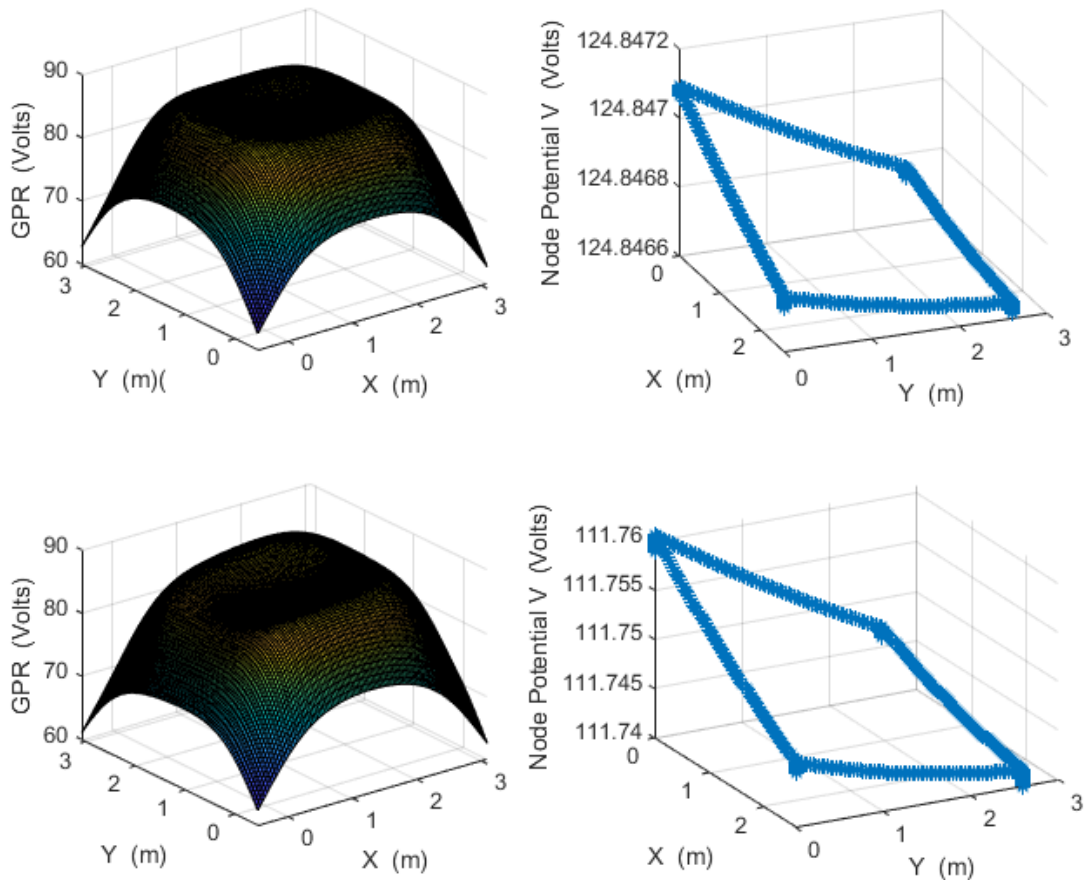


Figura 3.15: Paneles superiores: Sistema de PaT del apoyo considerando los electrodos ideales. Paneles inferiores: Sistema de PaT del apoyo considerando los electrodos con resistencia interna y recubiertos de material de baja resistividad

Observando la [Figura 3.15](#) cabe destacar que no hay diferencias significativas en el potencial de los nodos en el electrodo real, principalmente porque la resistencia interna no es muy alta y el electrodo es relativamente pequeño en tamaño.

Para este caso se puede lograr una reducción de aproximadamente el 10% en la resistencia de *PaT* como se puede observar en la [Tabla 3.5](#) donde se muestran los valores de la resistencia de *PaT* del apoyo para el modelo de electrodo ideal o *PEC*, para el modelo de electrodo considerando sólo la resistencia interna y para el modelo de electrodo considerando ambas consideraciones (la resistencia interna y el recubrimiento).

Tabla 3.5: Resistencia de *PaT*– Apoyo línea eléctrica aérea

Tipo de modelo	Resistencia <i>PaT</i> ( $\Omega$ )	Incremento resistencia <i>PaT</i> respecto electrodo ideal (%)
Electrodo ideal o <i>PEC</i>	124,85	0,0%
Electrodo con resistencia interna y sin recubrimiento	124,97	0,1%
Electrodo con resistencia interna y con recubrimiento	111,76	-10,5%

### 3.4.3. Sistema de PaT del centro de transformación situado en área industrial

En este tercer ejemplo de aplicación se va a considerar un electrodo de *PaT* asociado a un centro de transformación dentro de un polígono industrial. El electrodo está compuesto por un conductor desnudo en forma de anillo rectangular y cuatro picas verticales en las esquinas según la *Figura 3.7* del apartado 3.2.2 “*Caso 2: Centro de transformación en edificio en área industrial*”. El suelo en el que se entierra se considera uniforme de resistividad  $\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$ . El electrodo se compone de conductores horizontales de cobre estirado en frío con una resistividad eléctrica interna  $\rho_e = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (“copper hard-drawn” según [11]) y de picas verticales de acero recubierto de cobre con una resistividad eléctrica interna de  $\rho_e = 5,86 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (“copper-clad steel” según [11]). Algunos de los conductores y picas están afectados por una capa de corrosión de espesor  $e = 2\text{mm}$  a lo largo de toda su longitud con una resistividad  $\rho_{ox} = 1000 \Omega \cdot \text{m}$ .

La *Figura 3.16* muestra el electrodo con las partes oxidadas en color negro junto a una representación del potencial en el suelo en forma de diagrama de contornos.

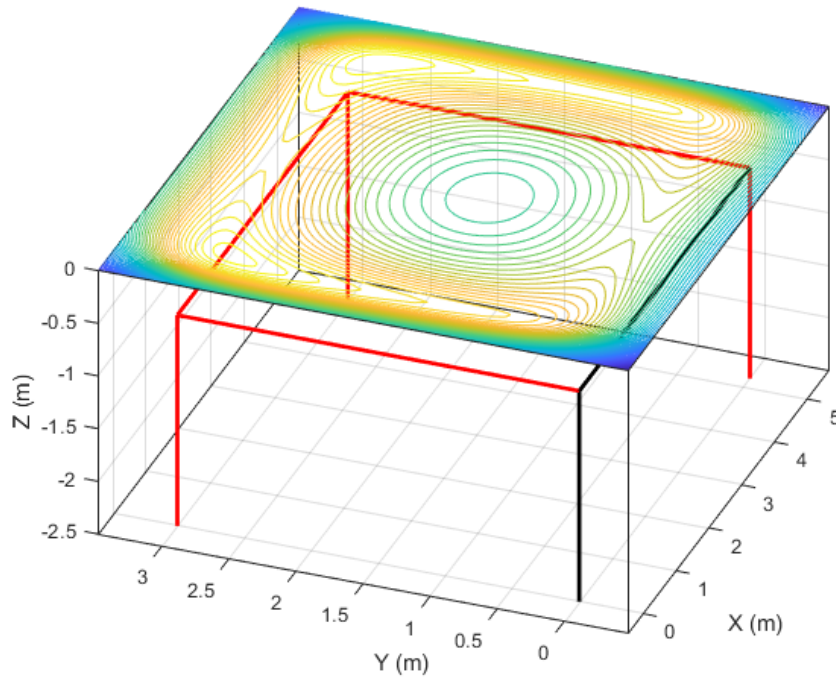


Figura 3.16: Curvas de nivel del potencial en el suelo por encima del electrodo de *PaT* del centro de transformación situado en área industrial

La *Figura 3.17* muestra un perfil del potencial en el suelo sobre el electrodo en forma de imagen tridimensional.

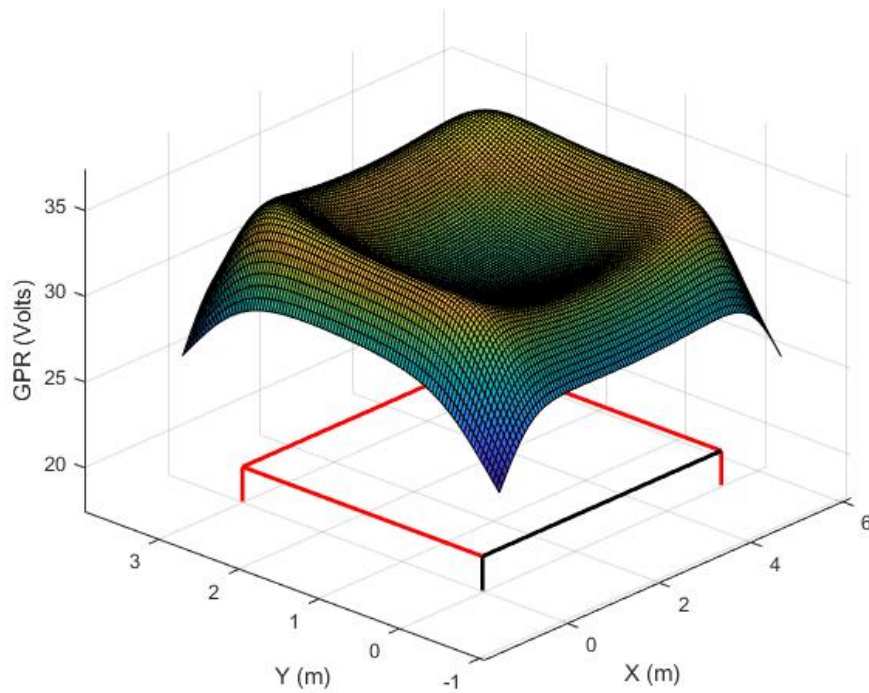


Figura 3.17: Gráfico de superficie 3D del potencial en el suelo por encima del electrodo de *PaT* del centro de transformación situado en área industrial

La resistencia de  $PaT$ , teniendo en cuenta la resistencia interna de los electrodos, pero sin considerar las partes oxidadas resulta ser de  $44,78 \Omega$  según *Tabla 3.3* del apartado 3.2.6 “Resultados del cálculo de la resistencia de  $PaT$  considerando la resistencia interna de los electrodos sin oxidación ni recubrimiento” mientras que teniendo en cuenta la oxidación, el resultado es  $47,30 \Omega$ , más de un 5% superior.

En la *Tabla 3.6* se muestran los valores de la resistencia de  $PaT$  del sistema de  $PaT$  del centro de transformación situado en área industrial para el modelo de electrodo ideal o  $PEC$ , para el modelo de electrodo considerando sólo la resistencia interna y para el modelo de electrodo considerando la resistencia interna y la oxidación.

