



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Construcción de un equipo de tomografía eléctrica de alta resolución

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Germán Vicente Arévalo

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde
José González Coma

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Construcción de un equipo de tomografía eléctrica de alta
resolución*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

RESUMEN

Actualmente, la tomografía eléctrica se encuentra entre los métodos de análisis geofísico más habituales, ventajosos y eficaces. El proceso de la tomografía eléctrica implica la inyección de una corriente eléctrica en el objeto o cuerpo a través de electrodos exteriores, y la posterior medición de las caídas de potencial en los otros electrodos interiores. A partir de estos datos, se puede calcular la distribución de la resistividad eléctrica del objeto y, por lo tanto, crear una imagen. Este método no destructivo, empleado en infinidad de aplicaciones, puede ser empleado como método para la detección prematura de fisuras o cavidades, la detección de diferentes capas o la distribución de contaminantes.

El presente trabajo pretende diseñar y construir un equipo de tomografía eléctrica capaz de medir la resistividad de los materiales de construcción a diferentes frecuencias, con objeto de definir la presencia de diferentes factores o agentes de alteración. Los resultados preliminares han permitido diseñar un primer prototipo capaz de trabajar a diferentes frecuencias y realizar una conmutación selectiva de los electrodos, activándolos de cuatro en cuatro, para que trabajen dos como electrodos de corriente y los otros dos como electrodos de potencial.

PALABRAS CLAVE

Resistividad, Materiales, Frecuencia, Geofísica, Tomografía eléctrica

AGRADECIMIENTOS

Después de pasar una larga etapa en la Escuela Naval Militar, esta llega por fin a su desenlace. Han sido bueno y malos momentos, más de lo primero que de lo segundo, los que he vivido durante estos cinco años.

En primer lugar, quería agradecer a mis tutores, Jorge Feijoo y José González por guiarme y ayudarme durante la consecución del trabajo. Sus consejos, correcciones y lecciones fueron vitales para la realización del TFG.

Por supuesto, también quería agradecer a toda mi familia y a mi pareja por animarme y apoyarme no solo estos últimos meses, sino también en todo mi periodo de formación en la Escuela. Aunque, a veces en la distancia era difícil, siempre estaban presentes.

Por último, me gustaría recalcar el apoyo de todos mis amigos, tanto los de la Escuela como los de Madrid, cuya gran mayoría considero casi como hermanos. En especial, al estudio 216, siempre presente en los momentos de estrés y de estudio previo a algún examen o acontecimiento importante.

En conclusión, muchas gracias a todos por estar siempre cuando se os necesita.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Motivación del trabajo	7
1.3 Aplicación militar	8
1.4 Objetivos	10
1.5 Estructura del trabajo	10
2 Estado del arte	11
2.1 Métodos de resistividad eléctrica	11
2.1.1 Introducción	11
2.1.2 Historia y evolución.....	11
2.1.3 La resistividad eléctrica	12
2.2 Tomografía Eléctrica.....	13
2.2.1 Objetivo del método	13
2.2.2 Principio teórico.....	13
2.2.3 Problema directo: Cálculo de la resistividad aparente.....	15
2.2.4 Configuración de los electrodos.....	15
2.2.5 Métodos de prospección geofísica.....	19
2.2.6 Cálculo de la resistividad real. Técnicas de inversión.	21
2.2.3 Equipo requerido	23
2.2.4 Metodología de campo	24
2.2.5 Aplicaciones	25
3 Desarrollo del TFG.....	33
3.1 Estudio de rangos de resistividad.....	33
3.1.1 Datos del material	33
3.1.2 Corriente continua	34
3.1.3 Corriente alterna	36
3.2 Diseño y construcción del soporte para electrodos	37
3.3 Circuito Electrónico	38
3.4 Programación en Arduino	39
3.5 Prueba de concepto	39

4 Resultados / Validación / Prueba.....	41
4.1 Resultados de las mediciones.....	41
4.2 Resultados Soporte.....	46
4.2.1 Ensamblaje inicial.....	46
4.2.2 Problemas del ensamblaje inicial.....	47
4.2.3 Ensamblaje final	49
4.3 Resultados circuito eléctrico	50
4.3.1 Amplificador Operacional	51
4.3.2 Relés	56
4.4 Montaje completo equipo tomografía eléctrica	60
4.5 Resultados prueba de concepto	62
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	66
6 Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	70
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	72
Anexo III: Programa Arduino 10 electrodos	73
Anexo IV: Planos Soporte Electrodos	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Evolución plaza Unirii, Bucharest [1]	8
Figura 1-2 Estudio tomografía eléctrica plaza Unirii [1]	8
Figura 1-3 Imagen Pulmonar [3]	9
Figura 2-1 Rangos típicos de resistividad para rocas y suelos [11]	13
Figura 2-2 Esquema funcionamiento 4 electrodos [2]	14
Figura 2-3 Esquema configuración Wenner [2]	16
Figura 2-4 Señal configuración Wenner [2]	16
Figura 2-5 Esquema configuración Schlumberger [2]	16
Figura 2-6 Señal configuración Schlumberger [2]	17
Figura 2-7 Esquema configuración dipolo-dipolo [2]	17
Figura 2-8 Señal configuración dipolo-dipolo [2]	17
Figura 2-9 Esquema configuración cuadrada [2]	18
Figura 2-10 Esquema configuración Wenner-Schlumberger [11]	18
Figura 2-11 Diagrama mediciones CST [2]	20
Figura 2-12 Ejemplo de un Sondeo Eléctrico Vertical con la configuración Wenner a) y con la configuración Schlumberger b) [13]	20
Figura 2-13 Diagrama ERT en 3D [15]	21
Figura 2-14 Visualización resistividad aparente y real en RES2DINV [17]	22
Figura 2-15 Batería Tomografía eléctrica [18]	23
Figura 2-16 Unidad central tomografía eléctrica [19]	23
Figura 2-17 Ejemplo de tomografía eléctrica en el campo [20]	24
Figura 2-18 Estudio deslizamiento Cervantes 2012 [12]	26
Figura 2-19 Perfil tomografía eléctrica presa de Chile [22]	27
Figura 2-20 Cámara de mina y medidas ERT tomadas [23]	28
Figura 2-21 Resultados medidas ERTs pozo [23]	28
Figura 2-22 Perfil de tomografía eléctrica de un vertedero [24]	29
Figura 2-23 Perfil de tomografía eléctrica de una pluma de contaminación [24]	30
Figura 2-24 Perfil de tomografía en balsa minera [24]	30
Figura 2-25 Diagrama de anomalía de baja resistividad en el puente del Río Brazos [25]	31
Figura 2-26 Líneas de prospección de resistividad eléctrica realizadas en muro, por encima y por debajo de plataforma metálica, y en el pavimento del campanario. Se muestran además los perfiles de resistividad correspondientes [26]	32
Figura 3-1 Circuito PSIM mediciones DC	34
Figura 3-2 Montaje DC en el laboratorio	35

Figura 3-3 Mediciones con el montaje DC	35
Figura 3-4 Circuito PSIM mediciones AC.....	36
Figura 3-5 Montaje laboratorio AC	36
Figura 3-6 Mediciones laboratorio AC	37
Figura 3-7 a) Impreso 3D Elegoo Saturn [29] b) Resina Anycubic UV Tough Resin [28].....	38
Figura 3-8 Mediciones obtenidas según la función que este realizando cada electrodo [2]	39
Figura 3-9 Montaje segunda prueba de comprobación de funcionamiento	40
Figura 4-1 Diagrama resultados estudio resistividad DC	44
Figura 4-2 Diagrama resultados estudio resistividad DC con la disolución de NaCl.....	44
Figura 4-3 Diagrama resultados estudio resistividad AC	46
Figura 4-4 Ensamblaje inicial soporte	46
Figura 4-5 Placa superior soporte electrodos	47
Figura 4-6 Placa inferior soporte electrodos	47
Figura 4-7 Espacio muelles en ensamblaje inicial	48
Figura 4-8 Barra soporte electrodos.....	48
Figura 4-9 Ensamblaje final soporte electrodos.....	49
Figura 4-10 Soporte final impreso	49
Figura 4-11 Partes soporte final impreso	50
Figura 4-12 Esquema AO inversor	51
Figura 4-13 Montaje AO protoboard	52
Figura 4-14 Montaje AO en placa.....	53
Figura 4-15 Mediciones voltaje circuito experimental AO	53
Figura 4-16 Señales osciloscopio montaje AO experimental	54
Figura 4-17 Distribución pines OPA541 [35].....	55
Figura 4-18 Montaje y voltajes AO final	55
Figura 4-19 Esquema funcionamiento relé [36]	56
Figura 4-20 Sistema relés inicial.....	57
Figura 4-21 Conmutaciones 5 electrodos diagrama.....	57
Figura 4-22 Montaje real relés 5 electrodos.....	58
Figura 4-23 Esquema montaje completo del equipo de tomografía eléctrica.....	61
Figura 4-24 Montaje completo del equipo de tomografía eléctrica	62
Figura 4-25 Altura mediciones según la frecuencia utilizada.....	63
Figura 4-26 Posición electrodos durante la segunda prueba a) Primera conmutación b) Segunda conmutación	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Métodos geofísicos y sus aplicaciones [2]	9
Tabla 2 Resistividad aparente según configuración de electrodos [2,11]	18
Tabla 3 Ventajas y desventajas según configuración de electrodos [2]	19
Tabla 4 Datos materiales empleados para las mediciones	41
Tabla 5 Contenido de humedad de los materiales tanto en agua como en disolución	41
Tabla 6 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 20 V	42
Tabla 7 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 40 V	43
Tabla 8 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 60 V	43
Tabla 9 Mediciones resistividad de los materiales en AC con 10 y 100 Hz	45
Tabla 10 Mediciones resistividad de los materiales en AC con 500 y 1000 Hz	45
Tabla 11 Resultados mediciones primera prueba	62
Tabla 12 Resultados mediciones segunda prueba	63

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La electricidad es una forma de energía que se utiliza para un número incontable de aplicaciones. Esta, puede atravesar en menor o mayor medida diferentes objetos dependiendo del material del que estén hecho y de su resistividad eléctrica. Conocer este dato es de vital importancia y resulta muy útil en distintos ámbitos de la ingeniería, en concreto de la civil, para conocer la composición de distintos materiales de construcción.

Por ello, en este trabajo se pretende diseñar y construir un equipo de tomografía eléctrica de alta resolución que se empleará como técnica no destructiva para la detección de anomalías en diferentes tipos de estructuras.

La resistividad eléctrica de los materiales puede hallarse utilizando métodos convencionales de resistividad compuestos únicamente por 4 electrodos, cuyas posiciones habría que ir variando manualmente a lo largo del terreno. El equipo que se quiere construir, utiliza el método de tomografía eléctrica, que al ser multielectródica, funciona de forma automática eligiendo que electrodos deben funcionar para poder cubrir una zona más amplia y para ganar profundidad de forma mucho más rápida y cómoda.

1.2 Motivación del trabajo

A medida que ha pasado el tiempo, se ha ido evolucionando y cada vez hay más edificaciones e infraestructuras necesarias destinadas a vivienda. Muchas de estas estructuras se apoyan en el suelo y, por tanto, debemos saber su composición para garantizar su estabilidad y la seguridad de los que las utilizan.

Un ejemplo de análisis del terreno utilizando la técnica de tomografía eléctrica es un estudio de la plaza Unirii de Bucharest [1]. En el siglo XIX, esa zona pertenecía al barrio judío de Bucharest, que en su totalidad era una zona compacta residencial. Sin embargo, en el 1980 se demolió por completo, construyendo grandes edificios administrativos generando una alta actividad antrópica, como se aprecia en [Figura 1-1].

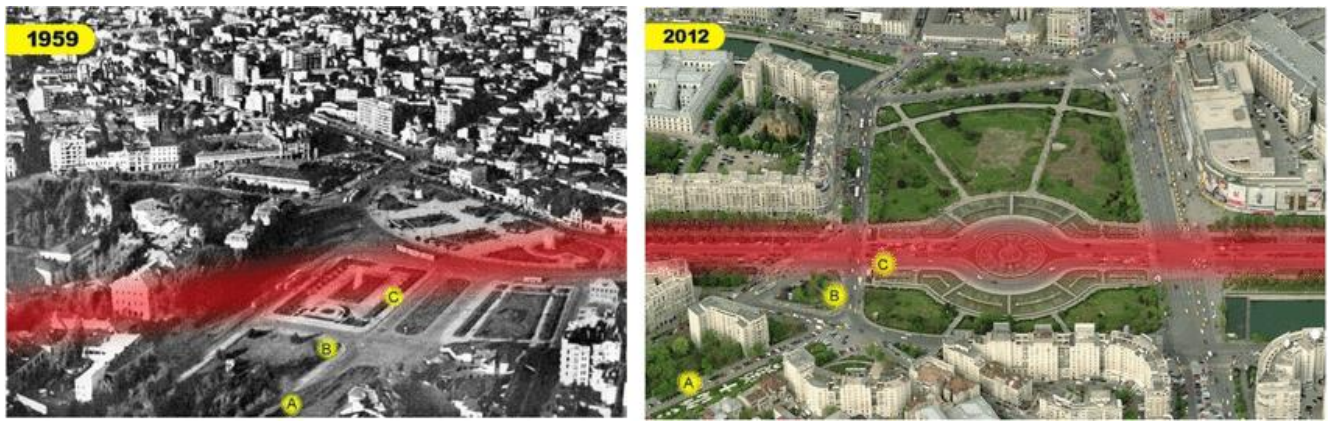


Figura 1-1 Evolución plaza Unirii, Bucharest [1]

Actualmente, se pretende realizar nuevas reformas pero, al llevar a cabo el estudio geofísico, se encontraron vacíos subterráneos ocultos. Entre estos estudios, se realizó uno mediante tomografía eléctrica obteniendo el siguiente diagrama, donde se aprecia el vacío. [Figura 1-2]

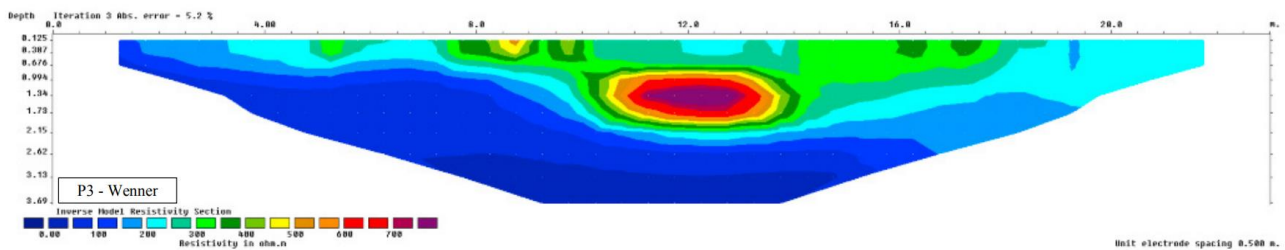


Figura 1-2 Estudio tomografía eléctrica plaza Unirii [1]

Además de por la aplicación que conlleva, también destaco como motivación del trabajo el hecho de emplear los conocimientos adquiridos para la construcción de algo práctico. Lo que conlleva al objetivo de constituir un prototipo sobre el que desarrollar futuras líneas de investigación.

