

Jornadas de Automática

Sistema para el análisis de características electrofísicas del terreno

Sanz, G.*, Portalatín, P., Colazo, A., Martínez, S., Balaguer, C.

RoboticsLab. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, C/Butarque, nº 15, 28911, Madrid, España.

To cite this article: Sanz, G., Portalatín, P., Colazo, A., Martínez, S., Balaguer, C. 2024. System for the analysis of electrophysical characteristics of the terrain. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10966>

Resumen

El desempeño de un robot tunelador está críticamente determinado por las características del terreno que debe perforar. En este artículo se presenta un banco de pruebas para el análisis del comportamiento de diferentes materiales terrosos ante diversas señales eléctricas. En concreto, se analiza la respuesta en frecuencia y el desfase de la impedancia del material depositado en la cubeta de pruebas. El objetivo de estos experimentos es obtener información que permita modelar y clasificar el tipo de terreno presente. En el futuro, esta información será integrada en el sistema desarrollado en el proyecto ROBOSUB con el objetivo de mejorar las tareas de perforación y reducir problemas en el robot tunelador.

Palabras clave: Respuesta en frecuencia, impedancia, robot subterráneo, ROBOSUB, robótica de campo, robots inteligentes, diseño experimental.

System for the analysis of electrophysical characteristics of the terrain

Abstract

The performance of a tunnel boring robot is critically determined by the characteristics of the ground to be drilled. This paper presents a test rig for the analysis of the behaviour of different earth materials under various electrical signals. In particular, the frequency response and impedance phase shift of the material deposited in the test cell is analysed. The aim of these experiments is to obtain information that will allow modelling and classification of the type of soil present. In the future, this information will be integrated into the system developed in the ROBOSUB project with the goal of improving drilling tasks and reduce issues with the tunnel boring robot.

Keywords: Frequency response, impedance, underground robot, ROBOSUB, field robotics, intelligent robotics, experiment design

1. Introducción

Cada día la robótica está más presente en la vida de las personas y sus aplicaciones siguen creciendo. Las aplicaciones potenciales de esta tecnología abarcan desde tareas sencillas, como las labores domésticas y la automatización de procesos industriales, hasta tareas más complejas como la conducción autónoma. Además, los robots pueden realizar tareas que suponen un riesgo para las personas, como es el caso de excavar túneles o desplegar infraestructuras subterráneas. La función

principal de los robots es facilitar la vida a los seres humanos, realizando tareas que pueden resultar tediosas o peligrosas.

Actualmente, el método más utilizado para la realización de una zanja es el método de cielo abierto (Herbert and de Urbina, 2006). A pesar de que este método ofrece numerosas ventajas, como una mayor visibilidad del terreno y la facilidad en el transporte de cargas y vehículos, también presenta varias desventajas, entre las que se incluyen el ruido, los cortes de tráfico y la contaminación. Como alternativa al método de zanja de cielo abierto, surge el uso de sistemas robotiza-

*Autor para correspondencia: gsanz@pa.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

dos, los cuales representan una mejora significativa frente a los métodos tradicionales. Estos sistemas no requieren de una gran maquinaria, como excavadoras y materiales voluminosos. En su lugar, emplean tecnologías avanzadas, incluyendo sistemas distribuidos tanto dentro del propio robot (sensores de presión, microcontroladores, aspiradoras para la eliminación de material) como fuera de él (sistemas de monitorización y fuentes de alimentación, entre otros).

Uno de los principales desafíos de la robótica subterránea es la gran diversidad de elementos presentes en el terreno, los cuales pueden afectar el correcto funcionamiento del robot. Entre estos elementos se incluyen los distintos tipos de suelo, su espesor y densidad, así como aquellos con alta conductividad debido a la presencia de materiales como arcilla o sales minerales.