Tabla 3.6: Resistencia de  $PaT$ – Centro de transformación situado en área industrial

Tipo de modelo	Resistencia $PaT$ ( $\Omega$ )	Incremento resistencia $PaT$ respecto electrodo ideal (%)
Electrodo ideal o $PEC$	44,77	0,0%
Electrodo con resistencia interna y sin oxidación	44,78	0,0%
Electrodo con resistencia interna y con oxidación	47,30	5,7%

#### 3.4.4. Sistema de $PaT$ del centro de transformación de un edificio residencial

Como cuarto ejemplo de aplicación, se va a estudiar el electrodo de  $PaT$  del centro de transformación de un edificio residencial. Tales instalaciones generalmente están situadas en áreas urbanas, por lo que es necesario poner especial cuidado en su diseño. La *Figura 3.8* del apartado 3.2.3 “Caso 3: Centro de transformación en interior de edificio residencial” ilustra un ejemplo de este tipo de instalaciones.

El suelo se considera uniforme y la resistividad se fija en  $\rho = 500 \Omega \cdot m$ . El electrodo de  $PaT$  está hecho de conductores horizontales de acero recubierto de aluminio (“aluminium-clad steel” según [11]) con una resistividad eléctrica interna  $\rho_e = 8,48 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  y cuatro picas verticales de acero galvanizado con una resistividad eléctrica interna  $\rho_e = 20,1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  (“zinc-coated steel” según [11]). Algunos de los conductores están afectados por una capa de corrosión de  $e = 2$  mm de espesor a lo largo de toda su longitud con una resistividad  $\rho_{ox} = 1000 \Omega \cdot m$ . Esto se muestra en la *Figura 3.18*, donde, al igual que en los ejemplos anteriores, el color rojo indica

los conductores en buen estado y el negro los afectados por la corrosión. La corriente de falta se inyecta en el electrodo por su extremo más cercano a la instalación.

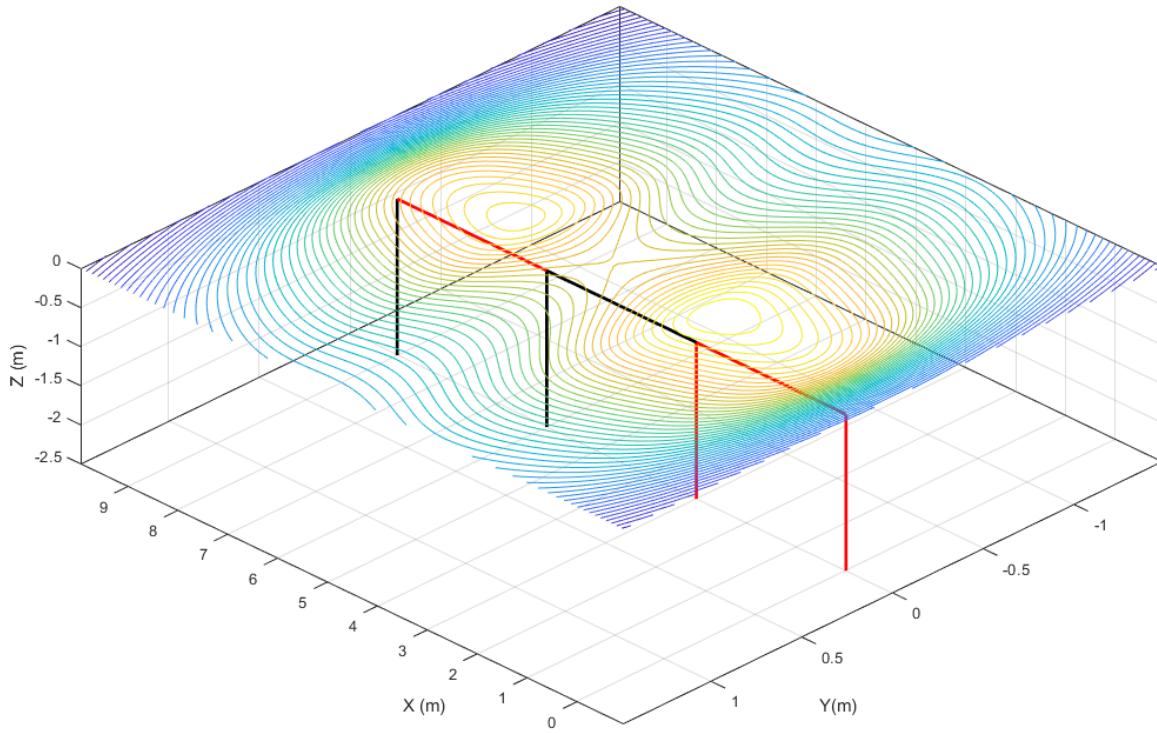


Figura 3.18: Curvas de nivel del potencial en el suelo por encima del electrodo de *PaT* del centro de transformación en edificio residencial

Como en los anteriores ejemplos, la *Figura 3.19* muestra el perfil 3D del potencial en el suelo por encima del electrodo de *PaT*.

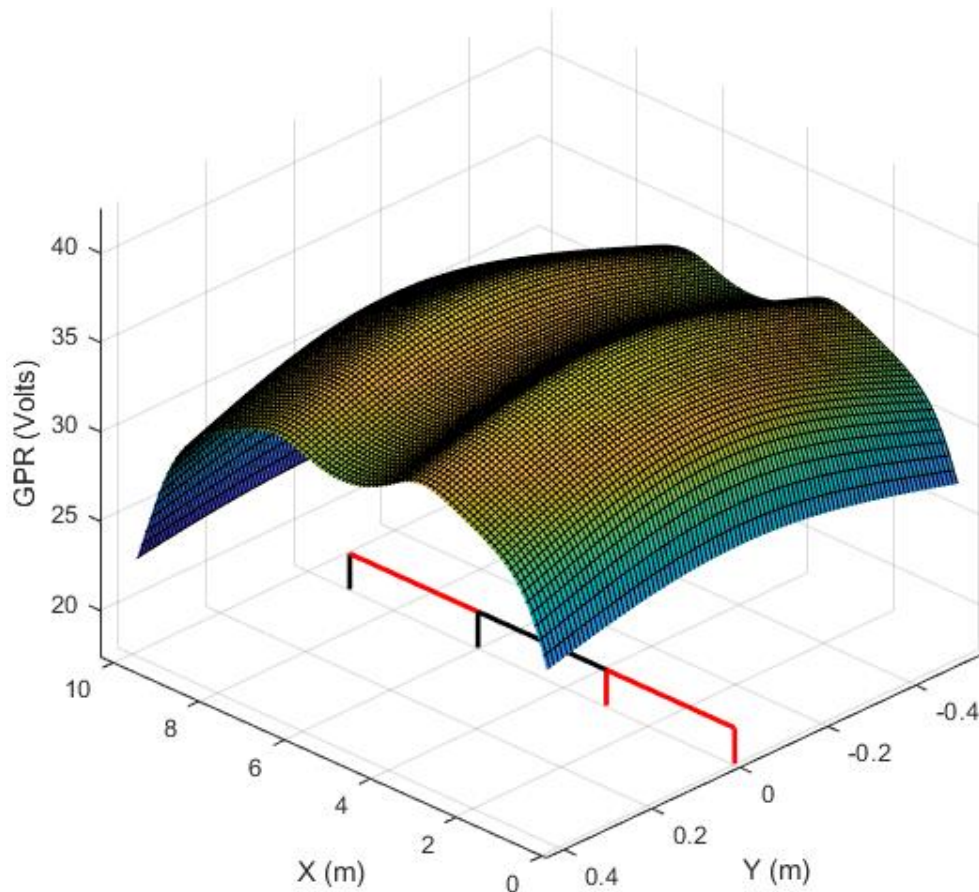


Figura 3.19: Gráfico de superficie 3D del potencial en el suelo por encima del electrodo de *PaT* del centro de transformación en edificio residencial

Si se emplea una segmentación de 30 trozos por metro, los cálculos muestran que el electrodo sin oxidar tiene una resistencia de *PaT* de  $51,65 \Omega$ , según *Tabla 3.3* del apartado 3.2.6 “*Resultados del cálculo de la resistencia de PaT considerando la resistencia interna de los electrodos sin oxidación ni recubrimiento*”, mientras que si se incluye el estado de oxidación esta se incrementa algo más de un 9% hasta alcanzar el valor de  $56,55 \Omega$ .

En la *Tabla 3.7* se muestran los valores de la resistencia de *PaT* del sistema de *PaT* del centro de transformación situado en edificio residencial para el modelo de electrodo ideal o *PEC*, para el modelo de electrodo considerando sólo la resistencia interna y para el modelo de electrodo considerando la resistencia interna y la oxidación.

Tabla 3.7: Resistencia de *PaT*– Centro de transformación en edificio residencial

Tipo de modelo	Resistencia <i>PaT</i> ( $\Omega$ )	Incremento resistencia <i>PaT</i> respecto electrodo ideal (%)
Electrodo ideal o <i>PEC</i>	51,65	0,0%
Electrodo con resistencia interna y sin oxidación	51,65	0,0%
Electrodo con resistencia interna y con oxidación	56,55	9,5%

### 3.4.5. Sistema de PaT en subestación tipo intemperie

En la siguiente aplicación estudiaremos la malla de *PaT* típica de una subestación tipo intemperie de pequeño tamaño como el mostrado en la *Figura 3.9* del apartado 3.2.4 “Caso 4: Subestación tipo intemperie de pequeño tamaño”. El terreno se considera uniforme con una resistividad  $\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$ . Se introducirá una corriente de falta de 1A a través de una de sus esquinas. Los conductores de la malla se supondrá que están hechos de acero inoxidable con una resistividad eléctrica interna de  $\rho_e = 72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (“stainless steel 304” según [11]). A pesar del tipo de material empleado, se supondrá que la mitad del electrodo se encuentra superficialmente degradado u oxidado, de nuevo indicado por los electrodos de color negro en la *Figura 3.20*. Se supondrá que la porción de electrodo oxidada esta recubierta de una capa uniforme de material de espesor  $e = 2 \text{ mm}$  y resistividad  $\rho_{ox} = 800 \Omega \cdot \text{m}$ . Cada electrodo se segmenta en 5 trozos por metro.

La *Figura 3.20* ilustra la elevación de los potenciales en el suelo o “Ground Potential Rise” (*GPR*) generado por la malla resistiva recubierta una mitad por una capa de óxido. En este escenario, la resistividad interna es aproximadamente cuarenta veces mayor que la del cobre (“copper hard-drown” según [11]), que generalmente se considera como el estándar de referencia para un conductor ideal.