1.3 Aplicación militar

La principal aplicación de la tomografía eléctrica es la geofísica, es decir, el estudio de todos los fenómenos relacionados con la estructura terrestre. Sin embargo, se pueden encontrar dentro de este campo aplicaciones más específicas. A continuación, en [Tabla 1], se muestran los diferentes métodos geofísicos que existen y sus diferentes aplicaciones principales y secundarias.

Estas aplicaciones, se pueden emplear también en el ámbito militar. En primer lugar, para la construcción de infraestructuras o elementos defensivos como túneles y trincheras. Sobre todo, aunque actualmente no son tan comunes, para éstas últimas ya que son provisionales y se realizan en un reducido periodo de tiempo para aguantar una posición. Realizar un estudio geofísico previo a su construcción, no solo garantiza mayor seguridad, sino también comodidad (evitar una zona proclive a posibles inundaciones) y eficiencia (evitar zonas muy duras que compliquen y alarguen el levantamiento de las defensas).

Por otro lado, también se puede utilizar para encontrar objetos enterrados. Centrándonos en las aplicaciones 8 y 9 de [Tabla 1] se consideraría como método principal para búsqueda arqueológica y método secundario, pero también eficaz, para búsqueda de objetos metálicos. Por ello, es un medio plenamente capaz en misiones de búsquedas de minas u elementos explosivos que no han detonado y siguen enterrados. Al mismo tiempo, también puede ser utilizado para analizar si el enemigo tiene algún tipo de infraestructura subterránea.

Tabla 1 Métodos geofísicos y sus aplicaciones [2]

Geophysical method	Chapter number	Dependent physical property	Applications (see key below)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravity	2	Density	P	P	s	s	s	s	!	!	s	!
Magnetic	3	Susceptibility	P	P	P	s	!	m	!	P	P	!
Seismic refraction	4,5	Elastic moduli; density	P	P	m	P	s	s	!	!	!	!
Seismic reflection	4,6	Elastic moduli; density	P	P	m	s	s	m	!	!	!	!
Resistivity	7	Resistivity	m	m	P	P	P	P	P	s	P	m
Spontaneous potential	8	Potential differences	!	!	P	m	P	m	m	m	!	!
Induced polarization	9	Resistivity; capacitance	m	m	P	m	s	m	m	m	m	m
Electromagnetic (EM)	10	Conductance; inductance	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m
EM-VLF	11	Conductance; inductance	m	m	P	m	s	s	s	m	m	!
EM - ground penetrating radar	12	Permittivity; conductivity	!	!	m	P	P	P	s	P	P	P
Magneto-telluric	11	Resistivity	s	P	P	m	m	!	!	!	!	!

P = primary method; s = secondary method; m = may be used but not necessarily the best approach, or has not been developed for this application; (!) = unsuitable

Applications

- 1 Hydrocarbon exploration (coal, gas, oil)
- 2 Regional geological studies (over areas of 100s of km²)
- 3 Exploration/development of mineral deposits
- 4 Engineering site investigations
- 5 Hydrogeological investigations
- 6 Detection of sub-surface cavities
- 7 Mapping of leachate and contaminant plumes
- 8 Location and definition of buried metallic objects
- 9 Archaeogeophysics
- 10 Forensic geophysics

Por último, tras las modificaciones debidas, se podría aplicar la forma de funcionamiento de tomografía eléctrica en el ámbito de medicina militar. De esta técnica, surge la tomografía de impedancia eléctrica (TIE). Este método de análisis usa electrodos conductores que se pegan a la piel del sujeto. Posteriormente, se envían pequeñas corrientes eléctricas al cuerpo y se mide el potencial eléctrico resultante creando una imagen médica dependiendo de la conductividad de la parte afectada [Figura 1-3]. En la actualidad, se considera un método experimental, no obstante, puede aportar varias ventajas ya que se utiliza mediante equipos portátiles, de manera no invasiva, a tiempo real y sin radiación. La comodidad y rapidez que ofrece (al igual que la tomografía eléctrica) se consideraría clave en situaciones críticas aplicables fuera del mudo civil.

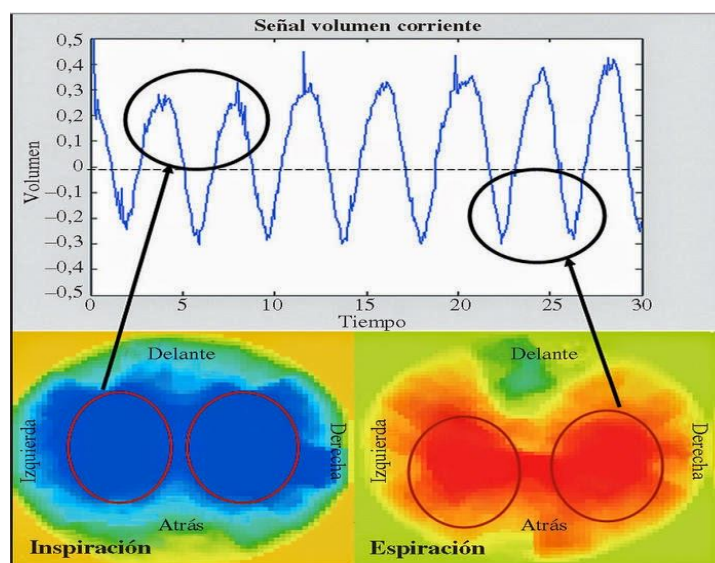


Figura 1-3 Imagen Pulmonar [3]

1.4 Objetivos

Se establece como objetivo principal del trabajo, el diseño y la construcción de un equipo de tomografía eléctrica que sea capaz de medir la resistividad de distintos materiales a diferentes frecuencias.

Para la realización de este, el trabajo se desglosará en distintas partes y se establecerán también distintos objetivos secundarios.

- Estimación de los rangos típicos de resistividad de diferentes materiales de construcción. Esto permitirá determinar las especificaciones o necesidades que debe tener la fuente de alimentación y con cuanta corriente debemos operar.
- Diseño y fabricación de un soporte para colocar los electrodos del aparato consiguiendo que estén en todo momento en contacto con el material.
- Diseño y construcción de la parte electrónica del dispositivo y de su programación de tal forma que sea capaz automáticamente de inducir corriente eléctrica en los electrodos que nosotros vayamos indicando y registrando la caída de potencial en otros dos.
- Detección de anomalías o zonas de contacto de diferentes materiales a través de las mediciones de resistividad que nos dará el equipo.

1.5 Estructura del trabajo

La memoria se ha organizado en seis capítulos, distribuyéndose el contenido de la siguiente manera:

1. Introducción y objetivos: En este apartado se expondrá de que trata el trabajo, porque es importante y la principal motivación de este. También, como se puede relacionar y que aplicaciones tiene en el ámbito militar y los objetivos propuestos.
2. Estado del arte: En esta parte del trabajo se mencionarán en qué consisten los métodos de resistividad eléctrica, como han ido evolucionando con el tiempo y los distintos tipos que hay en la actualidad. Posteriormente, se explicará en detalle el funcionamiento tanto teórico como práctico de la tomografía eléctrica en la toma de datos en el campo, además del equipo necesario para llevarlo a cabo y las principales aplicaciones de esta.
3. Desarrollo: Se expondrán las distintas partes llevadas a cabo, que una vez combinadas formarán el equipo al completo.
4. Resultados: Para cada parte, se mostrará como se ejecutaron siguiendo la idea inicial del desarrollo. Se analizarán todos los problemas que fueron surgiendo durante cada una y las soluciones que se adoptaron. Finalmente, se presentará como funcionan todas estas partes juntas en el montaje final.
5. Conclusiones y líneas futuras: En este último apartado, se expondrán las conclusiones obtenidas del trabajo y también algunas ideas que se podrían implementar para la mejora del equipo que se ha diseñado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Métodos de resistividad eléctrica

2.1.1 Introducción

Los métodos de resistividad eléctrica se desarrollaron a principios del siglo XX, pero se han utilizado mucho más ampliamente desde el 1970 debido a la disponibilidad de computadoras para procesar y analizar los datos. Estas técnicas se usan regularmente en la búsqueda de fuentes de agua subterránea adecuadas y también para monitorear los tipos de contaminación de agua subterránea; en estudios de ingeniería para localizar cavidades, fallas y fisuras subterráneas, pozos mineros...y en arqueología para delimitar la extensión de los restos de las cimentaciones enterradas de antiguos edificios, entre muchas otras aplicaciones [4].

Estos métodos, se basan en el principio de que la distribución de potencial eléctrico en el material alrededor de un electrodo que conduce corriente, depende de las resistividades eléctricas y la distribución de los suelos y rocas. La práctica habitual en el campo es aplicar una corriente eléctrica directa entre dos electrodos implantados en la roca o muro y medir la diferencia de potencial entre dos electrodos adicionales que no conducen corriente. Por lo general, los electrodos de potencial están en línea con los electrodos de corriente y la corriente utilizada es corriente directa, corriente directa conmutada (es decir, una corriente alterna de forma cuadrada) o corriente alterna de baja frecuencia. Todos los análisis e interpretaciones se realizan en base a las corrientes directas. Por lo tanto, según como configuremos estos electrodos y la corriente que inducimos, se podrá usar en unas aplicaciones u otras de forma más eficaz, existiendo por tanto varias formas distintas de aplicar estos métodos [4,5].

2.1.2 Historia y evolución

La ciencia geoelectrica es una ciencia moderna que se remonta a solo unos pocos siglos. Comenzó a desarrollarse en el siglo XVIII con la contribución de investigadores como Stephen Gray, quienes midieron la conductividad de las rocas. Sin embargo, fue después cuando se descubrió que el subsuelo podía conducir corriente eléctrica.

Posteriormente en los siglos XVIII y XIX, surgieron los "padres" de los principios físicos en los que se basan los métodos geoelectricos. Estos incluyen a Georg Simon Ohm, quien estableció la relación entre voltaje y corriente eléctrica; Andre Marie Ampere, quien definió la intensidad del campo magnético; y Michael Faraday, quien demostró la generación de corriente por inducción. Finalmente, Jame Clerk Maxwell unificó matemáticamente estas teorías electromagnéticas en 1873 en su tratado sobre electricidad y magnetismo.

Los primeros indicios de medición de resistividad eléctrica se estiman a mediados del siglo XIX. Sin embargo, el desarrollo práctico de la ciencia geoelectrica comenzó con los hermanos Schlumberger entre 1911 y 1914, quienes llevaron a cabo varios experimentos para detectar depósitos de minerales en Normandía [6].

Fueron estos dos mismos científicos, junto con Frank Wenner, los que idearon el dispositivo tetrapolar en 1916 (la base de los sistemas actuales de medición en este ámbito). Sin embargo, los hermanos Schlumberger por si solos serían los primeros en utilizar el levantamiento de resistividad eléctrica a larga escala para la exploración petrolera en 1923. Más tarde, los Schlumberger fundaron la Société de Prospection Electrique en 1926, dando lugar a la formación de dos importantes compañías geofísicas: la Compagnie Générale de Géophysique y la Schlumberger Well Surveying Corporation.

Entre 1919 y 1922, otros investigadores como Lundberg y Sundberg mejoraron los métodos de exploración geofísica con base en la observación de las líneas equipotenciales del campo eléctrico y la intensidad del campo magnético. No obstante, partiendo de los conocimientos sobre electrónica que dejaron de base genios como Ohm, Ampere y Faraday, fueron Schlumberger y Wenner los que darían paso a uno de los métodos de geofísica más útiles y utilizados en la actualidad.

2.1.3 La resistividad eléctrica

Cuando aplicamos electricidad en el suelo, esta se puede propagar de tres formas diferentes: conducción dieléctrica (en materiales aislantes), conducción electrónica (en metales) y conducción electrolítica (en los iones presentes en el líquido del suelo). La conducción electrolítica es la más importante y es la base de los métodos de medición de resistividad.

Esta técnica, proporciona la resistividad aparente. Esto se debe a que el suelo está compuesto por diferentes materiales, por lo que el campo eléctrico afectará a varias capas al mismo tiempo. Como resultado, la resistividad medida será un promedio de todas ellas. Solo en suelos homogéneos o en investigaciones muy superficiales, la resistividad medida será igual a la resistividad real.

La resistividad puede variar en función de los siguientes parámetros [7–10]:

- El grado de saturación del terreno
- La temperatura
- La porosidad
- La salinidad del fluido
- El tipo de roca
- Los procesos geológicos que afectan a los materiales

La relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del suelo permite usar los métodos de resistividad para detectar fugas de agua en el subsuelo. Un aumento en la cantidad de agua en el suelo causará una disminución en la resistividad. Otros factores, como la salinidad, porosidad y temperatura del suelo (que es un factor menos importante), también afectan la resistividad de manera similar al grado de humedad. La sal puede favorecer o empeorar la conductividad, ya que es un buen aislante cuando está seca, pero en solución hace que el suelo tenga una alta conductividad.