2. Proyecto ROBOSUB

El proyecto ROBOSUB (Robots subterráneos inteligentes para la transición ecológica y digital del subsuelo urbano, 2024), plantea desarrollar nuevos algoritmos de planificación de rutas, nuevas tecnologías y capacidades avanzadas de navegación. En este proyecto se propone desarrollar un robot de microtunelización avanzado, completamente maniobrable e inteligente, basado en la evolución del robot BADGER: el nuevo robot de microtunelización ROBOSUB (Figura 1). Se mejorará significativamente el robot de microtunelización para enfrentar los desafíos de la transición ecológica y digital. Este proyecto cuenta con la financiación de la Unión Europea y del Ministerio del Interior.

El objetivo principal de este trabajo es modelar el tipo de terreno a partir de barridos de frecuencia y analizar el desfase entre la impedancia detectada, con el fin de garantizar una correcta modelización del terreno para una futura excavación.

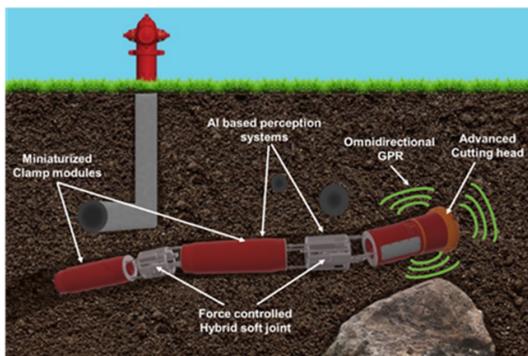


Figura 1: Proyecto RoboSub

2.1. El sistema robótico ROBOSUB

El robot ROBOSUB, la versión mejorada del robot BADGER (Badger project website, 2018), es capaz de perforar, mapear, geo-localizarse y navegar de forma autónoma. Está compuesto por tres tipos de módulos (Figura 2): la cabeza de perforación, dos módulos de articulación y dos módulos de sujeción.

La cabeza de perforación tiene una longitud de 470 mm y un diámetro de 250 mm. El módulo de articulación permite

realizar movimientos prismáticos y rotacionales, y tiene una longitud de 500 mm. El módulo de sujeción es el módulo de mayor longitud (750 mm) y permite que el robot se adhiera a las paredes del túnel, lo que permite al robot realizar movimientos de propulsión y finalmente la maniobra. Los módulos están dispuestos en el siguiente orden: cabeza de perforación, primer módulo de articulación, primer módulo de sujeción, segundo módulo de articulación y el último módulo de sujeción.



Figura 2: Sistema robótico ROBOSUB.

El primer módulo, la cabeza de perforación, es el encargado de comenzar el proceso de perforación mediante una cabeza rotativa. Además, hay un conducto que pasa a través del robot y sirve para evacuar los residuos formados por la perforación.

Los dos módulos de articulación permiten al robot realizar movimientos rotacionales y prismáticos. Para ello, poseen 6 actuadores hidráulicos: 3 de ellos permiten realizar el movimiento de propulsión y los 3 restantes los movimientos de rotación. Los módulos también poseen sensores: cada módulo cuenta con 3 georradars (GPR) que permiten detectar objetos durante la excavación subterránea, además de evitar obstáculos metálicos como tuberías y cables. Por último, el módulo de sujeción permite al robot adherirse a las paredes del túnel que va realizando y sin el cual le sería imposible realizar los movimientos de propulsión y rotación. Este módulo cuenta con siete cámaras neumáticas y sensores de presión que permiten el hinchado y deshinchado de las mismas.

En resumen, el robot ROBOSUB (Yagüez et al., 2022) está diseñado para trabajar de manera eficiente y precisa en la excavación subterránea. La cabeza de perforación inicia el proceso, los módulos de articulación proporcionan la movilidad necesaria, el módulo de sujeción asegura la estabilidad. Cada componente está diseñado para trabajar en conjunto, garantizando una operación eficaz en diversas condiciones de terreno.