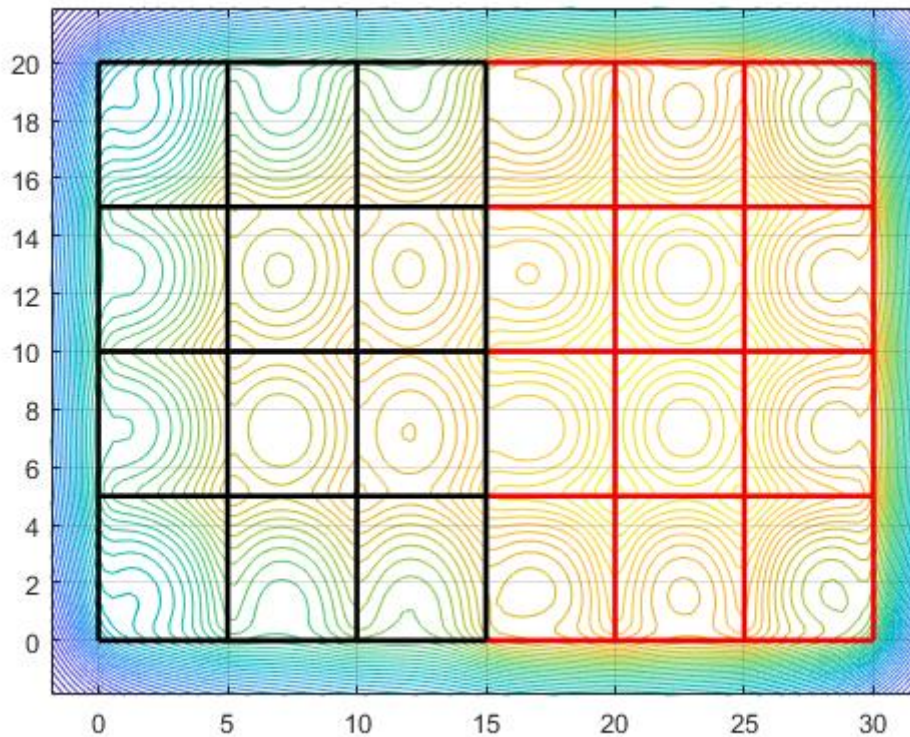


Figura 3.20: Diagrama de contorno que representa el GPR por encima de la malla de  $PaT$  de la subestación tipo intemperie

En el panel superior izquierdo de la *Figura 3.21*, se muestra el perfil de potenciales del suelo de la malla ideal. En el panel derecho, se presentan los potenciales de los nodos del electrodo ideal, demostrando que el electrodo es equipotencial. En los paneles inferiores, se representan los mismos parámetros, pero teniendo en cuenta la resistencia interna de los conductores y la oxidación parcial del electrodo. Se puede observar que el perfil de potencial en el suelo se altera en la mitad oxidada del electrodo, mientras que el potencial de los nodos exhibe un claro, aunque leve, gradiente.

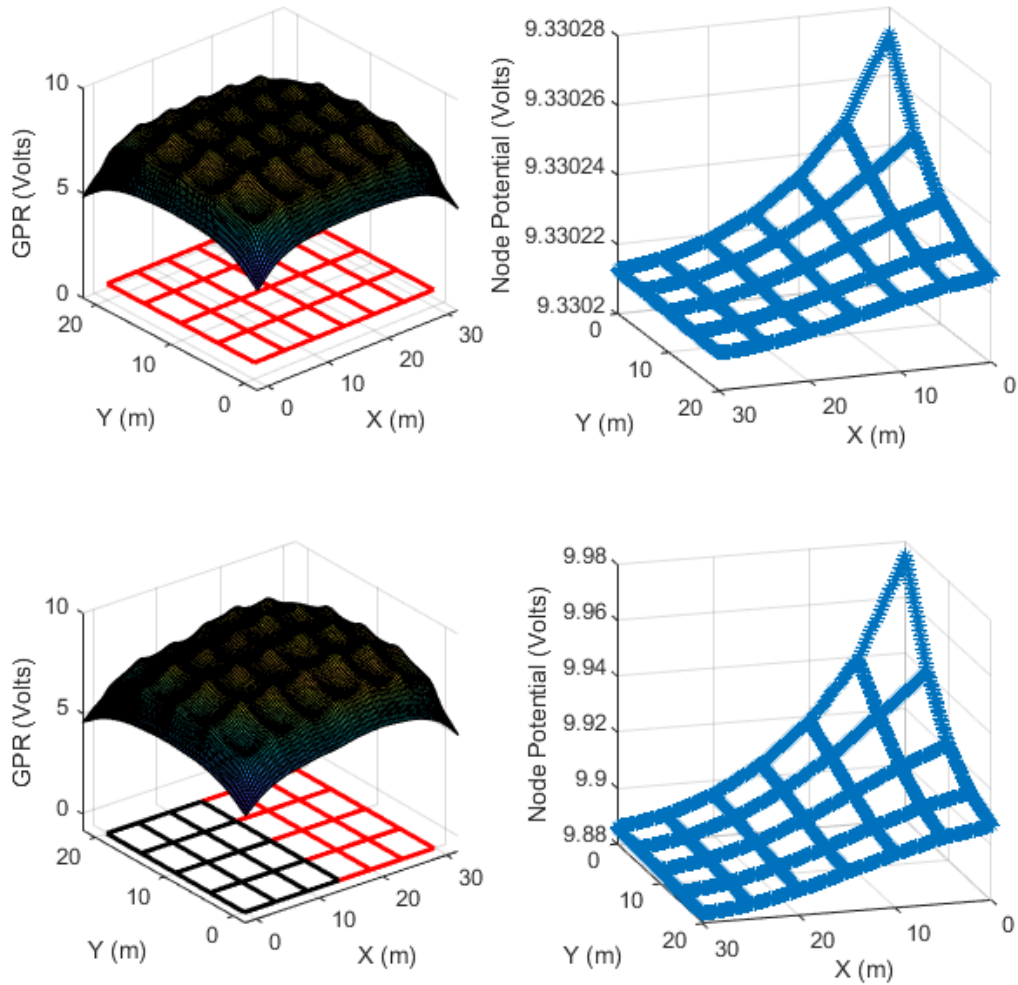


Figura 3.21: Paneles superiores: Malla ideal. Paneles inferiores: Malla con resistencia interna y parcialmente oxidada

Para resaltar las disparidades entre considerar el electrodo ideal y tener en cuenta todas las limitaciones, la [Figura 3.22](#) ilustra la diferencia porcentual en el perfil de potenciales del suelo entre los dos escenarios en el panel superior, mientras que el panel inferior muestra la diferencia porcentual en los potenciales de los nodos.

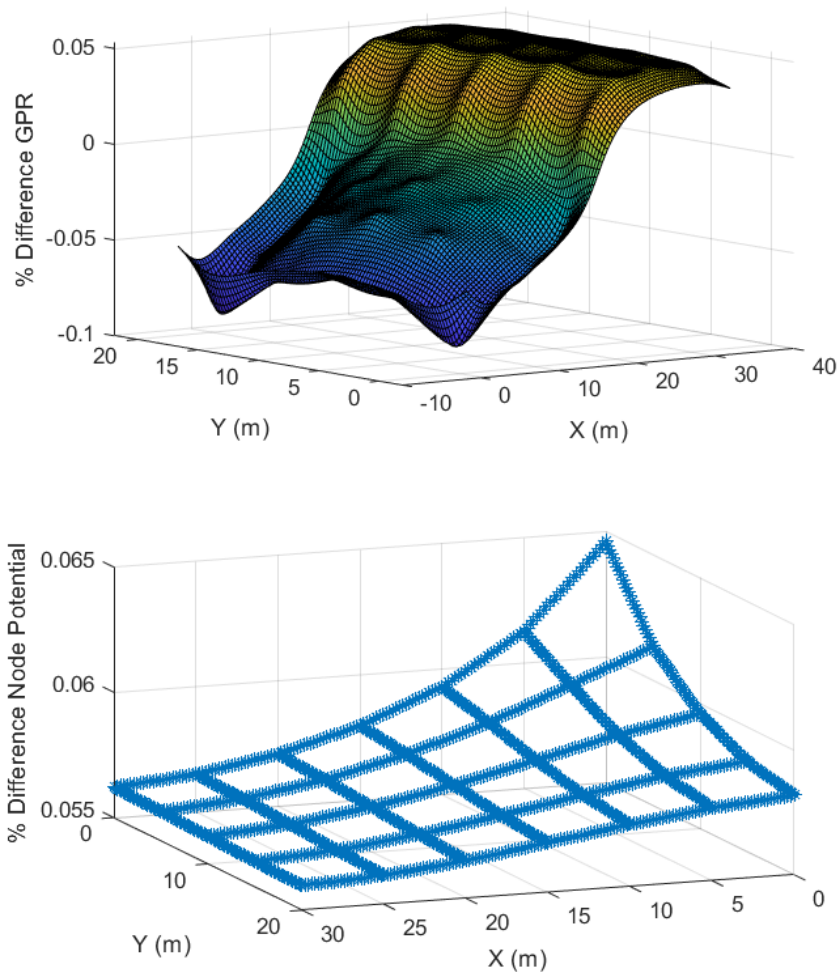


Figura 3.22: Error relativo en el GPR y en el potencial de los nodos al considerar una malla ideal y una malla real.

Como se muestra en la *Figura 3.22*, hay una discrepancia del orden del 7% en el potencial del nodo de inyección de corriente entre el electrodo ideal y el electrodo real. Esta diferencia, dado que la corriente de falta se establece en 1A, también corresponde a la diferencia porcentual en la resistencia de *PaT* de la malla según se muestra en la *Tabla 3.3*.

Los cálculos muestran que el electrodo considerando su resistencia interna pero sin oxidar tiene una resistencia de *PaT* de 9,68  $\Omega$ , según *Tabla 3.3* del apartado 3.2.6 “*Resultados del cálculo de la resistencia de PaT considerando la resistencia interna de los electrodos sin oxidación ni recubrimiento*”, mientras que si se incluye el estado de oxidación esta se incrementa aproximadamente un 3% adicional hasta alcanzar el valor de 9,97  $\Omega$ .

En la *Tabla 3.8* se muestran los valores de la resistencia de  $PaT$  del sistema de  $PaT$  de la subestación tipo intemperie para el modelo de electrodo ideal o  $PEC$ , para el modelo de electrodo considerando sólo la resistencia interna y para el modelo de electrodo considerando la resistencia interna y la oxidación.

Tabla 3.8: Resistencia de  $PaT$  – Subestación tipo intemperie

Tipo de modelo	Resistencia $PaT$ ( $\Omega$ )	Incremento resistencia $PaT$ respecto electrodo ideal (%)
Electrodo ideal o $PEC$	9,33	0,0%
Electrodo con resistencia interna y sin oxidación	9,68	3,8%
Electrodo con resistencia interna y con oxidación	9,97	6,9%



## 4. Determinación de la estructura eléctrica del suelo - Método Resistive Driven-Rod

En esta sección se describe la metodología para determinar la estructura eléctrica del suelo mediante el Método Resistive Driven-Rod (*RDR*) desarrollado por el autor de la tesis en la siguiente publicación:

- [23] "Grounding Electrodes with Internal Resistance: Application to Feasibility Study of the Driven-Rod Method for Modeling the Soil Electrical Resistivity Profile", <https://doi.org/10.3390/app11115032>.