Algunos de estos factores se relacionan con la resistividad mediante fórmulas como la ley de Archie (1), a través de la resistividad y la porosidad o saturación del terreno [11].

$$\rho_r = \frac{a\rho_w}{\phi^m S^n} \quad (1)$$

En donde S es el coeficiente de saturación, p_w es la resistividad del fluido de los poros, p_r es la del terreno, ϕ la porosidad, $n=2$, $1.4 \leq m \leq 2.20$ es el coeficiente de cimentación y $0.6 \leq a \leq 1$.

Empleando estas fórmulas y distintos experimentos se pueden calcular los rangos de resistividades de distintos materiales [Figura 2-1], aunque estos puedan variar de forma significativa según la influencia de algunos factores.

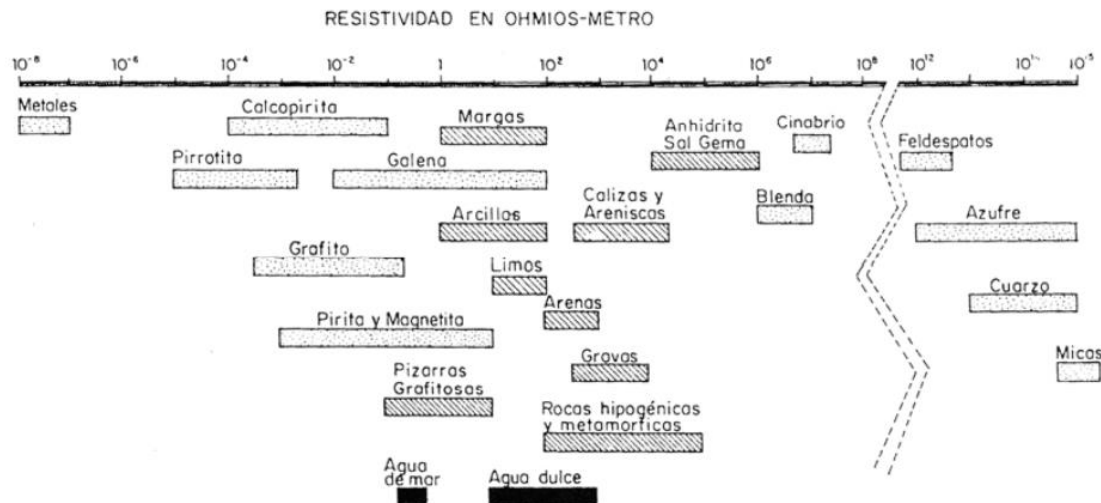


Figura 2-1 Rangos típicos de resistividad para rocas y suelos [11]

2.2 Tomografía Eléctrica

2.2.1 Objetivo del método

El objetivo de este método es determinar la resistividad del suelo o material para analizar su composición mediante la obtención de un diagrama 2-D de las resistividades reales del terreno. Se hace uso de un programa de inversión para transformar las resistividades aparentes obtenidas con el equipo a valores reales permitiendo localizar áreas con disminución anómala de la resistividad, lo que indica la presencia de filtraciones [11].

La Tomografía eléctrica es un avance significativo en comparación con los métodos de resistividad convencionales. Antes, los métodos solo utilizaban 4 electrodos y requerían un proceso manual y lento para variar su posición en el terreno, lo que limitaba su resolución 2-D y su efectividad. La Tomografía eléctrica, por otro lado, es una técnica multielectrónica automatizada que permite realizar muchas más medidas en un corto periodo de tiempo y obtener modelos 2-D de alta resolución. Además, las técnicas numéricas permiten procesar eficazmente el gran volumen de información obtenido.

2.2.2 Principio teórico

Aunque la Tomografía eléctrica sea un método multielectrónico, su funcionamiento es igual al de los métodos convencionales de resistividad de 4 electrodos. [Figura 2-2]. Éstos, introducen en el terreno un campo eléctrico utilizando dos electrodos (A y B) que están conectados a un amperímetro, para registrar el flujo de corriente que va del electrodo A (electrodo de corriente C1) al electrodo B (electrodo de corriente C2). Por otro lado, los otros dos electrodos (M y N) se encuentran conectados a un voltímetro para registrar la diferencia de potencial entre esos dos puntos (electrodo M correspondiente al de potencial P1 y N al de potencial P2). Ambos datos serán empleados para determinar el valor de la

resistividad aparente en el punto medio del dispositivo, a una profundidad que dependerá de la separación de los electrodos [2.2.4.3 Profundidad de investigación].

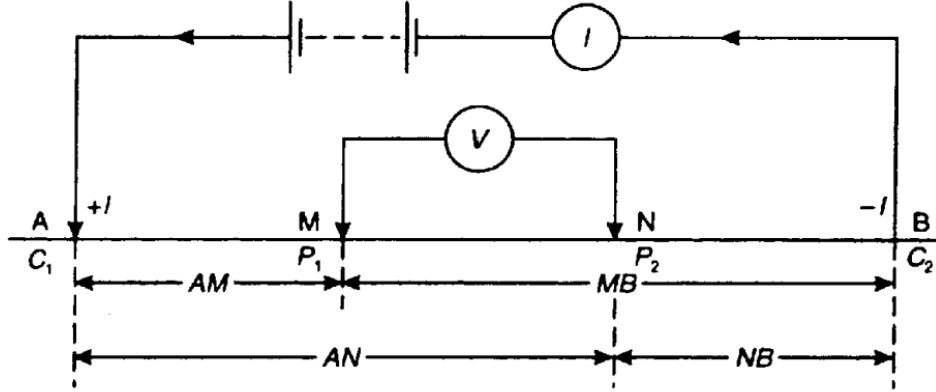


Figura 2-2 Esquema funcionamiento 4 electrodos [2]

Utilizando diferentes leyes y ecuaciones, la diferencia de potencial se ve directamente afectada por las resistividades de los materiales del subsuelo por los cuales está circulando la corriente [12].

En primer lugar, a partir de la ley de Ohm (2), relacionamos el vector densidad de corriente ($\vec{J}$) y el campo eléctrico ($\vec{E}$), a través de la conductividad eléctrica del medio (σ), siendo esta la inversa de la resistividad.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

Por otro lado, mediante la ley de Faraday (3), relacionamos la corriente eléctrica con el potencial eléctrico. Si consideramos que el campo eléctrico está en estado estacionario, es decir (4), el campo eléctrico sería rotacional y se podría expresar a partir de un potencial eléctrico mediante (5).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} U \quad (5)$$

Del mismo modo, si suponemos un medio homogéneo, cuando inducimos corriente por el electrodo, la propagación del campo eléctrico se realiza trazando una forma semiesférica. La densidad de corriente ($\vec{J}$), al estar dirigida en dirección normal, tendría el mismo valor en todos los puntos de la semiesfera y por tanto la integral de $\vec{J}$ en dicha superficie será igual a la intensidad de corriente inyectada (6). Si sustituimos esta expresión con la ley de Ohm (2), obtenemos los siguiente:

$$2\pi r^2 J = I \quad (6)$$

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (7)$$

$$E = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (8)$$

Por último, con esta expresión (8) y con la ley de Faraday (5), somos capaces de relacionar el campo E, la diferencia de potencial y la resistividad del material. Esta relación se expresaría mediante (10).

$$\Delta U_N^M = - \int_N^M \mathbf{E} \, d\mathbf{l} \quad (9)$$

$$\Delta U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (10)$$

En la cual, ΔU_N^M se corresponde a la diferencia de potencial entre los electrodos M y N y r_1 y r_2 indicarían las distancias a los electrodos de corriente.

2.2.3 Problema directo: Cálculo de la resistividad aparente

El problema directo consiste en encontrar la expresión del potencial eléctrico que nos permita obtener la distribución de las resistividades aparentes del subsuelo, lo cual será esencial para posteriormente obtener las resistividades reales del terreno.

Para ello, utilizamos la expresión anterior (10), metiendo las distancias correspondientes la podemos expresar de la siguiente manera:

$$\Delta U_N^M = \nabla V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (11)$$

Es de esta fórmula de donde sacamos el valor de la resistividad aparente, despejando p:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (12)$$

Esta ecuación, se obtiene para una configuración de 4 electrodos y un medio homogéneo. Puesto que el subsuelo no es un medio homogéneo, lo que calculamos es la resistividad aparente que depende del coeficiente K o “coeficiente geométrico del dispositivo” que cambiará según la distancia entre los electrodos:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (13)$$

2.2.4 Configuración de los electrodos

Como acabamos de ver, el valor de la resistividad aparente depende de cómo se coloquen los electrodos, definiendo el factor geométrico K. Esto implica que existen varias formas de realizar esta configuración de electrodos, distinguiendo principalmente tres tipos, dos de los cuales tienen el nombre de su creador: configuración Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. Además, también existen las configuraciones cuadrada y Wenner-Schlumberger.

Estos diferentes tipos y estilos de configuración de electrodos tienen distintas ventajas y desventajas. Los factores que afectan a la elección del tipo de matriz incluyen la cantidad de espacio disponible y la intensidad de trabajo de cada método.

Configuración Wenner

En la configuración Wenner los 4 electrodos están separados la misma distancia “a” y alineados.

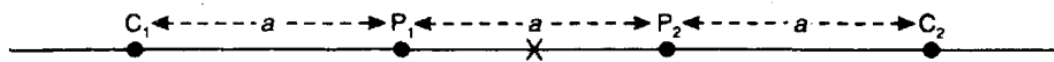


Figura 2-3 Esquema configuración Wenner [2]

En [Figura 2-4] se muestra la contribución de la señal para esta configuración. En la región cercana a la superficie, la respuesta principal que se origina a través de la profundidad tiene una forma plana, lo cual indica que, para capas horizontales tiene una alta resolución vertical.

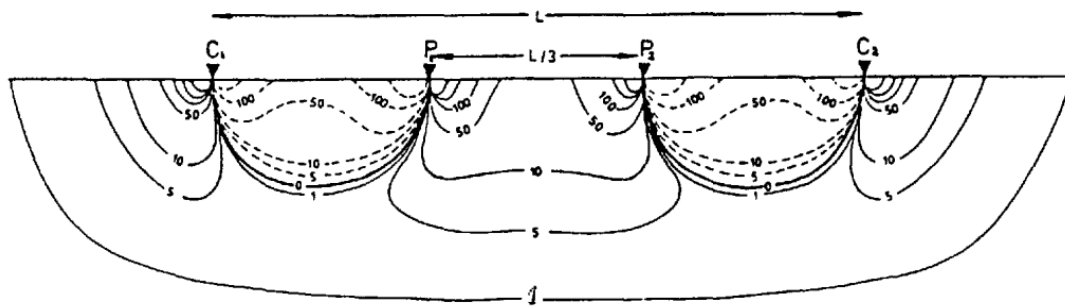


Figura 2-4 Señal configuración Wenner [2]

Configuración Schlumberger

En esta configuración los cuatro electrodos se encuentran nuevamente alineados pero hay dos distancias distintas: la distancia “b” entre los electrodos que miden el potencial que es menor que la distancia “a” entre los que generan el campo eléctrico.

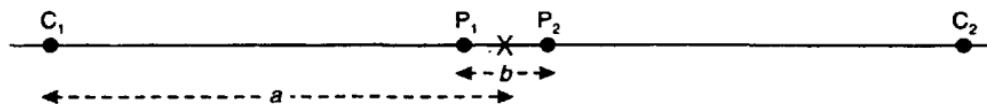


Figura 2-5 Esquema configuración Schlumberger [2]

La matriz Schlumberger tiene una resolución vertical también alta pero ligeramente menor, lo cual se puede apreciar a causa de la señal en profundidad que tiene una forma cóncava y no plana

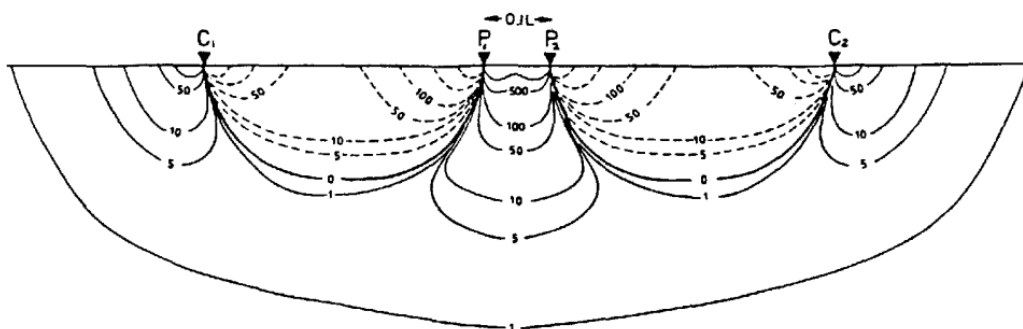


Figura 2-6 Señal configuración Schlumberger [2]

Configuración dipolo-dipolo

Se caracteriza por tener los electrodos que miden el potencial fuera de los que generan corriente. La distancia de cada pareja es “a” y entre las dos hay una distancia “na”.

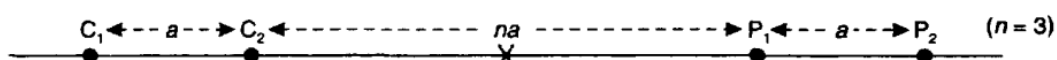


Figura 2-7 Esquema configuración dipolo-dipolo [2]

En el método dipolo-dipolo, los lóbulos que se generan indican que tiene una mala resolución vertical y es sensible a las variaciones de resistividad laterales, lo cual la hace imposible de usar en sondeos eléctricos verticales pero si óptima para calicatas eléctricas.