3. Respuesta del terreno

En un ambiente natural, la diversidad de tipos de terreno presenta un desafío significativo (S., 2015) para el desempeño óptimo de robots de excavación. Es fundamental desarrollar un modelo detallado que abarque las distintas características de estos terrenos y comprender cómo influyen en el funcionamiento del robot. Con este conocimiento, se podrán mejorar los procesos de excavación, identificando qué terrenos son aptos para excavar y cómo cada tipo de terreno afecta la eficiencia y precisión de los sensores del robot. Esta investigación es crucial para optimizar el rendimiento de los robots en entornos variados y garantizar operaciones más seguras y efectivas.

3.1. Planteamiento del problema

Se han realizado diversos estudios (González G., 2017), tratando de caracterizar las propiedades del suelo, generalmente se aplica el procedimiento (IEEE Standard 81-226, 2024) utilizado como referente cuando se han intentado realizar estas tareas de caracterización. Por lo general se usan bandas de hasta 25 KHz, pero un sistema de puesta de tierra puede estar sometido a frecuencias mucho más altas, como por ejemplo, cuando se drena la corriente producida por una descarga atmosférica, donde la corriente de un rayo tiene un espectro en frecuencia de hasta 1 MHz. Lo que propone este artículo es el estudio y caracterización de distintos tipos de terreno utilizando corriente alterna en vez de corriente continua y elevando el espectro en frecuencia hasta 1 MHz.

3.2. Impedancia y reactancia

La impedancia Z (Gómez and Hurtado, 2015) se expresa como la suma de una parte real y una parte imaginaria:

$$\bar{Z} = R + jX$$

Donde:

- R es la **resistencia**, que representa la oposición al flujo de corriente continua (DC) y es una cantidad real.
- X es la **reactancia**, que representa la oposición al flujo de corriente alterna debido a los efectos inductivos y capacitivos, y es una cantidad imaginaria.
- j es la unidad imaginaria ($j^2 = -1$).

La **reactancia** es la oposición que presentan los inductores y capacitores al paso de la corriente alterna (CA) en un circuito. Se mide en ohmios (Ω) y se expresa matemáticamente como una parte imaginaria de la impedancia.

La reactancia se divide en dos tipos:

- **Reactancia inductiva** (X_L): Es la oposición al flujo de corriente debido a los inductores y se calcula como:

$$X_L = \omega L$$

donde ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$) y L es la inductancia.

- **Reactancia capacitiva** (X_C): Es la oposición al flujo de corriente debido a los capacitores y se calcula como:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

donde C es la capacitancia.

En general, la **reactancia total** X en un circuito puede ser la suma o resta algebraica dependiendo de la disposición del circuito de las reactancias inductiva y capacitiva:

$$X = X_L - X_C$$

Comprender las propiedades eléctricas del suelo es esencial para el diseño y operación de robots subterráneos con georradars.

4. Banco de pruebas para el análisis de terrenos

En primer lugar, las pruebas se han realizado en cubeta de plástico de doce (12) litros de dimensiones treinta y cuatro por veintisiete y por dieciocho (34 x 27 x 18) centímetros con una distribución uniforme de los terminales, como se muestra en la Figura 3.

La distancia entre cada uno de los terminales representa un cuarto de la distancia del largo y ancho de la caja, resultando en una matriz de 3x3 por cada cara, con 9 terminales por cara y 36 en total. Se utilizaron 3 tipos de terreno distintos: sustrato vegetal, arena y grava calcárea.

4.1. Circuito eléctrico de pruebas

Para realizar las pruebas, se utilizaron diversos equipos electrónicos que permitieron analizar los datos obtenidos. Las pruebas se llevaron a cabo siguiendo la disposición de la Figura 3.