En los cálculos que se describirán a continuación, una varilla se introduce verticalmente en un suelo multicapa y se mide la resistencia de  $PaT$  en función de la longitud de la varilla enterrada en el suelo. Según el Modelo Basado en Circuitos (*CBM*) introducido en el *Capítulo 2 "Fundamentos matemáticos y modelización"*, en su sección *2.3 "Modelo de electrodo con resistencia interna"*, cada rama de la varilla enterrada contribuye con una corriente de fuga al suelo y se generan potenciales eléctricos en sus extremos que deben ser determinados resolviendo la ecuación (29). La resistencia de  $PaT$  se puede calcular a partir del potencial adquirido por el punto de inyección de la corriente total, que generalmente es el extremo superior de la varilla. Este potencial depende de la resistencia interna de la varilla y del perfil de resistividad del suelo a través de su resistividad y el ancho de las diferentes capas. Estos parámetros del suelo se pueden encontrar mediante un procedimiento de minimización de la ecuación (36). Para trabajar en condiciones similares a las pruebas reales, es necesario discutir algunas consideraciones adicionales.

En primer lugar, es necesario comentar que, en muchos casos reales, la varilla introducida en el suelo está compuesta por segmentos de varilla de longitud fija ensamblados mediante pequeñas piezas de unión. Dichas piezas de conexión proporcionan una resistencia de contacto entre las dos varillas que se unen, lo que convierte a toda la varilla en un conductor con resistencia interna no nula. Este hecho se modelará asociando una resistividad no nula a la pieza de conexión entre las varillas adyacentes, siendo las propias varillas conductores ideales. Cada vez que un segmento de varilla se ensambla con una pieza de unión y se introduce en el suelo, se mide la resistencia de  $PaT$  de toda la varilla. Por razones prácticas, los segmentos de varilla generalmente tienen un tamaño que varía entre 1m y 1,5m,

mientras que las piezas de conexión tienen una longitud de unos pocos centímetros. En algunos de los casos sintéticos que se estudiarán, se utilizarán segmentos de varilla de 0,5m, aunque este tamaño es en realidad ficticio.

## 4.1. Ejemplos sintéticos sin resistencia interna

### 4.1.1. Ejemplo sintético 1

Consideremos en primer lugar un ejemplo simulado en el cual la varilla no tiene resistencia interna. Supongamos un suelo ficticio de tres capas con los parámetros resistividad  $\rho_1 = 100 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_3 = 300 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $h_1 = 2 \text{ m}$  y  $h_2 = 3 \text{ m}$ . Cada electrodo se segmenta en 5 trozos por metro donde una varilla vertical de resistencia cero y radio de 9 mm se introduce en el suelo desde 0,5 m hasta 8 m de profundidad. Se asume que la varilla está hecha de una sola pieza continua que se introduce en segmentos de 0,5 m en el suelo. Por cada 0,5 m de perforación, se calcula la resistencia de *PaT* asumiendo que es un valor obtenido en una medición de campo utilizando el método de la caída de potencial. La *Tabla 4.1* muestra los resultados donde  $L$  está en metros y  $R$  está en ohmios.

Tabla 4.1: Ejemplo sintético 1: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y la resistencia de *PaT* correspondiente  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$R$ ( $\Omega$ )	139,90	80,67	57,79	44,68	31,74	25,52	21,66	19,05
$L$ (m)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$R$ ( $\Omega$ )	17,18	15,97	15,76	15,54	15,31	15,07	14,85	14,62

A partir de los datos de la *Tabla 4.1*, se ejecuta un algoritmo de minimización basado en MatLab utilizando la rutina `fminsearch`, donde la función objetivo es la ecuación (36). Los parámetros del modelo obtenidos del procedimiento de minimización son  $\rho_1 = 99,01 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2 = 49,79 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_3 = 292,45 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $h_1 = 2,03 \text{ m}$  y  $h_2 = 2,94 \text{ m}$ .

La *Figura 4.1* muestra con marcadores de diamante los valores de la *Tabla 4.1*. La línea continua roja, etiquetada como *Calculated 1*, representa la resistencia de *PaT* calculada a partir de la solución óptima obtenida, mientras que la línea azul discontinua, etiquetada como *Calculated 2*, muestra la resistencia de *PaT* calculada a partir de los parámetros reales del suelo. La subfigura en la *Figura 4.1*

representa el error porcentual  $\epsilon_R = (R_{true} - R_{calc})/R_{true}$  en el cálculo de la resistencia de  $PaT$  utilizando el modelo de suelo estimado, donde  $R_{true}$  es la resistencia de  $PaT$  del modelo de suelo real, mientras que  $R_{calc}$  es la resistencia de  $PaT$  calculada a partir del modelo de suelo obtenido mediante el método de la varilla hincada o “Driven-Rod” ( $DR$ ).

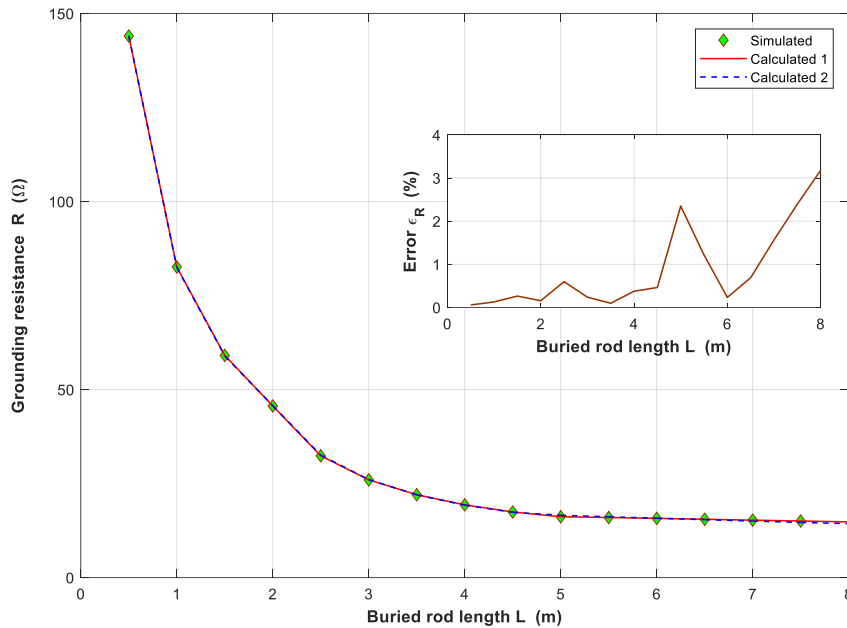


Figura 4.1: Ejemplo sintético 1: Resistencia de  $PaT$  simulada y calculada

### 4.1.2. Ejemplo sintético 2

Aunque en el apartado 4.1.1 “Ejemplo sintético 1” se han utilizado dieciséis datos simulados en este segundo ejemplo sintético, es posible recuperar la estructura del suelo con muchos menos datos.

Consideremos otro ejemplo de suelo sintético con  $\rho_1 = 50 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 200 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 10 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2 m$  y  $h_2 = 3 m$ . Nuevamente, asumiremos que se trata de una varilla con resistencia interna nula enterrada en el suelo, de 9 mm de radio. Como antes, se supone que la varilla está hecha de una sola pieza continua que se introduce en el suelo, pero en este experimento la resistencia de  $PaT$  se evalúa cada 1,5 m. Solo se calculan cinco resistencias de  $PaT$  correspondientes a cinco longitudes de electrodos enterrados. La *Tabla 4.2* recopila la resistencia de  $PaT$  simulada para las longitudes de varillas consideradas.

Tabla 4.2: Ejemplo sintético 2 con medidas cada 1,5m: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y la resistencia de  $PaT$  correspondiente  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5
$R$ ( $\Omega$ )	30,51	22,78	19,46	5,79	3,24

Los parámetros del modelo obtenidos a partir del procedimiento de minimización son  $\rho_1 = 49,47 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2 = 171,76 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_3 = 9,59 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $h_1 = 1,85 \text{ m}$  y  $h_2 = 3,22 \text{ m}$ , lo que muestra diferencias significativas con los valores del suelo real, especialmente en la capa intermedia. Sin embargo, los valores de la resistencia de  $PaT$  obtenidos para las cinco longitudes consideradas son muy cercanos a los valores reales.

La *Figura 4.2* muestra con marcadores de diamantes los valores de la *Tabla 4.2*. La línea continua roja, etiquetada como *Calculated 1*, representa la resistencia de  $PaT$  calculada a partir de la solución del procedimiento de minimización. La línea azul, etiquetada como *Calculated 2*, representa la resistencia de  $PaT$  calculada, pero utilizando la estructura real del suelo. Las diferencias entre la estructura del suelo estimada y la estructura real provienen del muestreo grueso del suelo al usar la resistencia de  $PaT$  de la varilla vertical hincada en saltos de 1,5 m de longitud. Este efecto es más evidente cuando hay grandes cambios en la resistividad entre capas. La línea continua roja en la subfigura, etiquetada como *E-Calculated 1*, representa el porcentaje de error  $\varepsilon_R = (R_{true} - R_{calc})/R_{true}$  en el cálculo de la resistencia de  $PaT$  usando el modelo de suelo estimado,  $R_{calc}$ , respecto de la resistencia de  $PaT$  usando el modelo de suelo real,  $R_{true}$ .