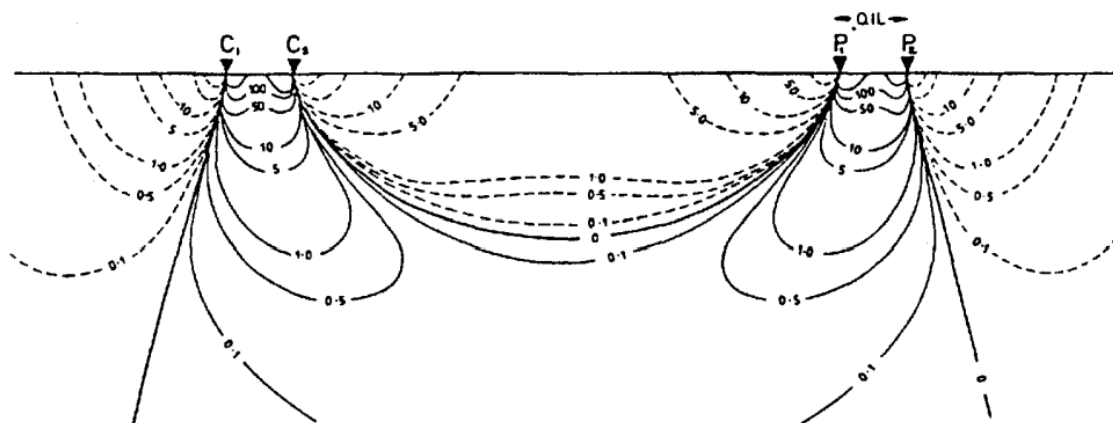


Figura 2-8 Señal configuración dipolo-dipolo [2]

Configuración Cuadrada

La disposición de los electrodos es un cuadrado de lado “a”

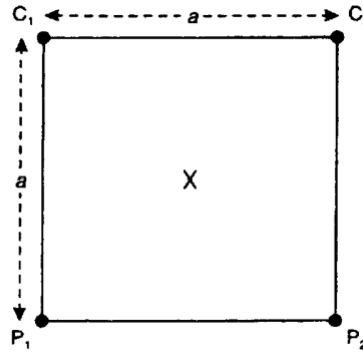


Figura 2-9 Esquema configuración cuadrada [2]

Configuración Wenner-Schlumberger

Mezcla entre las dos configuraciones. Las distancias son como las de dipolo-dipolo pero el orden de los electrodos es similar a las otras configuraciones.

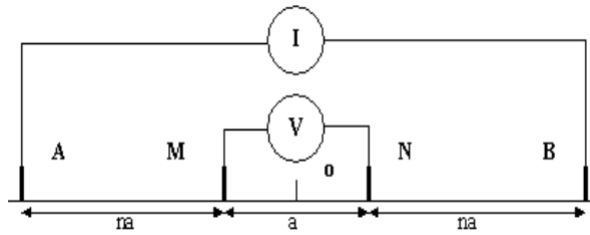


Figura 2-10 Esquema configuración Wenner-Schlumberger [11]

Según la configuración, si insertamos las distancias de los electrodos en (10) obtenemos la siguiente tabla de resistividad aparente con coeficientes K distintos.

Tabla 2 Resistividad aparente según configuración de electrodos [2,11]

Wenner	$\rho_a = 2\pi a R$
Schlumberger	$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R$
Dipolo-Dipolo	$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)aR$
Cuadrado	$\rho_a = \pi a(2 + \sqrt{2})R$
Wenner-Schlumberger	$\rho_a = \pi n(n+1)aR$

En cuanto a las ventajas y desventajas de cada configuración, en [Tabla 3] se muestra la eficacia de cada una según el tipo de medición además de otros criterios.

Tabla 3 Ventajas y desventajas según configuración de electrodos [2]

✓✓✓-Óptimo; ✓✓- Moderado; ✓- No óptimo; x- Inadecuado

Criterio	Wenner	Schlumberger	Dipolo- Dipolo	Cuadrado
<i>Resolución Vertical</i>	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓
<i>Profundidad de penetración</i>	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓
<i>Eficaz en VES</i>	✓✓	✓✓✓	✓	x
<i>Eficaz en CST</i>	✓✓✓	x	✓✓✓	✓✓✓
<i>Sensibilidad a la orientación</i>	Si	Si	Moderado	No
<i>Sensibilidad a variaciones de resistividad lateral</i>	Si	Moderado	Moderado	Si

2.2.5 Métodos de prospección geofísica

La tomografía eléctrica se puede realizar empleando distintos métodos. Cada método, es capaz de utilizar diferentes configuraciones de electrodos incluso pueden emplear la misma. La principal diferencia entre estos es la manera en la que toman las medidas.

Dependiendo de la posición de los electrodos de corriente y potencial, se recopilarán datos en diferentes profundidades (coordenadas z) y debajo de diferentes posiciones de superficie (coordenadas X e Y) como puntos individuales. Por tanto, según en que coordenados midamos, existes distintos tipos de métodos:

- i. **Calicata Eléctrica (CE) en inglés Constant Separation Traversing (CST):** utiliza una disposición de electrodos manual, generalmente empleando la configuración de Wenner por su facilidad de uso, en el que la separación de los electrodos se mantiene fija. El equipo se desplaza a lo largo de un perfil y se determinan valores de resistividad aparente a lo largo del perfil a estudiar siempre a una profundidad constante. Al estar midiendo continuamente a la misma profundidad, las mediciones se representan con un diagrama con dos ejes (uno para la resistividad y otro para la posición de la medida respecto a un punto de referencia) [Figura 2-11].
- ii. **Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en inglés Vertical Electrical Sounding (VES):** se recopilan datos desde diferentes profundidades debajo de un punto fijo en la superficie. Esto significa que todos los puntos de datos tendrán la misma posición en la superficie (coordenadas X e Y), pero se medirán a diferentes profundidades (coordenada Z). La colocación de electrodos se basa en un punto medio. Cuanto más lejos estén los electrodos del punto medio, más profundo será la medición [Figura 2-12]. Para cada punto de datos, es necesario mover manualmente los electrodos. Los datos se presentan generalmente en un gráfico con la profundidad en un eje y la resistividad aparente en el otro.

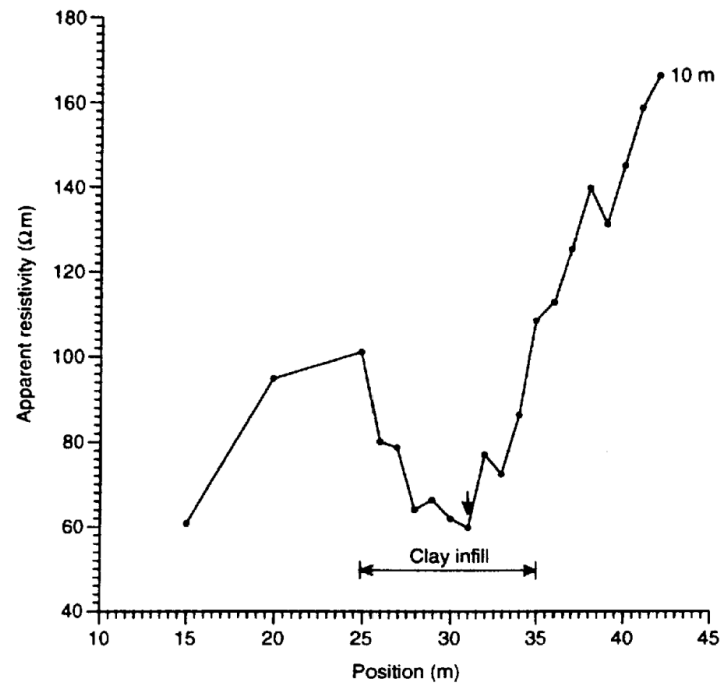


Figura 2-11 Diagrama mediciones CST [2]

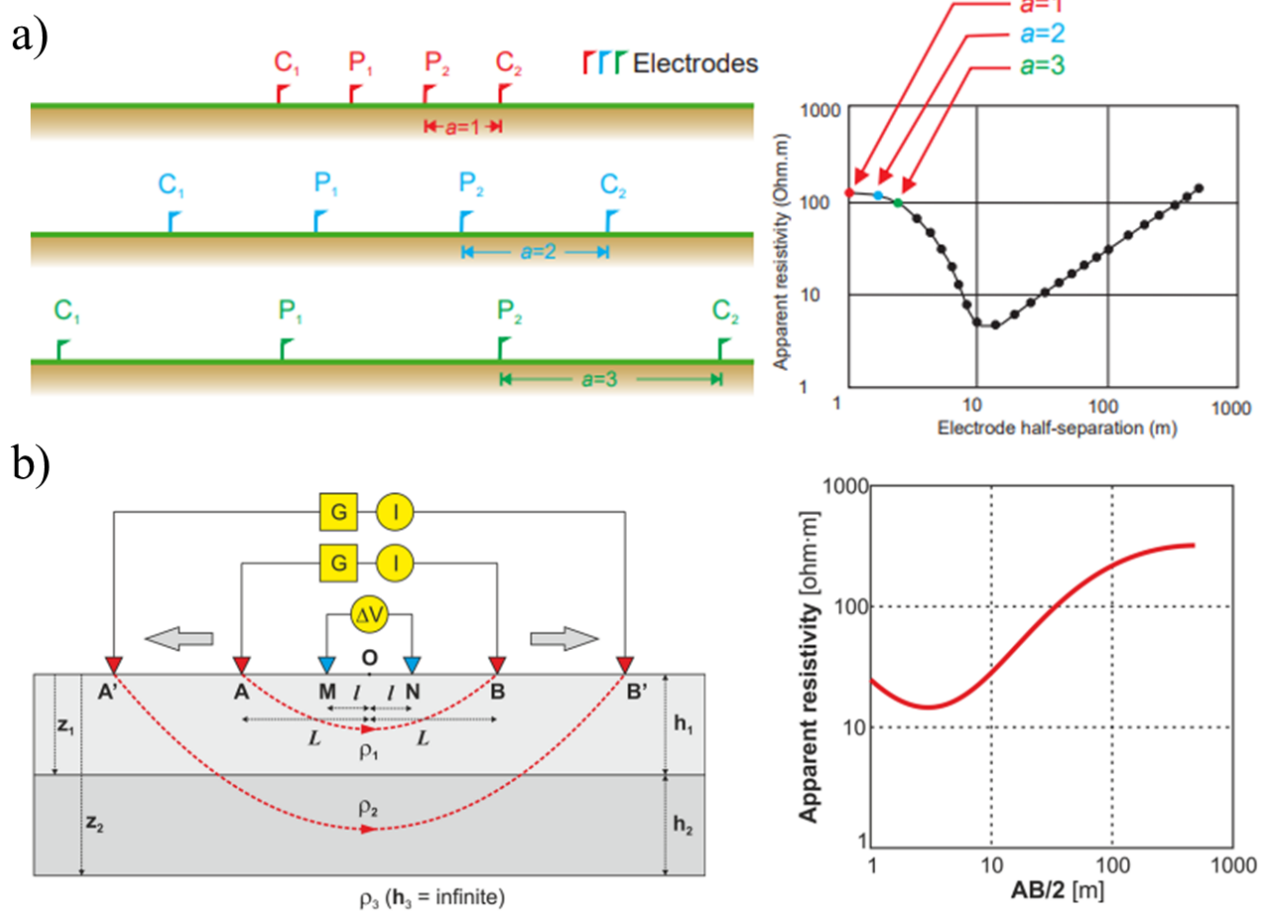


Figura 2-12 Ejemplo de un Sondeo Eléctrico Vertical con la configuración Wenner a) y con la configuración Schlumberger b) [13]

- iii. **Tomografía de Resistividad Eléctrica, en inglés Electrical Resistivity Tomography (ERT):** El método de tomografía eléctrica es una combinación de los dos anteriores ya que combina mediciones en diferentes profundidades y posiciones laterales. Debido a que la ERT es un método multidimensional, los puntos de datos se pueden medir en un perfil 2D o una malla 3D. Para un perfil 2D, se colocan múltiples electrodos en una línea a una distancia fija. El sistema elige automáticamente qué electrodos utilizar para la inyección de corriente y las lecturas de voltaje, y, en un corto tiempo, puede medir un alto número de puntos de datos. Los puntos de datos tendrán coordenadas X e Y variables, pero una coordenada Z fija. Para un perfil 3D a gran escala [Figura 2-13], los datos de un número de líneas de perfil 2D se pueden combinar en el software de procesamiento para modelar las variaciones de resistividad en X, Y y Z simultáneamente [14].

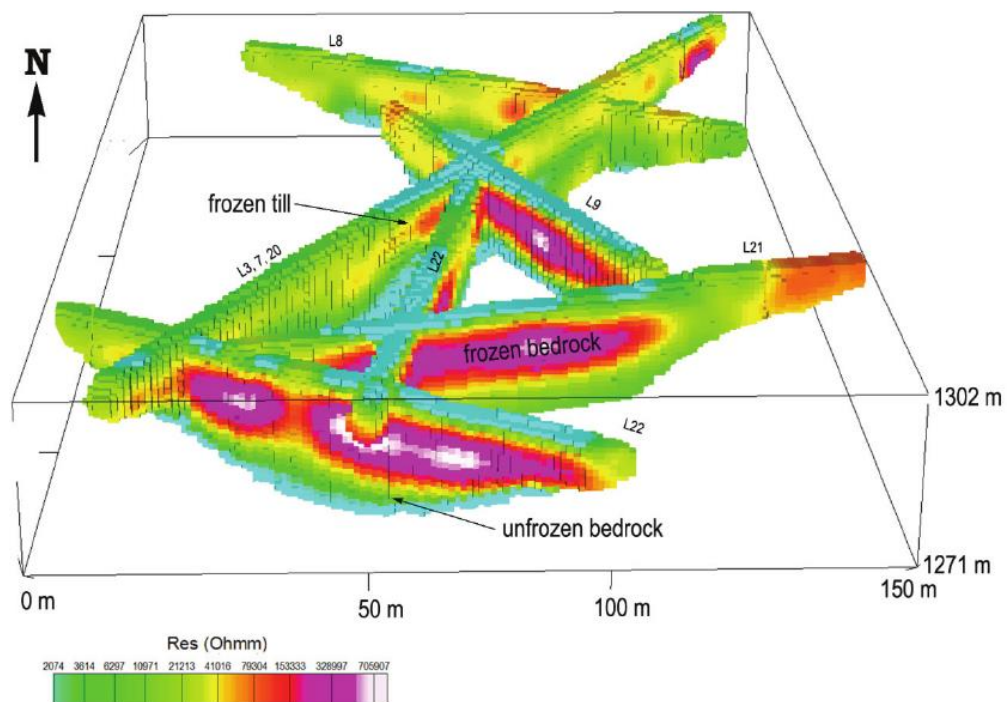


Figura 2-13 Diagrama ERT en 3D [15]

2.2.6 Cálculo de la resistividad real. Técnicas de inversión.

Habiendo obtenido la resistividad aparente, el siguiente paso será obtener la resistividad real. El objetivo del problema inverso es obtener un modelo de distribución de las resistividades reales del subsuelo que, dado un determinado dispositivo electrónico, genere una respuesta similar (resistividades aparentes teóricas) a los valores de resistividad medidos con el mismo dispositivo (resistividades aparentes experimentales) [11].