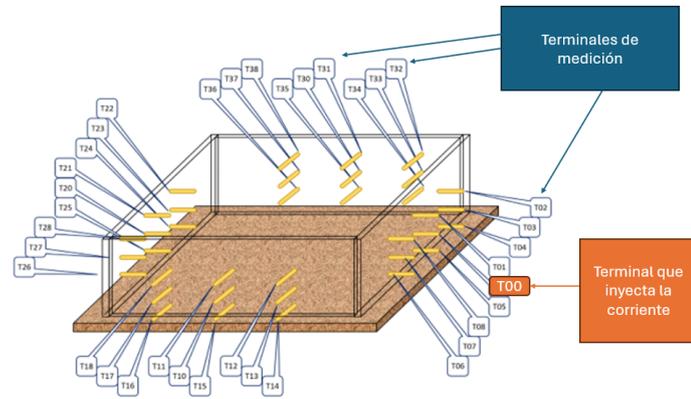


Figura 3: Distribución de los terminales

La distancia a representa la distancia entre el terminal que inyecta la corriente (T00) y el terminal con el que cerramos el circuito para realizar las mediciones, este puede ser cualquiera de los otros terminales dispuestos en la caja. Seguidamente se describen los materiales y métodos utilizados en las pruebas.

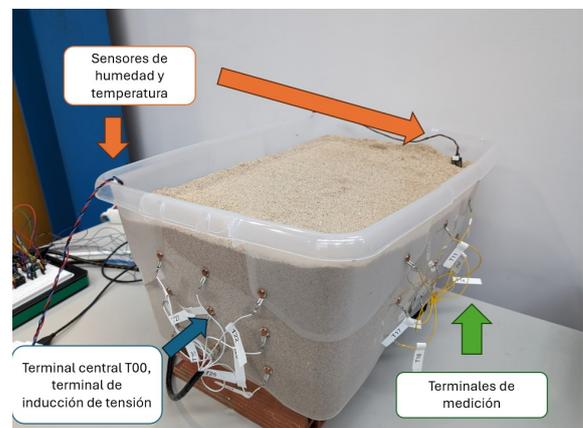


Figura 4: Cubeta de pruebas

4.2. Hardware utilizado

Se utilizaron dos sensores capacitivos de humedad de tierra para medir la temperatura y la humedad en los dos extremos de la cubeta.

Se utilizó el microcontrolador Arduino Nano Board para el tratamiento de los datos obtenidos por los sensores. Se desarrolló un software de telemetría para la gestión de los datos de los sensores con un período fijo de 100 μ s.

Por último, se utilizó el equipo Analog Discovery Studio, perteneciente a la marca Digilent, con el que podemos controlar todos los componentes utilizados durante las pruebas: el microcontrolador, los sensores de humedad y temperatura, y los terminales utilizados en la caja. Cabe destacar que esta placa también posee dos osciloscopios y un generador de funciones, que serán necesarios durante las mediciones.

4.3. Software utilizado

El equipo Analog Discovery Studio de la marca Digilent, cuenta con un software propio para el tratamiento de datos denominado WaveForms (WaveForms, Digilent, 2020). Este software permite analizar los datos captados en distintas formas de onda, realizar un análisis de magnitud y fase, establecer los límites de frecuencia, seleccionar el número de muestras a tomar en cada prueba y ajustar la escala, entre otras opciones.

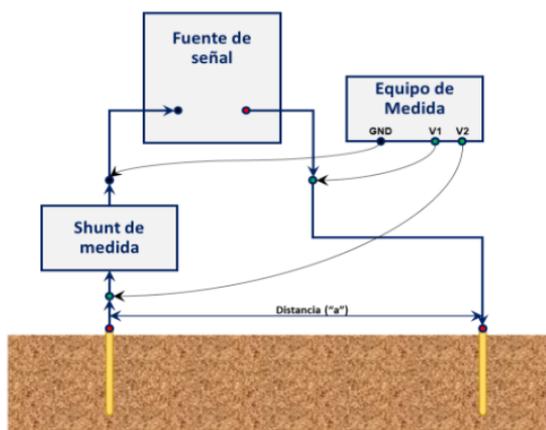


Figura 5: Circuito eléctrico utilizado en las pruebas

También se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE 1.8.19 (Arduino IDE 1.8.19, 2021), integrado para el hardware de Arduino, que permite la utilización de distintos lenguajes de programación y la ejecución en sus microcontroladores.