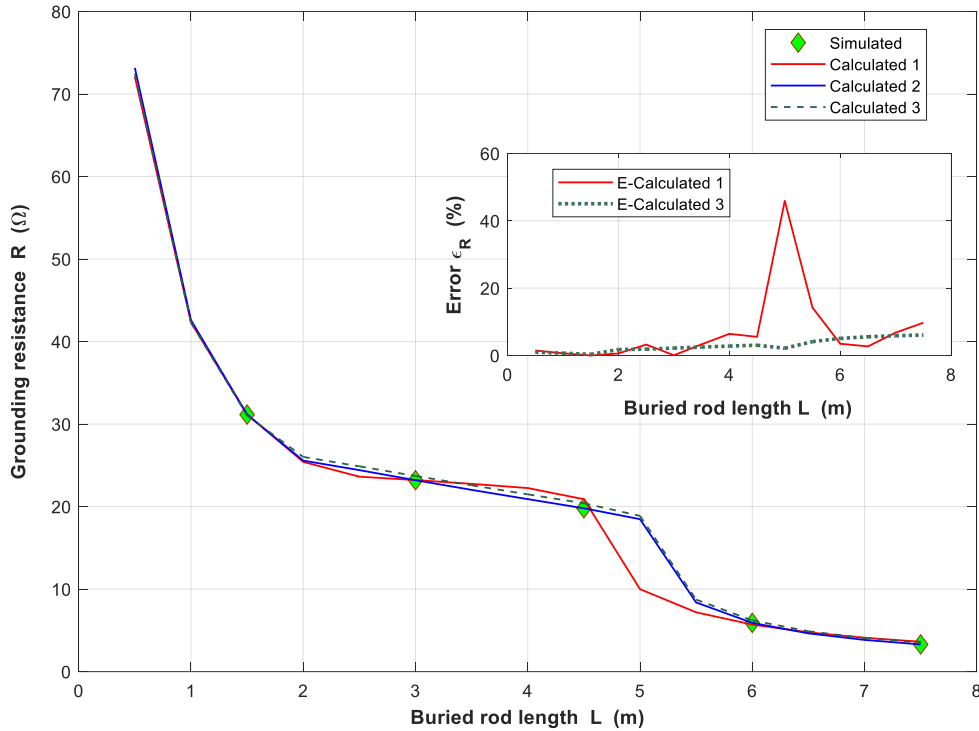


Figura 4.2: Ejemplo sintético 2: Resistencia de  $PaT$  simulada y calculada

Si ahora la resistencia de  $PaT$  se mide cada 0,5 m de varilla introducida en el suelo, se deben agregar nuevos datos a la *Tabla 4.2* para obtener la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3: Ejemplo sintético 2 con medidas cada 0,5m: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y la resistencia de  $PaT$  correspondiente  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$R$ ( $\Omega$ )	71,11	41,63	30,51	25,10	24,01	22,78	21,66	20,53
$L$ (m)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$R$ ( $\Omega$ )	19,46	18,12	8,21	5,79	4,55	3,77	3,24	2,85

El procedimiento de minimización aplicado a los datos de la *Tabla 4.3* da como resultado el conjunto de parámetros del suelo  $\rho_1 = 49,34 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 217,28 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 10,73 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 1,95$  m y  $h_2 = 3,02$  m, lo que da lugar a la línea punteada en verde y etiquetada como *Calculated 3* en la *Figura 4.2*. Se observa que la resistencia de  $PaT$  calculada por el nuevo modelo óptimo es muy cercana a la calculada por el modelo de suelo real, representada por la línea azul continua y etiquetada como *Calculated 2*, ya que los valores de los parámetros estimados del suelo son muy cercanos a los del suelo real. El error correspondiente  $\epsilon_R = (R_{true} -$

$R_{calc})/R_{true}$  para el nuevo modelo se muestra como *E-Calculated 3* en la subfigura de la *Figura 4.2*.

En conclusión, cuanto mayor sea la muestra de datos de la resistencia de *PaT*, mejor será la estimación de los parámetros del modelo de suelo mediante el método de la varilla hincada o “Driven-Rod” (*DR*).

## 4.2. Ejemplos sintéticos con resistencia interna no despreciable

En esta sección se realiza el estudio de un suelo simulado, pero teniendo en cuenta la resistencia interna de la varilla hincada, siendo esta la principal diferencia entre el método de la varilla hincada resistiva o Método Resistive Driven-Rod (*RDR*) respecto del método tradicional de la varilla hincada o método “Driven-Rod” (*DR*).

Se considerará nuevamente una varilla de 9 mm de radio con resistencia interna distinta de cero clavada en el suelo. Consideremos el suelo sintético  $\rho_1 = 100 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 200 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 40 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 3 m$  y  $h_2 = 1 m$ .

Para acercarnos a los datos reales que se utilizarán como prueba del método *RDR*, supongamos que se ensamblan secciones de 1,5 m de largo de una varilla de acero galvanizado de baja resistencia  $\rho = 13,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , como se muestra en la siguiente *Figura 4.3*.



Figura 4.3: Detalle de la unión entre secciones de la varilla

Supongamos también que el contacto imperfecto entre las piezas a lo largo de la unión de las varillas, que miden 2 cm de largo, equivale a una pequeña rama con una resistividad interna de  $1,27 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ . Este valor se ha estimado tras medir

la resistencia de un tramo de varilla de 1,5 m, obteniéndose un valor de 1,02 mΩ, y de dos tramos unidos, con valor 2,14 mΩ, lo que da como resultado una resistencia de contacto de 0,1 mΩ. Esta resistencia a lo largo de una longitud de 2 cm con un radio de 9 mm se logra con la resistividad interna de unión indicada anteriormente.

La resistencia de *PaT* de una varilla compuesta por  $N$  secciones de varilla de baja resistividad más  $N$  secciones de unión se mide cuando  $N$  varía de 1 a 6. Las mediciones simuladas se muestran en la *Tabla 4.4*.

Tabla 4.4: Ejemplo sintético con resistencia interna no nula y medidas cada 1,5 m: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y el valor de la resistencia de *PaT* asociada  $R$  (Ω)

$L$ (m)	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
$R$ (Ω)	56,85	32,17	19,65	11,81	8,65	6,88

El procedimiento de minimización de la ecuación (36) es algo más complicado ya que el perfil de resistencia calculado  $R_{calc}(L_j; \{\rho_1, \rho_2, \dots, h_1, h_2, \dots\})$  para un determinado conjunto de parámetros del suelo y para las diferentes longitudes de varilla  $L_j$  debe evaluarse teniendo en cuenta la resistividad interna de las diferentes piezas. El procedimiento de minimización aplicado a los datos de la *Tabla 4.4* da lugar al conjunto de parámetros estimados del suelo sintético  $\rho_1 = 99,72 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 159,50 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 37,71 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2,77$  m y  $h_2 = 1,33$  m.

Del mismo modo que en el ejemplo del apartado 4.1.2 “Ejemplo sintético 2”, para la capa intermedia se estiman valores significativamente diferentes de los reales. Como se mencionó anteriormente, este hecho está relacionado con el tamaño de las varillas, resultando un muestreo aproximado de la resistencia de *PaT*.

Refinando el muestreo utilizando varillas de baja resistencia de 0,5 m de longitud junto con los segmentos de unión, la resistencia de *PaT* simulada se muestra en la *Tabla 4.5*. Los parámetros estimados del suelo son  $\rho_1 = 99,99 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 201,32 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 40,01 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2,99$  m y  $h_2 = 1,02$  m, que se aproximan mucho a los valores reales tomados como punto de partida.

Tabla 4.5: Ejemplo sintético con resistencia interna no nula y medidas cada 0,5 m: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y el valor de la resistencia de  $PaT$  asociada  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
$R$ ( $\Omega$ )	137,09	79,20	56,86	44,76	37,15	32,17	29,94	27,36	19,60
$L$ (m)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
$R$ ( $\Omega$ )	15,92	13,52	11,80	10,50	9,47	8,64	7,95	7,37	6,88

La *Figura 4.4* muestra la resistencia de  $PaT$  de la varilla en función de la longitud enterrada para los datos de la *Tabla 4.4* (panel izquierdo) considerando tramos de varillas de 1,5 m y para los datos de la *Tabla 4.5* (panel derecho) considerando tramos de varillas de 0,5 m. Del mismo modo que en las figuras anteriores, los diamantes verdes corresponden a los datos de resistencia de  $PaT$  simulados a partir del perfil de resistividades del suelo real, mientras que la línea continua representa el perfil de resistencia de  $PaT$  calculado a partir de los parámetros calculados del suelo obtenidos por el procedimiento de minimización de la ecuación (36).

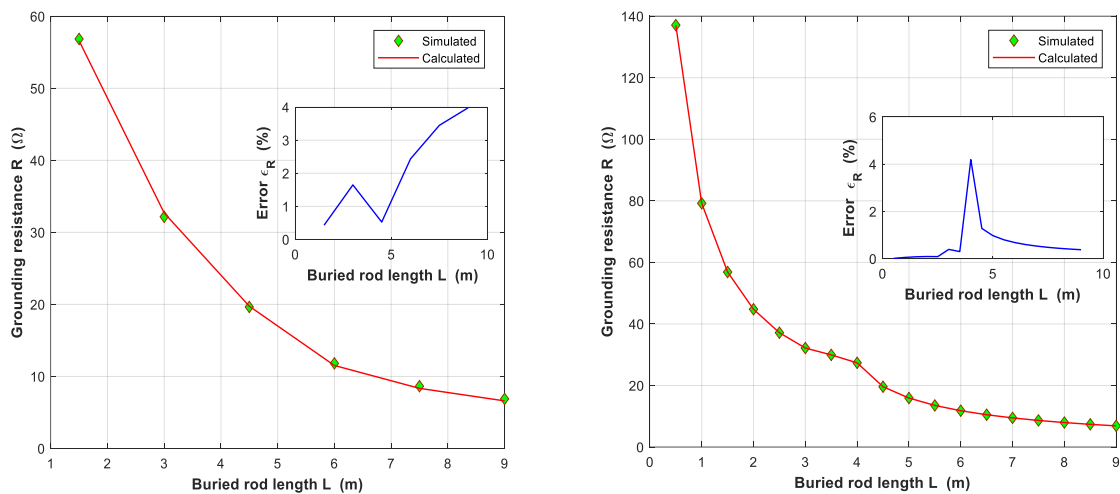


Figura 4.4: Resistencia de  $PaT$  vs longitud enterrada de una varilla compuesta por tramos de 1,5 m de longitud (panel izquierdo) y 0,5 m de longitud (panel derecho) unidos por segmentos resistivos

Aunque se trata del mismo suelo sintético, el perfil de resistencia a tierra presenta algunas características diferentes según el tipo de muestreo de medidas del suelo realizado. Un muestreo aproximado como el de la *Tabla 4.4*, representado en el panel izquierdo de la *Figura 4.4*, podría ocultar parte de la complejidad en el perfil de resistencia de *PaT*. En efecto, esto ocurre entre los valores 3m y 4,5m de profundidad pues el muestreo fino de la *Tabla 4.5*, como se muestra en el panel derecho de la *Figura 4.4*, revela una estructura de suelo diferente que se suaviza en el muestreo grueso del panel izquierdo de la *Figura 4.4*, lo que conduce a una estimación deficiente del perfil de resistividad del suelo. Como conclusión preliminar, se puede afirmar que, para obtener una buena aproximación del perfil de resistividad del suelo, es necesario un muestreo fino de la resistencia del suelo.

Con el fin de comparar el método *RDR* con el método Wenner, a partir de los parámetros del suelo sintético, se ha obtenido la resistividad aparente de un ensayo con separaciones entre electrodos iguales a las longitudes de varilla utilizadas en la *Tabla 4.4*. Luego se invierte el proceso y se obtienen los parámetros del suelo a partir del perfil de resistividad aparente. El resultado del proceso inverso con el método Wenner es  $\rho_1 = 99,99 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 183,32 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 39,94 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2,95 m$  y  $h_2 = 1,13 m$ , algo mejor que el obtenido con el presente método *RDR*.

Otro detalle por considerar es que con un muestreo fino se introduce un mayor número de uniones entre varillas y por tanto una mayor resistencia interna global en la longitud total de varilla enterrada. Como consecuencia, a medida que aumenta la longitud total de la varilla enterrada, la resistencia de *PaT* para una longitud dada es algo mayor en el muestreo fino que en el muestreo grueso.