Para lograr esto, se utiliza un programa de inversión. Las técnicas de inversión que existen actualmente se dividen en dos grandes grupos:

i. Block inversión method

Se suele utilizar en situaciones cuando hay grandes variaciones de resistividad en el terreno. Por ello es ideal para cuerpos con resistividades muy diferentes. Sin embargo, su principal

inconveniente es que se necesita introducir un modelo previo para que el ordenador ajuste el modelo calculado al de campo.

ii. Smoothness-constrained inversión method

Es el método más utilizado para variaciones graduales en la resistividad del terreno, como por ejemplo filtraciones de agua o vertidos de contaminantes y además no necesita un modelo previo como el método anterior.

Un programa de inversión que trabaja de esta manera es RES2DINV [16], cuyo funcionamiento es el siguiente:

1. Verifica los datos de campo. Para ello visualiza los valores medidos y elimina los valores que considera erróneos, si se alejan mucho al valor que debería ser.
2. Define el valor de los parámetros de cálculo necesarios en el proceso de inversión.
3. Divide el terreno en bloques (se puede hacer de forma automática o manual)
4. Realiza los cálculos:
 - Se genera un modelo homogéneo de resistividades
 - Calcula el modelo de resistividades aparentes
 - Compara el modelo aparente calculado con el medido en el campo
 - Comienza a llevar a cabo el modelo de resistividades reales realizando una comparación entre el modelo de resistividades aparentes calculado y el medido, de tal manera que la diferencia entre estos sea mínima. Este es un proceso iterativo y terminará cuando se alcance el criterio predefinido o cuando se llegue al número de iteraciones establecido.
 - Visualiza los resultados obtenidos [Figura 2-14].

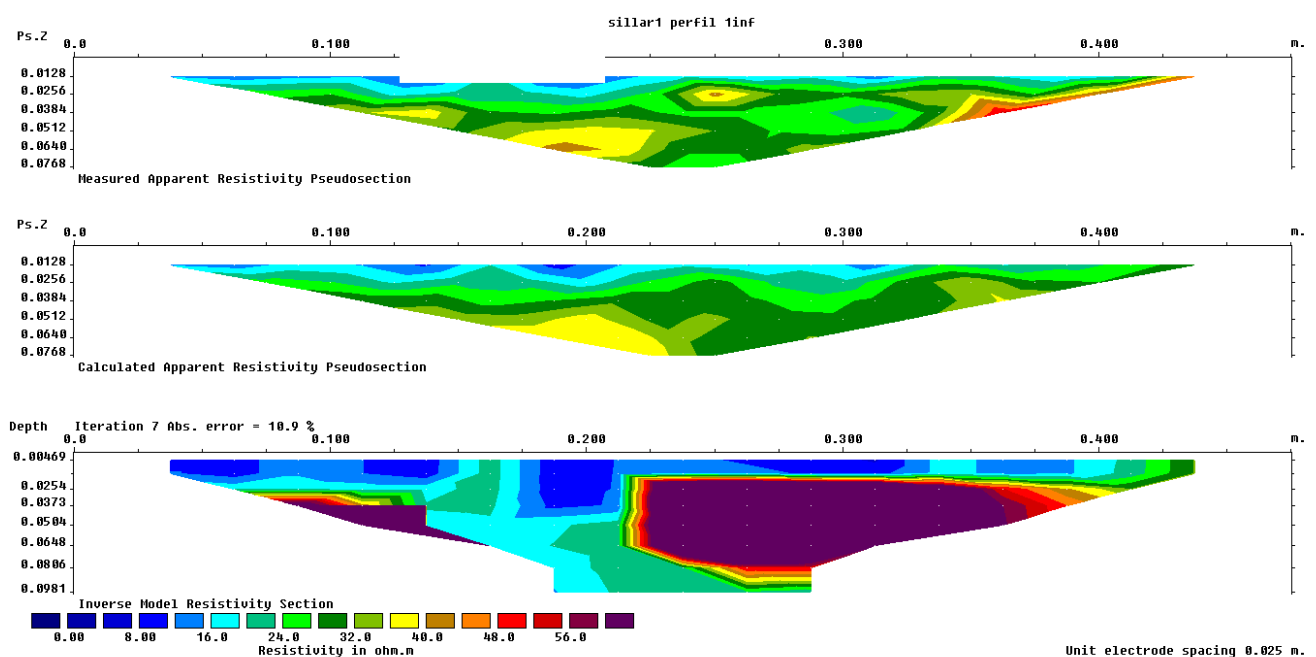


Figura 2-14 Visualización resistividad aparente y real en RES2DINV [17]

2.2.3 Equipo requerido

El equipo utilizado para realizar una medición a través del método de tomografía eléctrica consta de los siguientes elementos:

- **Electrodos:** Son simplemente barras metálicas por donde circulará la corriente hasta el suelo o donde se medirá la caída de potencial. Su número dependerá de las aplicaciones del equipo.
- **Cable:** De gran longitud para poder contener todos los electrodos y conectarlos al instrumento de medida.
- **Conectores:** Cables más pequeños con pinzas en los extremos para conectar los electrodos con el cable.
- **Ordenar portátil:** Mediante este, se utiliza un software para determinar las variables de trabajo, elegir el número de electrodos, distancia entre ellos y la forma en la que van a operar. Además, también se encargará de pasar la resistividad aparente a resistividad real y de presentar una visualización de los resultados obtenidos.
- **Unidad central:** Es básicamente un resistivímetro que se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas de la forma que hemos especificado con el software, verificar que todas las conexiones funcionan correctamente y almacenar todos los resultados del campo [Figura 2-16].
- **Batería:** Es la fuente de alimentación de todo el sistema [Figura 2-15].



Figura 2-15 Batería Tomografía eléctrica [18]



Figura 2-16 Unidad central tomografía eléctrica [19]

2.2.4 Metodología de campo

2.2.4.1 Planificación de la campaña de reconocimiento

En la fase de planificación de una campaña de campo, hay ciertos aspectos clave que se deben tener en cuenta para garantizar su éxito. Estos incluyen definir con claridad los objetivos a alcanzar, determinar el número y ubicación de los perfiles a realizar, establecer la profundidad máxima de investigación, elegir el dispositivo electrónico adecuado (mediante la cantidad y distribución de electrodos) y adoptar medidas preventivas para garantizar la calidad de los datos recogidos.

La tomografía eléctrica se utiliza para obtener perfiles 2-D o 3-D de resistividad del terreno y se basa en la idea de analizar posibles filtraciones en estructuras lineales, como aplicación más usada. Para lograr esto, es necesario disponer los perfiles de electrodos de manera lo más paralela posible a la traza de la estructura que se está investigando.

Si por ejemplo se desea cartografiar las trayectorias del agua en un lugar determinado, se podría disponer diferentes perfiles de electrodos transversalmente a la traza del flujo del agua para establecer una imagen aproximada en 3 dimensiones. El número de electrodos necesarios varía, dependiendo del tamaño de la zona a medir lo cual influye en el tiempo de medición. Estos, normalmente se disponen de manera equidistante, es decir, utilizando la configuración Wenner.

Hay dos aspectos importantes a tener en cuenta al planificar una campaña de campo utilizando este método. Uno es la profundidad máxima de investigación, y el otro es el área de definición. La profundidad máxima de investigación depende del dispositivo electrónico utilizado y la separación de los electrodos. El campo de definición disminuye con la profundidad, por lo que cuanto más profundo sea el perfil, más difuso será en los laterales, creando un diagrama triangular como en [Figura 2-14]. Si se pretende confeccionar un perfil de gran longitud, es necesario establecer cierto solape entre perfiles para reducir esta indefinición en los extremos [11].

2.2.4.2 Metodología y adquisición de datos

Antes de realizar cualquier medición, es necesario colocar los electrodos en la superficie, formando una línea recta y definiendo el origen y final del perfil para evitar problemas en la interpretación posterior. Es importante intentar tener un terreno lo más plano posible, pero si eso no es posible, se puede usar un software para minimizar los efectos anómalos en las medidas de resistividad. Una vez que los electrodos están en su lugar, es vital garantizar un buen contacto con la roca y luego conectarlos al cable a través de los conectores.



Figura 2-17 Ejemplo de tomografía eléctrica en el campo [20]

Se utiliza un portátil [Figura 2-17] para configurar las variables del dispositivo, incluyendo el número de electrodos y la distancia entre ellos, el dispositivo electrónico de medición y el número de medidas que se desean realizar. La unidad central recibe estas especificaciones y realiza automáticamente toda la secuencia de mediciones. Antes de iniciar las mediciones, se verifica que todas las conexiones funcionan correctamente y que la resistividad entre electrodo-material es aceptable. Luego, se inicia la secuencia de medidas y una vez terminado el proceso, se vuelca la información en el portátil para su procesamiento e interpretación.

2.2.4.3 Profundidad de investigación

En primer lugar, es importante tener en cuenta que la profundidad a la que se encuentra cada medida de resistividad es un tema que puede ser ambiguo, ya que depende de varios factores, como la disposición de los electrodos y la resistividad del terreno. Para determinar la profundidad aparente, se comienza por situar cada medida en la profundidad óptima en el caso de un terreno homogéneo. La profundidad de investigación cambia en función de la configuración empleada [21]. Para las configuraciones Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo esta profundidad suele ser del orden de $1/5$ de la separación entre los electrodos de corriente. En otras configuraciones como la configuración Polo-Dipolo esta profundidad es del orden de $1/3$ de la separación entre los electrodos de corriente.

El software nos permite ver la distribución de las medidas tanto en la superficie como en profundidad, lo que nos permite ajustar la profundidad de investigación para cumplir con nuestros requisitos. En conclusión, según la configuración que utilicemos tendrá un efecto u otro en la profundidad máxima de investigación.

2.2.5 Aplicaciones

La tomografía eléctrica, detecta cambios en la resistividad eléctrica del subsuelo, lo que puede indicar la presencia de diques, fracturas, cuerpos enterrados, cavidades, zonas de contaminación, contactos laterales entre diferentes formaciones geológicas, etc. La combinación de los datos de resistividad obtenidos a través de este método junto con los datos sísmicos proporciona información precisa sobre la estructura y geología del subsuelo, lo que es útil para proyectos de ingeniería civil. Además, la tomografía eléctrica es una herramienta efectiva para caracterizar el subsuelo en sitios contaminados y para evaluar la distribución de contaminantes y planificar la rehabilitación de la zona afectada. En conclusión, envuelve multitud de aplicaciones, de las cuales se mencionarán a continuación de forma más específica.

2.2.5.1 Análisis de deslizamientos

El estudio de los deslizamientos de tierra implica la aplicación de técnicas multidisciplinarias como la observación, la investigación geotécnica y las prospecciones geofísicas. Se ha encontrado que la tomografía eléctrica es un método útil para obtener información sobre los deslizamientos. Muchos estudios previos han demostrado que la masa deslizante suele ser de resistividad más baja que los materiales que la rodean, lo que es probablemente debido a la infiltración de agua. Analizando los diagramas de resistividad obtenidos se puede determinar tanto la extensión como la longitud en profundidad del deslizamiento además de su causa. Obtener esta información nos puede permitir en un futuro evitar futuros deslizamientos.

Un ejemplo, es el estudio de Cervantes en 2012 [12] de una deformación de ladera ocurrida en 1997. En este estudio, se cree que el deslizamiento fue causado por una fuerte lluvia en 2012. Se utilizó la tomografía eléctrica para obtener información sobre el deslizamiento. Se pudo detectar la superficie de rotura y las diferentes capas geológicas en el subsuelo. La comparación de medidas en diferentes

momentos también mostró una reactivación en el deslizamiento. Los resultados [Figura 2-18] indicaron que existe una capa de material altamente resistivo en la base, seguido de una capa de material menos resistente que es la que se está deslizando debido a su alto contenido de agua. La superficie de rotura se encuentra en la transición entre estas dos capas.