5. Metodología

Las pruebas se realizan del siguiente modo y en el siguiente orden:

1. Se rellena la cubeta de pruebas con el tipo de material necesario, logrando un margen de dos a tres (2-3) centímetros entre el material introducido y el borde de la cubeta.
2. Se mide y se anota la temperatura y la humedad relativa ambientales, realizando la medida sobre el centro de la cubeta y a una distancia de cinco (5) cm de la misma.

3. Se mide y se anota la humedad de la tierra, realizando la medida en dos (2) extremos opuestos de la cubeta. Se proponen como puntos de medida:
 - Esquina "1": unión de las caras "0" y "1".
 - Esquina "2": unión de las caras "2" y "3".

4. La medida se realiza con un equipo que no altere las mediciones; en caso de no ser posible, el equipo se retira una vez anotada la medida.
5. Se conecta la pinza "roja" en el terminal "T00".
6. Se conecta la pinza "negra" en el terminal sobre el que se realiza la medida.
7. Se realizan las medidas de respuesta en frecuencia e impedancia, configurando el equipo de Digilent para realizar el barrido en frecuencia al menos cinco veces, ya que de esa manera no se aprecian variaciones en las señales visualizadas.
8. Se anotan los valores de temperatura y humedad (aire y tierra).
9. Se guarda la información generada en un archivo de texto con el formato UTC (Coordinated Universal Time).

6. Análisis de los resultados

Es necesario separar los resultados en función del tipo de terreno, con el objetivo de modelar cada tipo de terreno estudiado y sus propiedades. Posteriormente, se analizarán los resultados de manera conjunta y se discutirán los resultados.

Las pruebas se realizaron comparando T00 con el terminal central de otra cara, es decir, T00-T10, T00-T20 y T00 con T30. Se realizaron medidas en magnitud, comenzando en 1 KHz y llegando hasta 1 MHz. En fase se limita hasta -90° , siendo el valor mínimo alcanzable por un condensador.

6.1. Medidas de temperatura y humedad

Durante las 38 pruebas realizadas, la temperatura varía ligeramente entre 21°C y 23°C , mientras que la humedad relativa se mantuvo estática entre 46 % y 49 %. La consistencia en las condiciones ambientales sugiere que el entorno de pruebas estuvo bien controlado, asegurando que las variaciones en los resultados de las pruebas no se debieron a cambios en el entorno, sino a otros factores experimentales.

6.2. Respuestas en frecuencia e impedancia

Los rangos de frecuencia varían en función de la prueba a realizar. En concreto, para medir la respuesta en frecuencia se utiliza un límite superior de 100 KHz, con el que es suficiente para observar el comportamiento del sistema. Por otro lado, para medir la impedancia (Castelló et al., 2001), se debe subir la frecuencia máxima hasta 1 MHz, debido a los aspectos inductivos y capacitivos de los componentes. Además, en estos rangos podrán aparecer comportamientos no lineales como resonancias y variaciones en las reactancias. La impedancia se puede expresar utilizando coordenadas rectangulares $R + jX$ o en la forma polar como una magnitud y ángulo de fase: $|Z|\angle\theta$ (Tapasco, 2009). La impedancia será analizada en forma polar.

6.3. Sustrato vegetal

En primer lugar, se analiza la respuesta en frecuencia del sustrato vegetal. Como se observa en la Figura 6, se compara la respuesta del sistema con la tensión de entrada inyectada de 5 Voltios. Los resultados rojo (T10), verde (T20) y azul (T30), hacen referencia al comportamiento capacitivo del terreno disminuyendo el voltaje de los 2.4 V hasta los 0.6, estabilizándose la tensión a partir de los 40 KHz.