### 4.3. Ejemplos reales con resistencia interna no despreciable

Hasta ahora, solo se han considerado perfiles de resistividad de terreno sintéticos para probar la viabilidad del método “Resistive Driven-Rod” (*RDR*) en la determinación de la estructura del suelo utilizando electrodos reales y procedimientos prácticos. A continuación, se analizarán algunos casos reales correspondientes a medidas de resistencia de *PaT* con muestreo grueso. Los datos han sido amablemente proporcionados por la empresa *INGESCO Lighting Solutions* (<https://www.ingesco.com/es>), ubicada en Terrassa, provincia de Barcelona, con fines académicos.

### 4.3.1. Suelo real en Girona

Se considera primero un caso real proveniente de la medición en un suelo ubicado en Girona, Cataluña. Se ensamblan cinco varillas de acero galvanizado de 1,5 m de largo y 9 mm de radio, como se describió anteriormente, y se introducen en el suelo pieza por pieza, midiendo cada vez la resistencia de  $PaT$  de la parte enterrada. Los resultados de las mediciones se muestran en la *Tabla 4.6*.

Tabla 4.6: Ejemplo suelo real Girona: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y la resistencia de  $PaT$  asociada  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5
$R$ ( $\Omega$ )	68,01	53,99	50,02	22,00	12,10

Los parámetros del modelo obtenidos con el método  $RDR$  mediante el procedimiento de minimización de la ecuación (36) son:  $\rho_1 = 105,78 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 943,53 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 36,71 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2,01$  m y  $h_2 = 3,25$  m.

La *Figura 4.5* muestra, utilizando marcadores en forma de diamante, los valores de la *Tabla 4.6*. La línea continua roja representa la resistencia de  $PaT$  calculada a partir de los datos del terreno obtenidos con el método  $RDR$ . En la subfigura, el error porcentual se define como  $\epsilon_R = (R_{meas} - R_{estim})/R_{meas}$ , donde  $R_{meas}$  es la resistencia de  $PaT$  medida en campo, mientras que  $R_{estim}$  es la resistencia de  $PaT$  del modelo de suelo estimado con el método  $RDR$ .

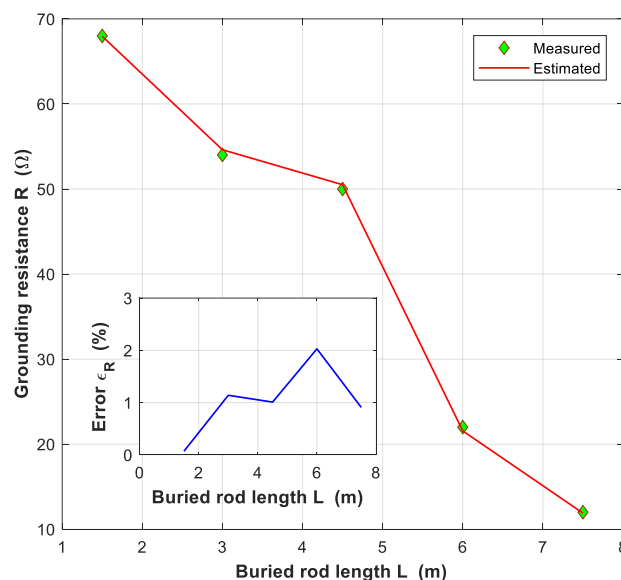


Figura 4.5: Ejemplo suelo real Girona: Resistencia de  $PaT$  medida en campo y calculada mediante el método  $RDR$

### 4.3.2. Suelo real en Castelldefels

A continuación, se considera otro caso real proveniente de la medición en un suelo ubicado en Castelldefels, una localidad de la provincia de Barcelona, Cataluña. Como en el ejemplo anterior del apartado 4.3.1 “Suelo real en Girona”, se ensamblan seis varillas de 1,5 m de largo y 8 mm de radio, y se introducen en el suelo pieza por pieza, midiendo cada vez la resistencia de  $PaT$  de la parte enterrada. Los datos de las medidas realizadas se muestran en la *Tabla 4.7*.

Tabla 4.7: Ejemplo suelo real Castelldefels: Longitud de varilla enterrada  $L$  (m) y la resistencia de  $PaT$  asociada  $R$  ( $\Omega$ )

$L$ (m)	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
$R$ ( $\Omega$ )	43,50	11,01	4,82	3,70	2,76	2,10

Los parámetros del modelo obtenidos con el método  $RDR$  mediante el procedimiento de minimización de la ecuación (36) son:  $\rho_1 = 80,28 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 13,28 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 14,54 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 2,39$  m y  $h_2 = 4,78$  m.

La *Figura 4.6* muestra, utilizando marcadores en forma de diamante, los valores de la *Tabla 4.7*. La línea continua roja representa la resistencia de  $PaT$  calculada a partir de los datos del terreno obtenidos con el método  $RDR$ . En la subfigura, el error porcentual se define como  $\epsilon_R = (R_{meas} - R_{estim})/R_{meas}$ , donde  $R_{meas}$  es la resistencia de  $PaT$  medida en campo, mientras que  $R_{estim}$  es la resistencia de  $PaT$  del modelo de suelo estimado con el método  $RDR$ .

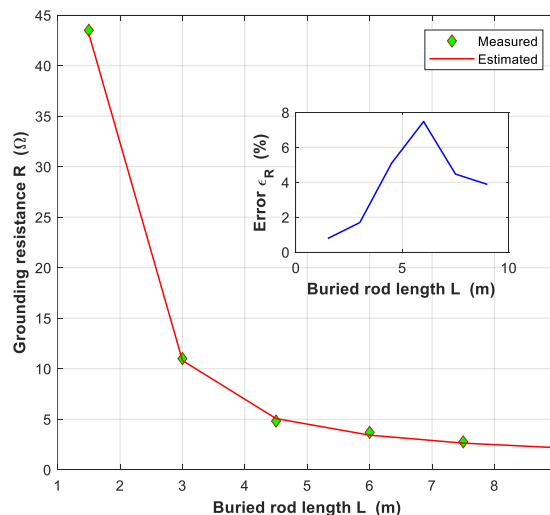


Figura 4.6: Ejemplo suelo real Castelldefels: Resistencia de  $PaT$  medida en campo y calculada mediante el método  $RDR$

En este suelo, se ha realizado un sondeo Wenner con el propósito de comparar los modelos resultantes de la aplicación de los dos métodos, a saber, el método de la varilla hincada resistiva o método Resistive Driven-Rod (*RDR*) como una de las principales aportaciones de esta tesis según referencia [23], y el método basado en el perfil de resistividad aparente obtenido del sondeo Wenner. El perfil de resistividad aparente mediante el método Wenner se muestra en la *Tabla 4.8*.

Tabla 4.8: Perfil de resistividad aparente frente a la separación de los electrodos Wenner  $a$  (m) en el suelo localizado en Castelldefels

$a$ (m)	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
$\rho_{app}$ ( $\Omega \cdot m$ )	77,8	68,9	52,3	39,8	30,8	24,9	21,1	18,8	17,3	16,3	15,7	15,3

A partir de los datos de la *Tabla 4.8*, se ha obtenido un modelo de resistividad de tres capas, resultando los siguientes parámetros del suelo  $\rho_1 = 80,18 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 104,12 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 13,96 \Omega \cdot m$ ,  $h_1 = 1,77 m$  y  $h_2 = 0,44 m$ .

Aunque el modelo de suelo obtenido mediante el método Wenner es esencialmente diferente del obtenido mediante el método *RDR* con los datos de la *Tabla 4.7*, el cálculo de la resistencia de *PaT* con el modelo del terreno obtenido mediante el método *RDR* proporciona unos valores muy cercanos a los medidos en campo como se muestra en la *Figura 4.6*. Esta es una situación similar a la encontrada en el ejemplo de modelo de suelo sintético de la *Figura 4.2* del apartado 4.1.2 “Ejemplo sintético 2”. Nuevamente, el muestreo grueso de la resistencia de *PaT* es el origen de las diferencias. El modelo más confiable en este caso es el que proviene del sondeo Wenner, ya que hay un mayor número de datos involucrados que impide que las estructuras finas en el perfil de resistividad sean subestimadas.

Como comentarios finales, se puede afirmar que el perfil de resistividad del suelo podría recuperarse con un grado suficiente de fiabilidad utilizando algunas mediciones de resistencia de *PaT*, siempre que el muestreo no suavice posibles estructuras en el perfil de resistencia de *PaT* que puedan distorsionar el resultado del proceso de minimización de la ecuación (36). Las capas delgadas del suelo pueden no ser bien evaluadas si las varillas utilizadas en el registro de resistencia son demasiado largas. Los resultados mejoran utilizando un muestreo más fino, siempre y cuando se tenga en cuenta un mayor número de uniones resistivas. El método *RDR* analizado aquí ha demostrado ser válido, aunque presenta ciertos

inconvenientes. Junto con el mencionado problema del muestreo de la resistencia de  $PaT$ , debe añadirse un aumento en la dificultad del proceso de minimización de la ecuación (36) para lograr los valores adecuados de los parámetros del suelo. La introducción de la resistividad interna de la varilla en las fórmulas semiempíricas para el cálculo de la resistencia según la ecuación (29), conduce a que la expresión (36) pueda tener algunos mínimos locales que el algoritmo de minimización puede tomar como la solución del problema. La elección adecuada de los valores de los parámetros que inician el proceso de minimización es importante. Por esta razón, es necesario repetir el proceso de minimización con diferentes valores iniciales y analizar los resultados finales. Esta situación es mucho menos frecuente en los métodos basados en la resistividad aparente como es el método Wenner.



## 5. Conclusiones

Al iniciar la realización de la presente tesis con título “Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra de electrodos en condiciones no habituales y aplicaciones a la modelización de los parámetros eléctricos del suelo”, se establecieron como principales objetivos:

- Optimizar los diseños de los sistemas de *PaT* en las instalaciones eléctricas de alta tensión.
- Estimar la resistencia de *PaT* de grandes electrodos mediante métodos no convencionales.
- Analizar la influencia de la resistencia interna o propia de los electrodos en el diseño de los sistemas de *PaT*.
- Incluir el efecto de la oxidación de los electrodos en el cálculo de la resistencia de *PaT*.
- Mejorar el método Driven-Rod para la modelización de los parámetros eléctricos del suelo.