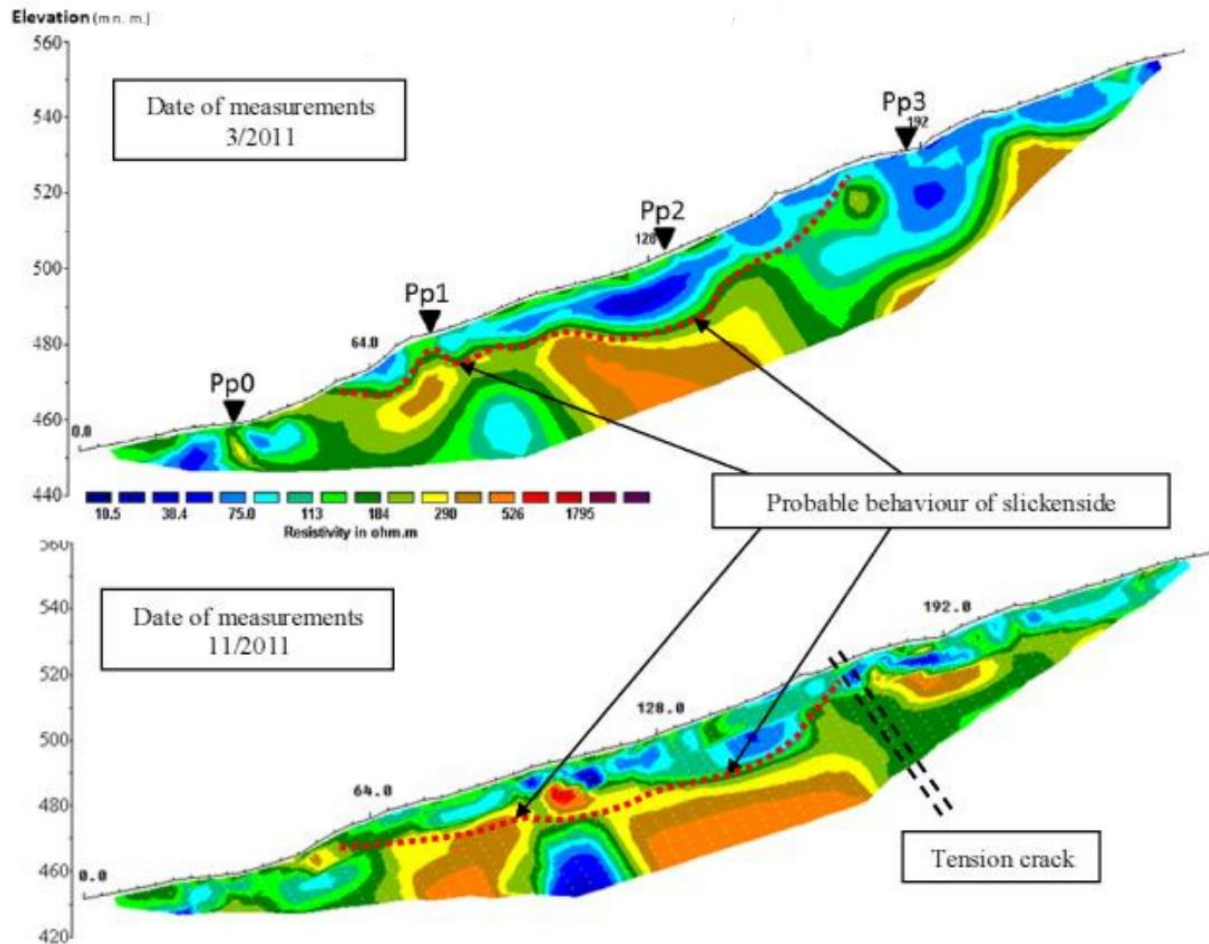


Figura 2-18 Estudio deslizamiento Cervantes 2012 [12]

2.2.5.2 Reconocimiento geoelectrico de una presa

Las presas se construyen para contener el agua o los relaves de minería y son imprescindibles para la sociedad. La seguridad y estabilidad de estas estructuras son esenciales ya que un posible accidente podría generar daños catastróficos. La principal causa de las roturas está asociada con el filtrado anormal, que puede progresar hasta un proceso de erosión interna. Para evaluar el estado de las presas, se llevan a cabo inspecciones periódicas, que generalmente incluyen inspecciones visuales e instrumentación geotécnica.

Las inspecciones visuales, son subjetivas y pueden estar sujetas a errores y diagnósticos tardíos. Sin embargo, la instrumentación geotécnica tradicional aporta información importante que puede ayudar a entender la estabilidad física de la estructura detectando la infiltración y las zonas de percolación de agua. La identificación de estos problemas permite planificar medidas correctivas en la fase inicial de su desarrollo. Estas técnicas realizan investigaciones no destructivas, simples, de bajo costo y adquisición rápida. No obstante, su mayor desventaja es que estos métodos están limitados principalmente en cuanto al alcance de los instrumentos.

Es por ello que el método de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) se ha aplicado cada vez más para investigaciones de filtraciones y control de estado de los embalses. El éxito de la ERT se puede

atribuir a su capacidad para detectar la variación del contenido de humedad dentro del cuerpo del embalse que acompaña la filtración anormal, la cual se asocia con la disminución de la resistividad eléctrica.

Un ejemplo de esta aplicación es el uso de la técnica ERT para investigar las condiciones de infiltración en una presa en Chile [22]. Esta presa, presentaba pérdidas de las reservas acumuladas de agua y se quería identificar en que puntos se estaban produciendo esas fugas. Tras obtener los resultados se permitió diferenciar tres bloques de resistividad diferentes. El primero en la parte superior, formado por los rellenos heterogéneos, el segundo justo por debajo formado por un conjunto de gravas y arenas depositadas por acción glacial y por último en la parte inferior un bloque resistivo formado por el sustrato rocoso (granitos).

También, una vez identificado los materiales, se observó la existencia de distintas anomalías, mostradas en color azul claro en [Figura 2-19]. La mayor parte atribuidas a un desplazamiento lateral de la capa de gravas y arenas y alguna a alguna posible fractura. Estas anomalías tienen valores de resistividad muy bajos y por tanto se interpretaron como posibles conductos por donde circulaba el agua.

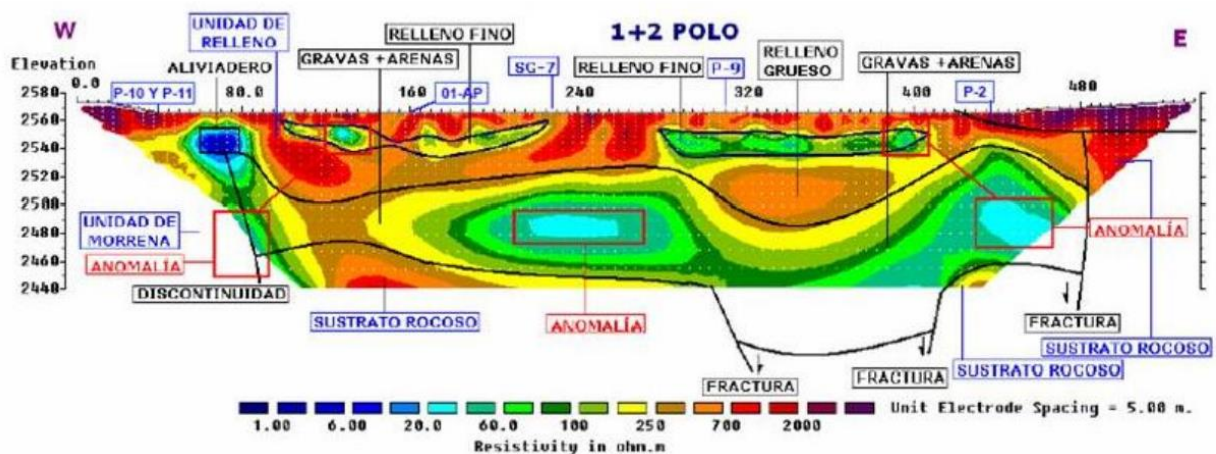


Figura 2-19 Perfil tomografía eléctrica presa de Chile [22]

2.2.5.3 Búsqueda de cavidades

Desde hace mucho tiempo se reconoce la importancia de las cuevas en la minería, el medio ambiente, la arqueología, el turismo, etc. Las cuevas pueden tener un origen natural o pueden originarse por actividades antropogénicas, como por ejemplo en la minería, o para proyectos de ingeniería.

El conocimiento de la ubicación y extensión de las cuevas es muy importante durante la construcción y mantenimiento de infraestructuras (túneles, carreteras, ferrocarriles, sistemas de alcantarillado) y cuando las zonas urbanas se extienden a antiguas áreas mineras o regiones kársticas. De hecho, los riesgos de colapso y el transporte de contaminantes pueden dar lugar a eventos peligrosos. Las cuevas también se utilizan como depósitos de gas, residuos peligrosos y tóxicos, por lo que esta es otra razón por la cual es necesario su monitorización.

Normalmente esto se lleva a cabo mediante el mapeo de la superficie, documentos y descripciones locales. Sin embargo, a menudo es difícil obtener registros locales. También es posible que no haya información disponible en regiones donde no hay evidencia de cuevas en la superficie o en casos de rápido desarrollo de cuevas, como las simas.

En esta contribución, se enfoca en la aplicación de métodos geofísicos en la exploración de cuevas, centrándose en el uso de métodos de resistividad 2D, como la tomografía de resistividad eléctrica (ERT).

Las cuevas pueden ser más conductivas o más resistivas que las rocas que las rodean. Las cuevas llenas de agua son más conductivas que el medio circundante. Sin embargo, cuando están vacías, son más resistivas ya que el aire no es un conductor de electricidad. Por lo tanto, en el primer caso, la respuesta de la cueva a los métodos de resistividad es una anomalía conductiva, mientras que en el segundo caso, la respuesta será una anomalía resistiva, como se ve en [Figura 1-2], en el estudio de la plaza Unirii.

Un ejemplo de utilización de esta aplicación en campo es el análisis de la mina de pizarras en Valongo, al norte de Oporto [23]. Esta mina comenzó en el siglo XIX y desde varias décadas está abandonada y sin registro exacto de su extensión. Tras decidir construir nuevos edificios en los alrededores, se requirió obtener información sobre la posición exacta y cuanto abarcaba la mina. Para ello, se decidió emplear el método ERT con una disposición Wenner-Schlumberger. Actualmente, únicamente se sabía de la existencia de una cámara en la superficie o pozo y los posibles límites laterales de este como muestra [Figura 2-20]. También se puede observar la entrada de la mina y las dos medidas ERT que se tomaron. Al inspeccionar el pozo, también se descubrió que la mina estaba inundada y el nivel del agua estaba muy cerca de la superficie y por tanto se esperaba encontrar anomalías conductivas.

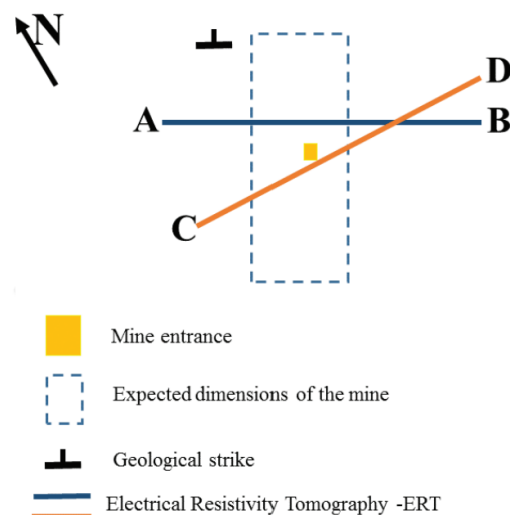


Figura 2-20 Cámara de mina y medidas ERT tomadas [23]

Primero se realiza la medida AB obteniendo los datos que aparecen a la izquierda de [Figura 2-21]. Estos muestran una capa resistiva por encima de una más conductora. La línea discontinua que parece muestra el límite de estas dos capas, que se encuentra a la misma profundidad que el nivel freático a la entrada de la cámara. Por debajo de este límite, no se obtiene más información relevante y por ello se llevó a cabo la segunda medición CD. Los resultados, mostrados a la derecha de [Figura 2-21], muestran también un cuerpo conductor, delimitado por la líneas discontinuas.

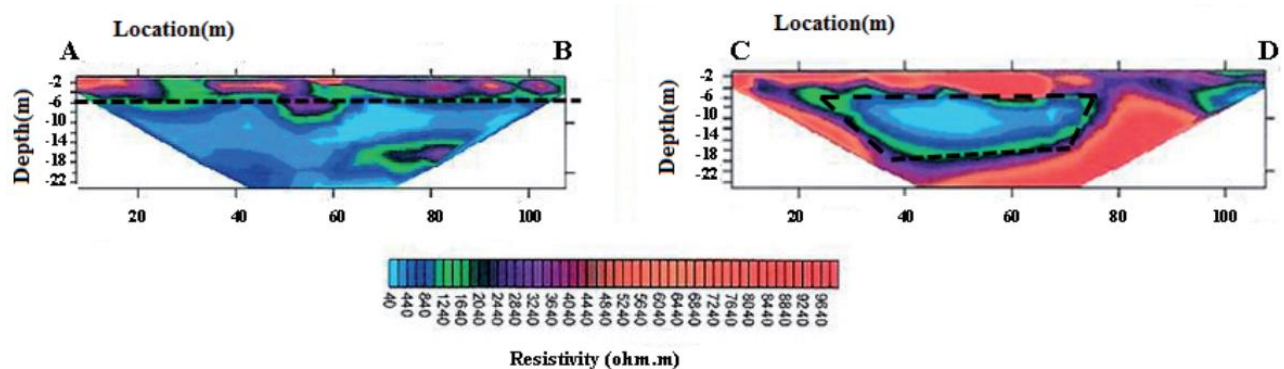


Figura 2-21 Resultados medidas ERTs pozo [23]

A poca profundidad, se representa una capa resistiva con el mismo espesor en ambas ERTs, que corresponde a la capa resistiva en la superficie por encima del nivel freático. Ya que la cámara está llena de agua, la anomalía conductora debe corresponder a la cámara minera y, de hecho, los límites laterales propuestos coinciden con los límites esperados de la línea discontinua [Figura 2-20]. Por lo tanto, mediante otro ángulo como el obtenido con la medición CD sí que se pudo delimitar de forma más precisa la cámara. Cuantas más mediciones se realicen desde distintas posiciones, más precisos serán los registros sobre la estructura de la mina.

2.2.5.4 Problemas medioambientales

La tomografía eléctrica, es también uno de los métodos más versátiles y usados en el análisis del subsuelo con fines relacionados con la contaminación del medio ambiente.

Hay muchos restos de la actividad humana en la superficie que deberían ser eliminados debido a su naturaleza y características. Por ejemplo, la contaminación del suelo por vertederos, hidrocarburos y residuos de antiguas balsas de lavado de mineral son problemas importantes que deben ser resueltos a través de una investigación previa de los terrenos afectados. La extensión de los materiales contaminantes en el suelo generalmente no se puede conocer sin realizar una prospección para delimitar su alcance y profundidad. Esto se puede lograr mediante métodos directos como la perforación de sondeos y catas, métodos indirectos como la prospección geofísica, o una combinación de ambos. Dentro de los métodos indirectos, se suele utilizar el método ERT por la gran distancia que abarca y por su rapidez.