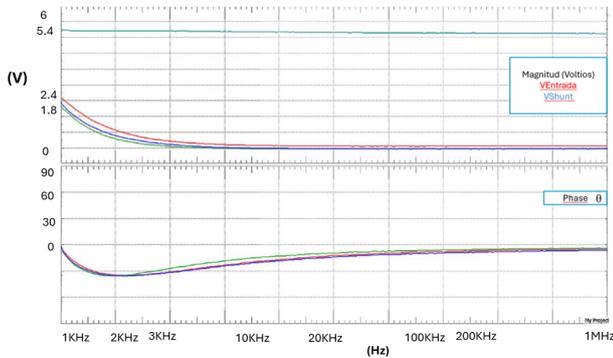


Figura 6: Respuesta en frecuencia del sustrato vegetal

En la Figura 7, se analiza la impedancia del sistema que parte de 500 K Ω y se aprecia la presencia de una resonancia cuando la frecuencia llega a 10 KHz, no se observa una variación significativa entre los 4 terminales centrales de cada una de las caras, por lo que se puede asumir que la distancia entre los terminales no afecta a la impedancia del terreno.

Se observa un cambio en la fase a partir de los 10 KHz, presenta una disminución progresiva en el ángulo llegando hasta -90° , lo que sugiere que la impedancia es predominantemente capacitiva a frecuencias altas.

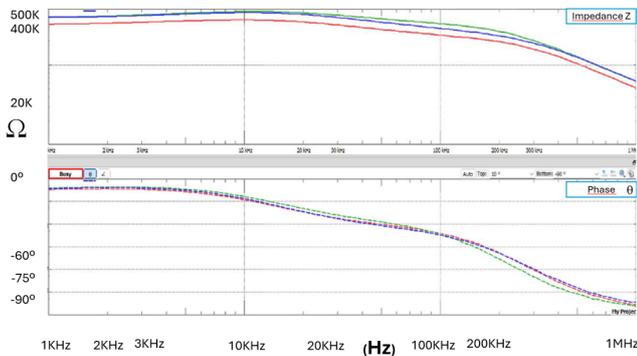


Figura 7: Impedancia del sustrato vegetal

6.4. Grava

La Figura 8 muestra la respuesta en frecuencia de la grava. Esta presenta un componente inductivo, ya que la tensión aumenta de 0 V a 0.5 V y luego se estabiliza lo que indica que el sistema alcanza el equilibrio.

Nuevamente, la fase del sistema comienza en $+90^\circ$ presentando un comportamiento inductivo. A medida que la frecuencia aumenta, la fase cambia a 0° mostrando una transición hacia un comportamiento resistivo o capacitivo.

La disminución de la impedancia (Figura 9) con el aumento de la frecuencia sugiere que el material presenta una alta resistencia en bajas frecuencias, que disminuye a medida que

la frecuencia aumenta, posiblemente debido a la capacidad de los iones para seguir el campo eléctrico alterno a frecuencias más altas.