Todos estos objetivos se han cumplido en su totalidad pues en la presente tesis se han abordado con éxito los siguientes aspectos principales:

### 1. Contribuciones al cálculo de la resistencia de puesta a tierra (capítulo 3)

En este campo en el presente trabajo se ha definido en la *sección 2.2 “Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) de electrodos de gran tamaño”* un estimador de la resistencia de *PaT* cuya principal ventaja con respecto al Método de Simulación de Cargas (*CSM*) es la reducción del tiempo de computación cuando se trata de realizar una primera estimación de la resistencia de *PaT* con electrodos de gran tamaño. La estimación de la resistencia de *PaT*,  $R$ , para un electrodo específico situado en un terreno homogéneo requiere conocer únicamente su forma geométrica de forma precisa para determinar su longitud total,  $L$ , y calcular el índice de estiramiento,  $i_s$ , definiendo una segmentación adecuada de  $N$  segmentos por metro de conductor recto. Posteriormente, mediante un cálculo sencillo según la ecuación (12) y la ecuación (13) se obtienen la estimación de  $R$  y su error, respectivamente.

En la *sección 3.1 “Estimador de la resistencia de Puesta a Tierra (PaT) para electrodos de gran tamaño”* se aplica el estimador a diferentes tipos de mallas de subestaciones eléctricas reales de gran tamaño y de diferentes niveles de tensión, estando el valor calculado de la resistencia de *PaT* mediante el Método de Simulación de Cargas (*CSM*),  $R_{\text{calculada}}$ , dentro del rango dado por el estimador para la resistencia de *PaT*,  $R_{\text{estimada}}$ , circunstancia que se puede observar fácilmente en la *Tabla 3.1* para el caso de un terreno homogéneo de resistividad  $\rho = 1 \Omega \cdot \text{m}$ .

En una **segunda contribución** de esta tesis al cálculo de la resistencia de *PaT* se ha tenido en cuenta la **resistencia interna de los electrodos**, mediante la incorporación del Modelo Basado en Circuitos (*CBM*) según se describe en la *sección 2.3 “Modelo de electrodo con resistencia interna”*.

Posteriormente, en la *sección 3.2 “Electrodos con resistencia interna no despreciable sin oxidación o recubrimiento”* se calcula el valor de la resistencia de *PaT* de varios electrodos tipo utilizados habitualmente en instalaciones reales: apoyos de líneas eléctricas aéreas, centros de transformación y subestaciones eléctricas de distribución y transporte de energía eléctrica. El cálculo de la resistencia de *PaT* se realiza teniendo en cuenta la resistencia interna de los electrodos para diferentes tipos de materiales contemplados en la norma IEEE Std 80TM-2013 [11] como alternativa al cobre, material empleado habitualmente. Los resultados obtenidos para la resistencia de *PaT* considerando una resistividad del terreno  $\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$  se muestran en la *Tabla 3.3* y se comparan con el caso de no considerar la resistencia interna asociada a los electrodos. Para todos los casos estudiados, es necesario resaltar el aumento de la resistencia de *PaT* por el hecho de considerar la resistencia interna de los electrodos. Este efecto es más notorio cuanto más grande o extenso es el electrodo. Para electrodos de pequeño tamaño, como es el caso de los empleados en los apoyos de las líneas eléctricas aéreas o en pequeños centros de transformación, se puede despreciar el efecto de la resistencia interna de los electros, pues se demuestra que la sustitución del cobre por otros materiales no presenta efectos significativos sobre el valor de la resistencia de *PaT*. Sin embargo, para electrodos grandes, como los empleados en las mallas de las subestaciones de distribución y transporte de energía eléctrica, el efecto de sustituir el cobre por otros materiales, principalmente acero 1020 o acero inoxidable 304, no resulta

despreciable, siendo más significativo el incremento de la resistencia de  $PaT$  cuanto mayor sea el tamaño del electrodo.

Como **tercera aportación**, se ha incorporado en la metodología de cálculo de la resistencia de  $PaT$  **el estado de oxidación del electrodo o bien el efecto de estar recubierto con algún material conductor**, según se expone en la *sección 2.4 “Modelo con oxidación o recubrimiento superficial de los electrodos”*.

El procedimiento para considerar la oxidación o el recubrimiento de los electrodos, consiste en sustituir los electrodos oxidados o recubiertos por electrodos limpios con un radio igual al radio equivalente del electrodo recubierto o “Coated Electrode Equivalent Radius” (*CEER*), definido mediante la ecuación (34) para el caso de electrodo con capa de óxido y mediante la ecuación (35) para el caso de electrodo recubierto.

En la *sección 3.3 “Electrodos oxidados o con recubrimiento sin considerar su resistencia interna”* se muestran algunos ejemplos de aplicación del *CEER*, poniéndose de manifiesto que cuando se realiza el cálculo para un electrodo cubierto con óxido, el resultado obtenido para la resistencia de  $PaT$  es mayor que cuando se realiza sin tener en cuenta la oxidación. Además, esta metodología de cálculo permite determinar si recubrir los electrodos con material de baja resistividad, puede ser útil como método de mejora para reducir la resistencia de  $PaT$ , método alternativo a otros como el basado en el incremento del tamaño del electrodo o el basado en modificar el diámetro del electrodo.

Por último, en la *sección 3.4 “Electrodos con resistencia interna no despreciable y con oxidación o recubrimiento”* se muestran ejemplos de electrodos en los que se aplican ambas consideraciones, resistencia interna de los electrodos y oxidación o recubrimiento de estos. En los casos estudiados, el efecto de la resistencia interna es menos importante que el efecto de la oxidación y en algún caso despreciable debido a que los electrodos estudiados son de pequeño tamaño.

## 2. Determinación de la estructura eléctrica del suelo (capítulo 4)

El segundo campo importante de aportación de esta tesis es la determinación de la estructura eléctrica del suelo mejorando el método de la varilla hincada o “Driven-Rod” (*DR*), introduciendo en la metodología la resistencia interna de la propia varilla y de las uniones entre varillas, pasándose a denominar, método de la varilla hincada

resistiva o “Resistive Driven-Rod” (*RDR*), cuyo fundamento se explica detalladamente en la *sección 2.5 “Modelo para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo mediante la técnica Resistive Driven-Rod (RDR)”*.

El método “Resistive Driven-Rod” (*RDR*) puede ser usado como alternativa a los métodos no invasivos que miden los potenciales en superficie con las configuraciones de electrodos como las de Wenner o Schlumberger, como se demuestra en el ejemplo sintético de la *sección 4.2 “Ejemplos sintéticos con resistencia interna no despreciable”* y en el ejemplo real de la *sección 4.3.2 “Suelo real en Castelldefels”*.

El principal inconveniente del método *RDR*, frente a los otros métodos basados en la técnica del Sondeo Eléctrico Vertical (*VES*), como es el método Wenner, es el muestreo grueso de las medidas de resistencia de la varilla hincada que se realizan. El método se podría mejorar realizando un mayor número de medidas, pero implicaría reducir la longitud de cada varilla incrementando el número de uniones y por tanto la resistencia interna de las mismas. Por otra parte, el método *RDR* aumenta la dificultad del proceso de minimización de la ecuación (36), para lograr los valores adecuados de los parámetros del suelo. La introducción de la resistividad interna de la varilla en las fórmulas semiempíricas para el cálculo de la resistencia según la ecuación (29), conduce a que la expresión (36) pueda tener algunos mínimos locales que el algoritmo de minimización puede tomar como la solución del problema. La elección adecuada de los valores de los parámetros que inician el proceso de minimización es importante. Por esta razón, es necesario repetir el proceso de minimización con diferentes valores iniciales y analizar los resultados finales. Esta situación es mucho menos frecuente en el método basado en la resistividad aparente como el método Wenner.

Por último, resaltar que **la presente tesis ha contribuido** en el incremento del conocimiento de la comunidad científica especializada en este campo de la ingeniería eléctrica **con la publicación de 4 artículos** en revistas internacionales y con **dos ponencias orales**, según se indica en el *Anexo: Contribuciones derivadas de la tesis*.

## Referencias bibliográficas

- [1] Rudemberg, R., "Grounding Principles and Practice, Part I: Fundamental Considerations on Ground Circuits", *Electrical Engineering*, Vol. 64, No. 1, Jan. 1945, pp. 1-13.
- [2] Sunde, E.D., "Earth Conduction Effects in Transmission Systems", Dover Publications, Inc., New York 1968, <https://doi.org/10.1002/sce.3730340336>.
- [3] Dawalibi, F.; Barbeito, N., "Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils", *IEEE 91 WM 037-2 PWRD*, 1991 New York Winter Meeting, <https://doi.org/10.1109/61.9768>.
- [4] Dawalibi, F.; Blattner, C., "Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques", *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 2, Feb. 1984, pp. 374-382, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318254>.
- [5] Dawalibi F.; Bouchard M.; Mukhedkar D., "Survey on Power System Grounding Design Practices", *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 4, Jul. 1980, pp. 1396-1405, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319562>.
- [6] Dawalibi F.; Mukhedkar D., "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, No. 2, Mar. 1975, pp. 252-261, <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1975.31849>.
- [7] Dawalibi F.; Mukhedkar D., "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure. Part II: Comparison Between Theoretical and Experimental Results", *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, Mar. 1975, pp. 262-266, <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1975.31850>.
- [8] Dawalibi F.; Mukhedkar D., "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure. Part III: Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration", *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, Mar. 1975, pp. 267-272, <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1975.31851>.
- [9] Dawalibi F.; Mukhedkar D., "Transferred Earth Potentials in Power Systems", *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 1, Jan. 1978, pp. 90-101, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354459>.

- [10] Dawalibi F.; Mukhedkar D., "Parametric Analysis of Grounding Grids", IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 5, Sep. 1979, pp. 1659-1668, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319484>.
- [11] IEEE, "Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015), May. 2015, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>.
- [12] J. G. Sverak, "Progress in step and touch voltage equations of ANSI/IEEE Std. 80", IEEE Trans. Power Del., Vol. 13, No. 3, Jul. 1999, pp. 762-767, <https://doi.org/10.1109/61.686972>.
- [13] Colominas I.; Navarrina F.; Casteleiro M., "Analysis of transferred earth potentials in grounding systems: A BEM numerical approach", IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No. 1, Jan. 2005, pp. 339-345, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835035>.
- [14] Colominas I.; Gomez-Calvino, J.; Navarrina, F.; Casteleiro, M., "A general numerical model for grounding analysis in layered soils", Advances in Engineering Software, <http://hdl.handle.net/2183/328>, 2002.
- [15] Kuhar, A.; Grcev, L., "Contribution to calculating the impedance of grounding electrodes using circuit equivalents", Facta Univ. Ser. Electron. Energ., Vol. 29, 2016, pp. 721-732, <https://doi.org/10.2298/FUEE1604721K>.
- [16] Garrett, D.L.; Holley, H.J., "Calculation of substation grounding system resistance using matrix techniques", IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1980, PAS-99, 2008–2011, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319828>.
- [17] Armstrong H.; Simpkin L., "Grounding Electrode Potential Gradients from Model Test", AIEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-50, Oct. 1960, pp. 618-623. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319828>.
- [18] Thapar B.; Goyal S.L, "Scale Model of Station Grounding Grids In Non-Uniform Soils", IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, Oct. 1987, pp. 1060-1066, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317975>.
- [19] Thapar B.; Gross E., "Grounding Grids for High Voltage Station-IV", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-68, Oct. 1963, pp. 782-788, <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1953.4498704>.
- [20] Thapar B.; Puri K., "Mesh Potential in High-Voltage Grounding Grids", IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-86, Feb. 1967, pp. 249-254, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1967.291843>.