A continuación se expondrán las diferentes aplicaciones dentro del ámbito de contaminación del medio ambiente [24]:

i. Vertederos

En el caso de los vertederos, su extensión superficial puede ser observada, pero la profundidad de su contacto con el substrato y las características de relleno no son identificables sin una prospección. La ejecución de sondeos permitirá conocer la naturaleza y espesor del relleno en los puntos de actuación, pero si hay importantes variaciones de espesor y naturaleza, la investigación sólo mediante perforaciones sería inviable desde el punto de vista económico. Es más lógico empezar por una prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica que delimiten el contacto entre el relleno y el substrato. Un ejemplo de esto se puede ver en [Figura 2-22], donde se muestra un perfil de tomografía eléctrica de un vertedero de residuos sólidos urbanos en el sur de Granada, que identifica los materiales de relleno del vertedero y los materiales resistentes que forman el substrato rocoso mediante diferentes colores.

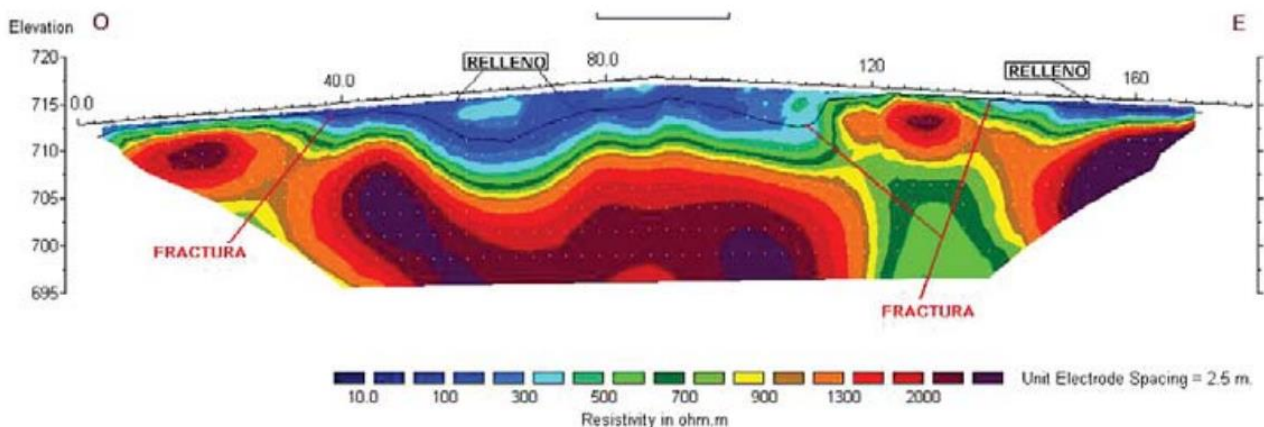


Figura 2-22 Perfil de tomografía eléctrica de un vertedero [24]

ii. Control contaminación de suelos

La tomografía eléctrica es útil incluso cuando se conoce la posición del contacto inferior del relleno, como en los casos en los que se quiere monitorear la posible contaminación del sustrato por lixiviado. En [Figura 2-23] se puede ver cómo una pluma de contaminación de lixiviados, que son líquidos altamente conductivos, penetra en el terreno después de la rotura de la membrana de aislamiento. La medición periódica de las resistividades permitirá hacer un seguimiento de la evolución de esa pluma contaminante.

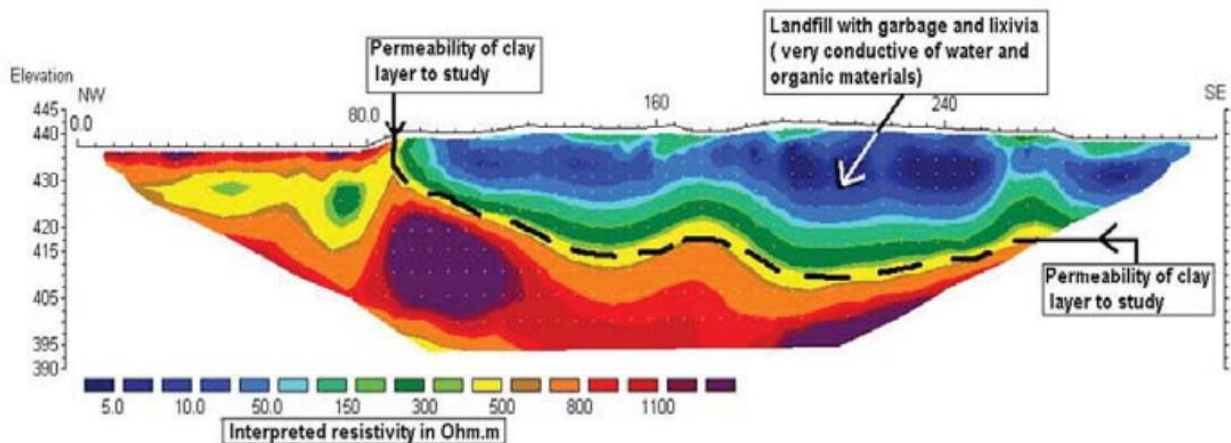


Figura 2-23 Perfil de tomografía eléctrica de una pluma de contaminación [24]

iii. Balsas mineras

Tanto las minas abandonadas como las balsas mineras constituyen el 18% de la producción total de residuos en la Comunidad Europea. Utilizando la inspección geofísica, al igual que en los vertederos, podemos conocer la extensión, el grosor y la naturaleza de los rellenos de una balsa minera. En este caso, los rellenos suelen ser más finos y por tanto las anomalías son más fáciles de detectar.

La [Figura 2-24] muestra una balsa minera abandonada en el suroeste de Vizcaya, cuyos materiales de relleno son homogéneos, lo que permite delimitarlos con respecto al sustrato rocoso. Las anomalías resistivas cercanas a la superficie, entre los metros 26 y 70 del perfil, ayudan a delimitar los materiales de origen desconocido en profundidad y extensión.

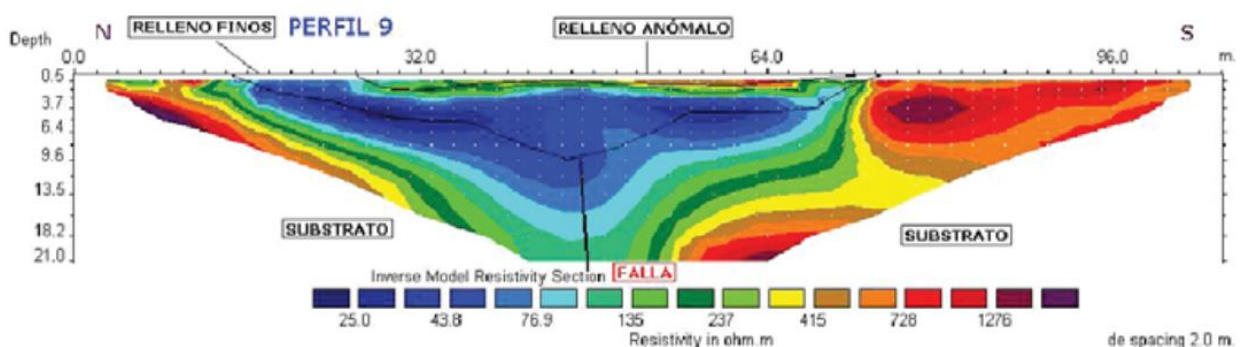


Figura 2-24 Perfil de tomografía en balsa minera [24]

2.2.5.5 Estudios en ingeniería civil

La base de un edificio existente o las bases abandonadas de cualquier edificio preexistente después de ser demolido lo denominaremos “bases enterradas”. El objetivo principal de cualquier base de construcción es anclar el edificio al suelo y se utiliza para diferentes tipos de edificios e infraestructuras (como edificios comerciales, puentes, presas y casas. Para satisfacer las necesidades de cualquier proyecto, se pueden utilizar bases poco profundas (como bases de esparcimiento, bases de franjas y bases combinadas) o bases profundas (como pilotes o pilares). Sin importar el tipo o el material de construcción de las bases enterradas, éstas generan una anomalía subsuperficial en el suelo que las alberga. Por lo tanto, las bases enterradas pueden producir cambios locales en las propiedades físicas del suelo que las alberga, por ejemplo, en la resistencia eléctrica, por lo que es posible realizar el método de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) para visualizar la subsuperficie y determinar la presencia de bases enterradas.

Un ejemplo sería el estudio de resistividad [25] realizado por Rungroj Arjwech, de la universidad de Khon Kaen en Tailandia, en un puente sobre el Río Brazos. En la ubicación de la base del puente, se encontró una anomalía de 2-3 $\Omega\cdot m$ mientras que el terreno circundante inmediato se eliminó con 5-6 $\Omega\cdot m$. Estas resistividades eléctricas cercanas se interpretaron debido a la condición de la base, que estaba parcialmente erosionada, las barras de refuerzo estaban expuestas, corroídas y en contacto con agua.

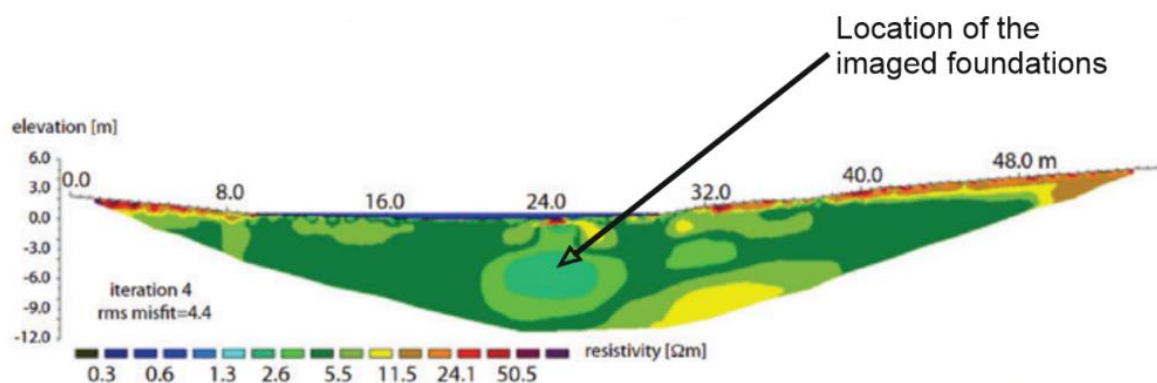


Figura 2-25 Diagrama de anomalía de baja resistividad en el puente del Río Brazos [25]

Otro claro ejemplo del uso de esta técnica es en la detección de patologías de alteración y entrada de humedades en edificios históricos como el realizado en la torre de la iglesia San Juan Bautista en Guadalix de la Sierra [26].

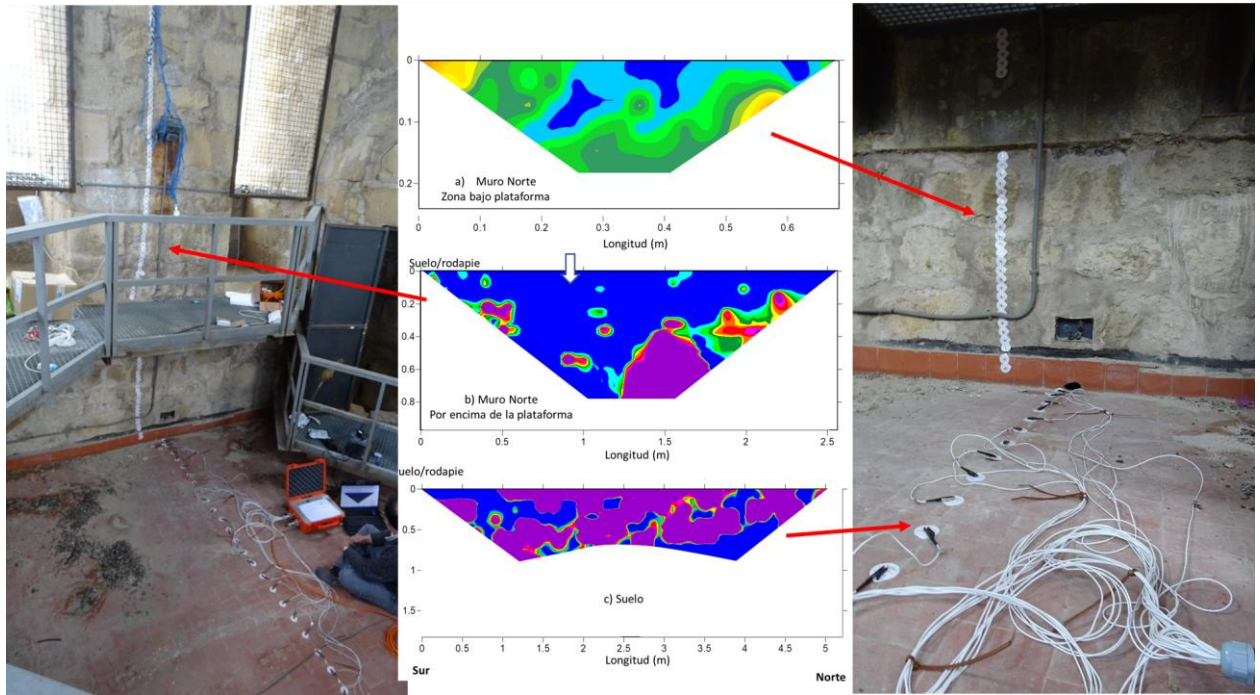


Figura 2-26 Líneas de prospección de resistividad eléctrica realizadas en muro, por encima y por debajo de plataforma metálica, y en el pavimento del campanario. Se muestran además los perfiles de resistividad correspondientes [26]

3 DESARROLLO DEL TFG

La tomografía eléctrica supone un método esencial en el análisis geofísico. Esto se debe a sus sobresalientes características frente a otros métodos (rapidez, amplitud, no destructivo, mediciones en tiempo real...) por las cuales se utiliza en un sinnúmero de aplicaciones ya que su funcionamiento le permite operar para la consecución de distintos fines de la ingeniería.