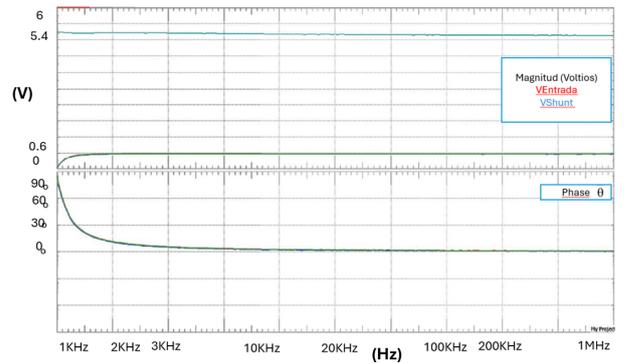


Figura 8: Respuesta en frecuencia de la grava

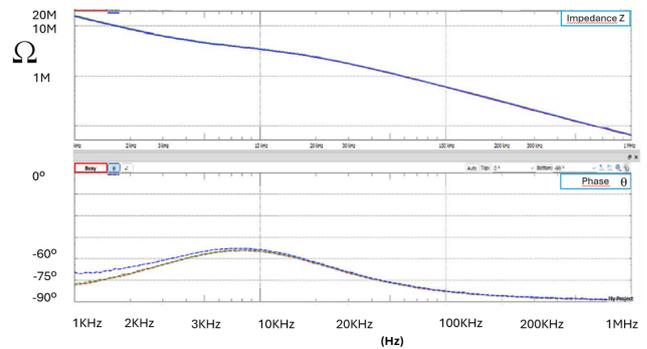


Figura 9: Impedancia de la grava

El ángulo de fase de -90° en bajas y altas frecuencias sugiere un comportamiento capacitivo dominante. El pico en -55° indica un cambio temporal en el comportamiento reactivo del sistema debido a la resonancia o a la interacción de múltiples componentes reactivos (inductancias y capacitancias).

6.5. Arena

La Figura 10 muestra la respuesta en frecuencia de la arena. Es notable que la grava y la arena exhiben un comportamiento muy similar tanto en magnitud como en fase.

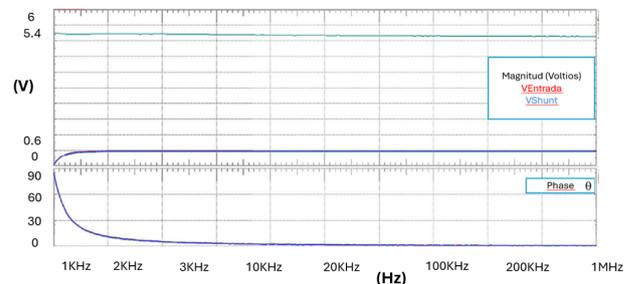


Figura 10: Respuesta en frecuencia de la arena

Este se trata de un comportamiento inductivo que tiene mucho que ver con la similitud en estructura, propiedades eléctricas, el tamaño del grano y la porosidad.

El comportamiento de la impedancia de ambos materiales

en términos de magnitud y fase es coherente con sus componentes capacitivos significativos.

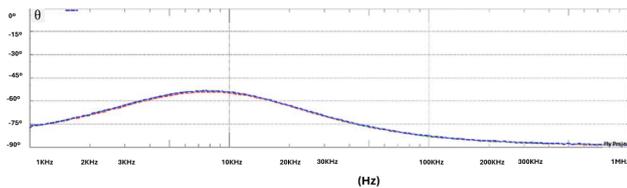


Figura 11: Impedancia tomada en arena

Se observa una pequeña diferencia en la Figura 11 respecto a la fase de la Figura 8, particularmente en el pico de subida, lo que sugiere variaciones en la interacción de los iones y el campo eléctrico debido a diferencias en la microestructura y composición.

7. Conclusiones

Todos los materiales presentan una alta resistencia inicial que disminuye con el aumento de la frecuencia, lo que indica la presencia de componentes reactivos (capacitancias e inductancias) y resistivos.

El sustrato vegetal muestra un cambio significativo en la fase alrededor de 10 KHz, lo que sugiere un punto de resonancia. La grava y la arena exhiben patrones de fase similares, con un pico alrededor de 20 KHz; sin embargo, la arena tarda más en estabilizarse, lo que arroja pequeñas diferencias en la microestructura y la retención de humedad respecto a la grava.

La mayor porosidad y la capacidad de retención de agua de la arena causan un comportamiento más lento en comparación con la grava.

Por lo tanto, se concluye que este análisis de frecuencia e impedancia proporciona información crucial a la hora de modelar y clasificar el tipo de terreno presente.

8. Trabajos futuros

Tras estudiar diversas tecnologías, recopilar datos y analizar los resultados, se plantean diferentes posibilidades para ampliar y mejorar la metodología de experimentación.

Como se mencionó en la sección de Introducción, el objetivo principal de este proyecto es recabar datos del terreno durante la excavación con el sistema robótico ROBOSUB. Con una envergadura de 4 metros cuando todos los módulos están acoplados, sería ideal disponer de una cubeta de una dimensión mayor, aproximadamente 6x3 metros para realizar pruebas con el robot sumergido.