- [21] Ingeman-Nielsen, T.; Tomaskovicova, S.; Dahlin, T., "Effect of electrode shape on grounding resistances—Part 1: The focus-one protocol", *Geophysics*, Vol. 81, WA159–WA167, 2016, <https://doi.org/10.1190/geo2015-0484.1>.
- [22] Denche G.; Faleiro E.; Asensio G.; Moreno J., "An Estimator of the Resistance of Large Grounding Electrodes from Its Geometric Characterization", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 22, 8162, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/app10228162>.
- [23] Denche G.; Faleiro E.; Asensio G.; Moreno J., "Grounding Electrodes with Internal Resistance: Application to Feasibility Study of the Driven-Rod Method for Modeling the Soil Electrical Resistivity Profile", *Applied Sciences*, Vol. 11 No. 11, 5032, May. 2021, <https://doi.org/10.3390/app11115032>.
- [24] Faleiro, E.; Asensio, G.; Denche, G.; Moreno, J., "A fast method to compute the grounding resistance of a coated electrode using the coated electrode equivalent radius", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 137, 107879, ISSN 0142-0615, May. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107879>.
- [25] Zhang, Z.; Ye, H.; Dan, Y.; Duanmu, Z.; Li, Y.; Deng, J., "Novel Method for Comprehensive Corrosion Evaluation of Grounding Device", *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 72102-72111, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985534>.
- [26] Zhang, Z.; Zou, J.; Dan, Y.; Ye, H.; Li, Y.; Deng, J., "Analysis the influence of corrosion layer on the grounding performance of grounding electrodes", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 14, No. 13, 2020, pp. 2602-2609, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0126>.
- [27] Denche, G.; Faleiro, E.; Asensio, G.; Moreno, J., "A Fast Calculation of Partially Corroded, Grounding-Resistive Electrode Electrical Parameters", *Appl. Sci.*, Vol. 12, No. 23, 12243, Nov. 2022, <https://doi.org/10.3390/app122312243>.
- [28] Herman, R., "An introduction to electrical resistivity in geophysics", *Am. J. Phys.*, Vol. 69, No. 9, Sep. 2001, pp. 943–952, <https://doi.org/10.1119/1.1378013>.
- [29] IEEE, "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System", *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, Dec. 2012, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>.
- [30] Calixto, W.P.; Neto, L.M.; Wu, M.; Yamanaka, K.; Moreira, E.P., "Parameter estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, Jul. 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2040845>.

- [31] Wenner, F., "A method of measuring earth resistivity", National Bureau of Standards, Scientific Paper, No. 258, Vol. 12, May. 1916, pp. 469–482, <https://doi.org/10.6028/bulletin.282>.
- [32] Takahashi, T.; Kawase, T., "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 5, No. 2, Apr. 1990, pp. 604-612, <https://doi.org/10.1109/61.53062>.
- [33] Gupta, P.K.; Niwas, S.; Gaur, V.K., "Straightforward inversion of vertical electrical sounding data", Geophysics, Vol. 62, No. 3, May. 1997, pp. 775–785, <https://doi.org/10.1190/1.1444187>.
- [34] Colella, P.; Pons, E.; Tommasini, R.; Di Silvestre, M.L.; Sanseverino, E.R.; Zizzo, G., "Fall of Potential Measurement of the Earth Resistance in Urban Environments: Accuracy Evaluation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 3, May-June 2019, <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2892680>.
- [35] Faleiro, E.; Pazos, F. J.; Asensio, G.; Denche, G.; García, D.; Moreno, J., "Interaction Between Interconnected and Isolated Grounding Systems: A Case Study of Transferred Potentials", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 5, Oct. 2015, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2379434>.
- [36] Harrington, R. F., "Field Computation by Moment Methods", New York, USA: IEEE, 1993.
- [37] Gibson, W.C., "The Method of Moments in Electromagnetics", Chapman & Hall, 2008.
- [38] Jackson, J.D., "Classical Electrodynamics", New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- [39] Zou, J.; Zeng, R.; He, J.L.; Guo, J.; Gao, Y.Q.; Chen, S.M., "Numerical green's function of a point current source in horizontal multilayered soils by utilizing the vector matrix pencil technique", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 2, Mar. 2004, pp. 730-733, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.825014>.
- [40] Mohsen, A, "On the evaluation of Sommerfeld integrals", IEE Proceedings H (Microwaves, Optics and Antennas), Vol. 129, No. 4, Aug. 1982, <https://doi.org/10.1049/ip-h-1.1982.0036>.
- [41] Abramowitz, M.; Stegun, I. A., "Handbook of Mathematical Functions", New York, NY: Dover, 1972.
- [42] Mitani, M.; Takahashi, T., "Theoretical Analysis of Grounding Resistance for the Rod Buried into the Multi-Layered Earth", Seattle, WA, USA: 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Vol. 1, 2000, pp. 145-150, <https://doi.org/10.1109/PESS.2000.867426>.

- [43] Otero, A.; Cidras, J.; Del Alamo, J., "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 14, No. 3, Jul. 1999, pp. 873–878, <https://doi.org/10.1109/61.772327>.
- [44] Visacro, S.; Soares, A., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 20, No. 2, Apr. 2005, pp. 1206–1208, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839743>.
- [45] Canova, A.; Gruosso, G., "3D source simulation method for static fields in inhomogeneous media", *Int. J. Numerical. Methods in Engineering*. Vol. 70, No. 9, 2007, pp. 1096–1111, <https://doi.org/10.1002/nme.1923>.
- [46] Faleiro, E.; Asensio, G.; Moreno, J., "Unidimensional Vertical Electrical Soundings involving uneven soil surfaces: improving the apparent resistivity measurements for soil modelling", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 12, 2018, pp. 1–7, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1328>.
- [47] Berberovic, S.; Haznadar, Z.; Stih, Z., "Method of moments in analysis of grounding systems", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 27, No. 4, 2003, pp. 351–360, [https://doi.org/10.1016/S0955-7997\(02\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0955-7997(02)00123-6).
- [48] E. Faleiro, G. Asensio, G. Denche y J. Moreno, "Electric behaviour of conductor systems embedded in finite inhomogeneous volumes scattered into a multilayered soil: The problem of High-Resistivity Ratios revisited", *Electric Power Systems Research*, Vol. 148, 2017, pp. 183–191, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.035>.
- [49] Tagg, G.F., "Earth Resistances", New York, NY, USA: Pitman, 1964.
- [50] Faleiro, E.; Asensio, G.; Denche, G.; García, D.; Moreno, J., "Wenner sounding for apparent resistivity measurements at small depths using a set of unequal bare electrodes: Selected case studies", *Energies*, Vol. 12 No. 4, 695, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12040695>.
- [51] Liu, H., "Principles and Applications of Well Logging", Springer Geophysics, 2017, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54977-3>.
- [52] Li, Y.; Theodoulidis, T.; Tian, G.Y., "Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 11, Nov. 2007, pp. 4010–4015, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.904930>.
- [53] Moreno, J.; Simón, P.; Asensio, G.; Denche, G.; Faleiro, E.; García, D.; Navarro, P.; Pazo, F. J., "Sistemas de puestas a tierra en instalaciones de alta tensión", Madrid: Garceta grupo Editorial, 2015, ISBN: 978-84-1622-817-1.

- [54] Denche, G., "Alternative materials in the design of grounding electrodes for transformation centers in building", Madrid, Escuela Técnica Superior de Edificación (Universidad Politécnica de Madrid): 7th International Conference on Technological Innovation in Building - VII Congreso internacional de Innovación Tecnológica en Edificación - CITE 2022, 23-25 March, 2022. <https://oa.upm.es/83094/>.
- [55] Denche, G, "Electrical characterization of partially corroded grounding resistive-electrodes under fault condition", ICEME 2022 - 2. Interdisciplinary Conference on Mechanics, Computers and Electrics, 06-07 October 2022, Barcelona - Spain. <https://oa.upm.es/83093/>.

## Anexo: Contribuciones derivadas de la tesis

Los **artículos** publicados cronológicamente en revistas internacionales derivados de la tesis son los siguientes:

- **1<sup>er</sup> autor** del artículo **“An Estimator of the Resistance of Large Grounding Electrodes from Its Geometric Characterization”** [22], publicado en noviembre de 2020 en la revista **Applied Sciences**, cuya posición en el ranking JCR en el momento de la publicación era **Q2** (38/90) en la categoría Engineering, Multidisciplinary.  
<https://doi.org/10.3390/app10228162>
- **1<sup>er</sup> autor** del artículo **“Grounding Electrodes with Internal Resistance: Application to Feasibility Study of the Driven-Rod Method for Modelling the Soil Electrical Resistivity Profile”** [23], publicado en mayo de 2021 en la revista **Applied Sciences**, cuya posición en el ranking JCR en el momento de la publicación era **Q2** (39/92) en la categoría Engineering, Multidisciplinary.  
<https://doi.org/10.3390/app11115032>
- **3<sup>er</sup> autor** del artículo **"A fast method to compute the grounding resistance of a coated electrode using the coated electrode equivalent radius"** [24], publicado en mayo de 2022 en la revista **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, cuya posición en el ranking JCR en el momento de la publicación era **Q1** (50/276) en la categoría Engineering, Electrical & Electronic.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107879>
- **1<sup>er</sup> autor** del artículo **"A Fast Calculation of Partially Corroded, Grounding-Resistive Electrode Electrical Parameters"** [27], publicado en noviembre 2022 en la revista **Applied Sciences**, cuya posición en el ranking JCR en el momento de la publicación era **Q2** (42/90) en la categoría Engineering, Multidisciplinary.  
<https://doi.org/10.3390/app122312243>

Las aportaciones a **congresos internaciones** derivados de la tesis son las siguientes:

- Presentación oral de la ponencia "**Alternative materials in the design of grounding electrodes for transformation centers in building**" en el congreso internacional **CITE 2022** -7<sup>th</sup> International Conference on Technological Innovation in Building [54]. <https://oa.upm.es/83094/>
- Presentación oral de la ponencia "**Electrical characterization of partially corroded grounding resistive-electrodes under fault condition**", en el congreso internacional **ICEME 2022** - 2. Interdisciplinary Conference on Mechanics, Computers and Electrics [55]. <https://oa.upm.es/83093/>

Todas las contribuciones derivadas de la presente tesis se encuentran disponibles en mi perfil de investigador del Portal Científico UPM con ID 303610 <https://portalcientifico.upm.es/es/ipublic/researcher/303610>