Debido al gran número de pruebas que ha sido necesario realizar, para obtener todas las medidas de cada uno de los terminales de las caras con "T00" y las mediciones previas de humedad y temperatura correspondientes, se considera oportuno automatizar el proceso de la creación de los archivos de cada una de las caras. Con esto, se disminuiría considerablemente el tiempo de captación de datos.

Debido a que la distribución de material utilizada ha sido uniforme, en trabajos futuros se podrían introducir elementos

metálicos o minerales de diferentes tamaños en las cubetas, variando su orientación, para evaluar cómo afectan esto a los resultados.

Finalmente, se propone la evaluación de otras combinaciones de proporciones y tipos de suelos, con el fin de identificar las mezclas más adecuadas para diferentes aplicaciones prácticas. Este enfoque holístico contribuirá al desarrollo de recomendaciones y directrices para con el fin de caracterizar el material y aunar los resultados obtenidos durante los experimentos.

Agradecimientos

Este trabajo cuenta con el apoyo del proyecto subvencionado *ROBOSUB: "Robots inteligentes subterráneos para la transición ecológica y digital del subsuelo urbano"* (TED2021-129420B-I00, 2021), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y la "NextGeneration EU/PRTR" de la Unión Europea.

Referencias

- Castelló, J., Espí, J., García, R., Esteve, V., 2001. Analizador de impedancia/ganancia-fase para pc. *Revista Española de Electrónica*, 70–75.
- González G., A. A., jan 2017. Desarrollo de un método no convencional para la medición de la impedancia de puesta a tierra en el dominio de la frecuencia. Por favor, use este identificador para citar o enlazar este ítem. URL: <http://hdl.handle.net/10872/14159>
- Gómez, R. R., Hurtado, J. C. C., 2015. Sistema de medición y análisis de impedancia. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* 36 (1), 56–66, recuperado en 04 de junio de 2024. URL: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282015000100005&lng=es&nrm=iso
- Herbert, J. H., de Urbina, F. P. O., Diciembre 2006. Métodos de minería a cielo abierto. Not available. URL: <https://dx.doi.org/10.20868/upm.book.10675> DOI: 10.20868/upm.book.10675
- Robots subterráneos inteligentes para la transición ecológica y digital del subsuelo urbano, 2024. Robosub project. Accessed: 2024-06-04. URL: <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/project/robosub>
- S., M., 2015. Métodos de excavación sin zanjas, no Publicado. URL: <https://oa.upm.es/37225/>
- Tapasco, M. G., 2009. Análisis de la impedancia del suelo y su efecto en la localización de fallas en sistemas de potencia. Ph.D. thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, director: Ph.D. Juan José Mora Flórez.
- Arduino IDE 1.8.19, 2021. Arduino, ide. [Online]. Available: <https://digilent.com/shop/software/digilent-waveforms/> (accessed Jun. 5, 2024).
- Badger project website, 2018. Badger project website. [Online]. Available: <https://www.badger-robotics.eu/> (accessed May. 30, 2024).
- IEEE Standard 81-226, 2024. Ieee standard 81-226. Accedido: 2024-06-04. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/81/226/>
- TED2021-129420B-I00, 2021. Proyectos estratégicos orientados a la transición ecológica y a la transición digital. [Online]. Available: <https://www.aei.gov.es/convocatorias/buscador-convocatorias/proyectos-estrategicos-orientados-transicion-ecologica-3> (accessed May. 30, 2024).
- WaveForms, Digilent, 2020. Waveforms, digilent software. [Online]. Available: <https://digilent.com/shop/software/digilent-waveforms/> (accessed Jun. 5, 2024).
- Yagüez, J., de la Casa, S. M., Balaguer, C., SEP 2022. Actualización del módulo de sujeción de un robot autónomo subterráneo. XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logro.