Este TFG propone el diseño y construcción de un pequeño equipo de tomografía eléctrica compuesto por 10 electrodos equidistantes, empleando la configuración Wenner. Se pretende que este aparato pueda utilizarse para aplicaciones de construcción ya que para análisis de suelos por ejemplo se necesitaría un aparato mucho más grande debido al aumento en la separación de los electrodos y las profundidades que se obtienen en las medidas [2.2.4.3 Profundidad de investigación].

Para ello, se seguirá la metodología mencionada en [1.4], que divide el trabajo en distintas partes o fases. A continuación, se explicará cómo se desarrolló cada fase y el proceso que se siguió.

3.1 Estudio de rangos de resistividad

Lo primero que se debe conocer para la construcción del equipo son los parámetros a los que tiene que trabajar. Tal como se aprecia en [Figura 2-1], cada material suele tener un rango de resistividad establecido. Por tanto, se tuvo que analizar las resistividades de los principales materiales con los que se iba a trabajar, en corriente continua, para definir las especificaciones que debe cumplir el equipo de tomografía eléctrica a construir.

Una vez se obtuvieron los regímenes de trabajo del equipo, se trataron de establecer los parámetros para operar en corriente alterna como son frecuencia y voltaje pico a pico que harían falta para empezar a diseñar y construir el dispositivo.

El estudio se realizó en tres partes. En la primera, únicamente se tomaron datos de los materiales que íbamos a utilizar, para utilizarlos en los cálculos de la resistividad aparente. En las dos siguientes se realizaron las pruebas tanto en corriente continua como en corriente alterna.

3.1.1 Datos del material

Las mediciones se tomaron en los siguientes materiales de construcción: Dos tipos de ladrillos de Dinamarca, uno rojo y otro amarillo (muy empleados en las construcciones del norte de Europa), dos morteros de cal aditivados con materiales de cambio de fase (uno con un 5% de PCM y otro con un 10%) y dos tipos de granito obtenidos en la zona sur del edificio del CUD muy típicos en la zona de Galicia y de la Escuela Naval en general (denominados Granito 1 y Granito 2).

Para cada material se midió lo siguiente:

- El peso en seco (gramos)
- El peso en agua (gramos)
- El peso en gramos en una disolución NaCl 1 M
- La altura y el área (centímetros)

Con los pesos de cada material tanto seco como mojado, mediante la siguiente fórmula se obtiene el contenido de líquido dentro de este:

$$\text{Contenido líquido} = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \right) \quad (14)$$

En cuanto a la altura y el área de la roca, se utilizará en la siguiente ecuación para calcular la resistividad del material [27], siendo L la separación entre los electrodos, que al estar uno situado por encima y otro por debajo de la roca [Figura 3-3] será igual a su altura:

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (15)$$

3.1.2 Corriente continua

Para cada uno de los materiales antes mencionados, se realizó el montaje recogido en la [Figura 3-1, Figura 3-3], con el objeto de determinar el valor de la resistencia y resistividad característicos de cada material para un potencial aplicado distinto.

Concretamente, en este estudio se empleó una fuente de alimentación de corriente continua a través de la cual se suministraron tres potenciales distintos (20, 40 y 60V). Mediante un multímetro se midió la caída de potencial entre la parte superior e inferior del material de construcción utilizado y también la caída en una resistencia de valor conocido (en este caso 1 k Ω). Al estar ambos elementos conectados en serie, circula la misma intensidad por todo el circuito, que se calculará, empleando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V_{\text{resist}}}{R} \quad (16)$$

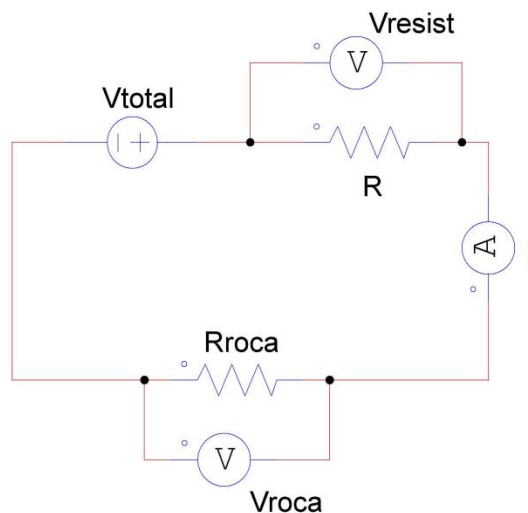


Figura 3-1 Circuito PSIM mediciones DC

Por último, con la intensidad calculada y V_{roca} medida con el multímetro, se obtuvo la resistencia de la roca en Ohmios (17). Mediante la fórmula (15) calculamos finalmente la resistividad de la roca en Ohmios por metro.

$$\rho = \frac{\Delta V_{roca}}{I} \quad (17)$$

Este proceso se realizó para cada material en seco, agua y en la disolución salina de NaCl empleando aproximadamente la misma cantidad de líquido tanto en agua como en la disolución.



Figura 3-2 Montaje DC en el laboratorio

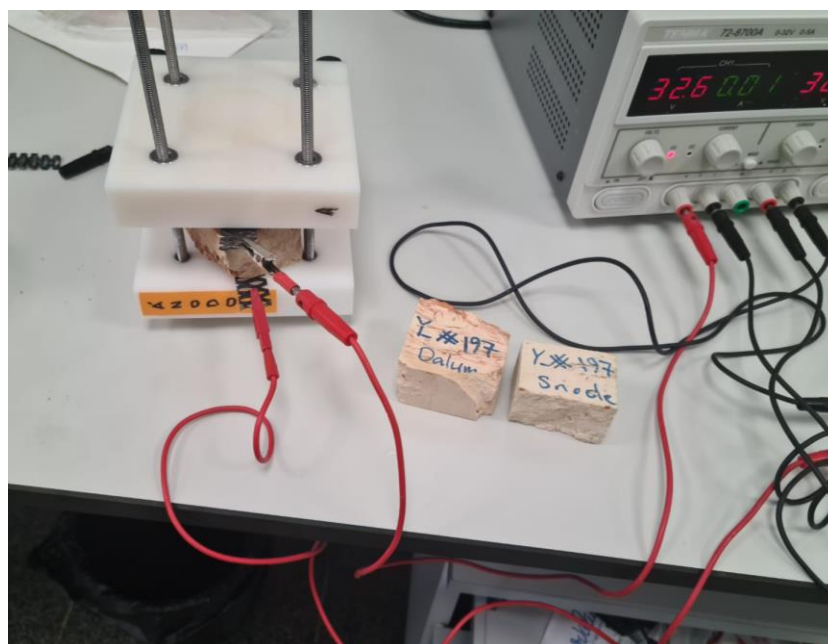


Figura 3-3 Mediciones con el montaje DC

3.1.3 Corriente alterna

Para poder medir la resistividad en corriente alterna se utilizó un osciloscopio. Mediante éste, se consiguió medir tanto la intensidad del circuito [Figura 3-4] como el voltaje en la roca. Por lo tanto, ya no era necesario el uso de una resistencia como en corriente continua.

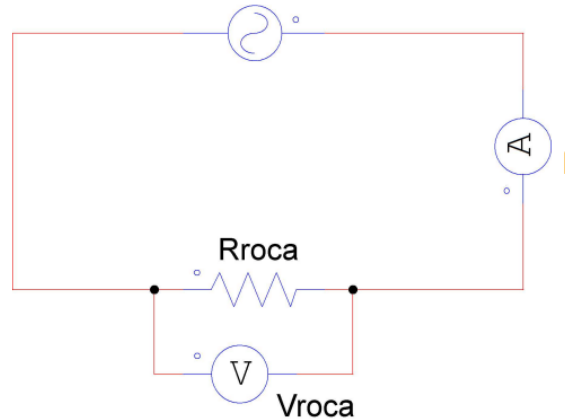


Figura 3-4 Circuito PSIM mediciones AC

Todas las mediciones se tomaron empleando un generador de funciones, que permite utilizar ondas senoidales de diferentes frecuencias y amplitudes. En particular, las medidas se obtuvieron aplicando un voltaje pico a pico de 10 V (marcado por el generador, aunque no corresponde con el observado debido a la desadaptación de impedancias) y la frecuencia se fue cambiando entre los siguientes valores: 10, 100, 500, 1000 Hz. Posteriormente, utilizando la expresión (15), se obtuvo la resistividad de la roca.

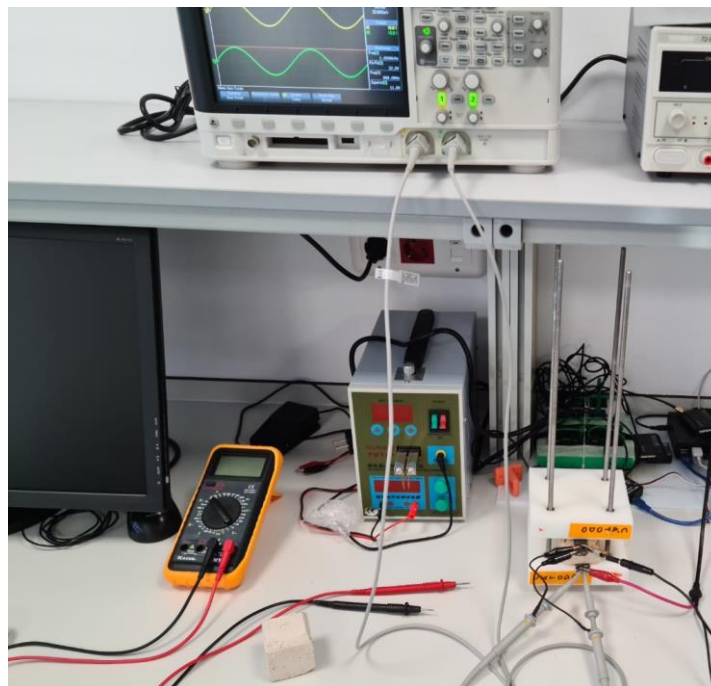


Figura 3-5 Montaje laboratorio AC

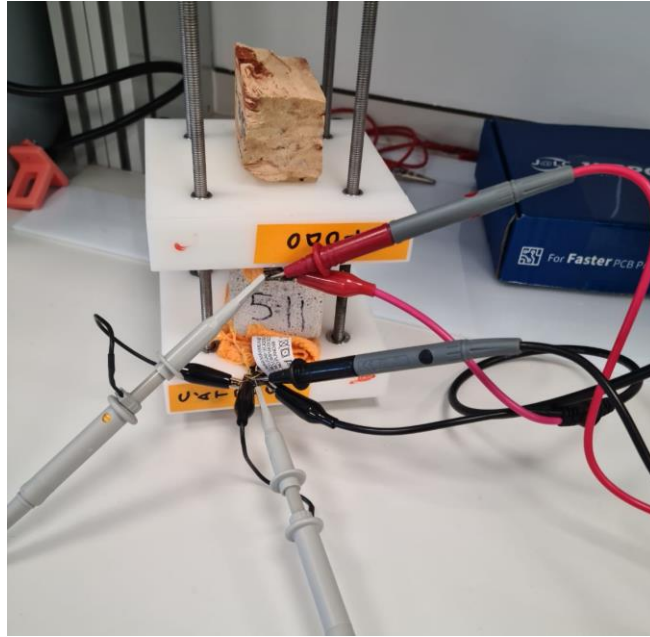


Figura 3-6 Mediciones laboratorio AC

En este caso únicamente se tomaron mediciones con la roca en la disolución y además se situaron dos paños humedecidos [Figura 3-6] también en la disolución para facilitar el contacto entre los electrodos y el material. Esto se debe a que el potencial máximo que se podía aplicar era muy bajo (10V) y apenas se iba a poder medir la resistividad del material en seco y en agua al no conducir prácticamente corriente por tener este fluido un contenido iónico muy bajo.

3.2 Diseño y construcción del soporte para electrodos

El siguiente paso del trabajo fue realizar un soporte en impresión 3D para los electrodos. Este soporte se debe llevar a cabo para albergar los electrodos del montaje que estarán en contacto con el material, atendiendo a una serie de premisas que debe cumplir:

- 1) Los electrodos deben estar alineados y deben estar distanciados una distancia constante.
- 2) El movimiento de los electrodos debe estar restringido a un único grado de libertad, como es el vertical.
- 3) Debe establecerse un sistema que permita que los electrodos se acomoden a superficies rugosas manteniendo una cierta presión.

Reparando en estas cuestiones, se ideó un diseño cuyas piezas se realizaron mediante el software Autodesk Inventor, exportando las piezas diseñadas para su posterior construcción con una impresora de resina 3D de la marca Elegoo, modelo Saturn [Figura 3-7 a)] con el programa CURA.

La resina empleada fue la resina UV Tough Resin [Figura 3-7 b)] de la casa Anycubic cuyas principales características son [28]:

- **Rendimiento equilibrado:** La resina presenta un equilibrio entre suavidad y dureza. Es muy resistente a la compresión, al estiramiento y a la flexión sin romperse. Debido a que el sistema que se necesita implicará una cierta presión en la pieza, esta característica es de vital importancia.

- **Amplia compatibilidad y aplicación:** Para que pueda ser impresa sin problemas por la impresora 3D que se empleó.
- **Alta precisión:** Garantiza una superficie lisa y detalles de impresión nítidos para que la distancia entre los electrodos sea la más precisa posible.



Figura 3-7 a) Impreso 3D Elegoo Saturn [29] b) Resina Anycubic UV Tough Resin [28]

3.3 Circuito Electrónico

En esta fase del diseño del equipo de tomografía eléctrica, se debe desarrollar el circuito electrónico del dispositivo. Dicho circuito se debe montar de tal manera que se puedan cumplir las siguientes condiciones:

- Debe operar con voltajes altos para que el dispositivo sea capaz de detectar resistividades altas. Si la resistividad es muy alta, el voltaje que se obtendrá en el material será muy alto también [15-17], por lo que se tendrá que conseguir una potencia suficientemente elevada como para que la corriente circule a través de la roca [2].
- Tener la capacidad de elegir que electrodos se encargarán de medir el voltaje y cuáles inducirán corriente al material [Figura 3-8]. Estos electrodos deberán ir cambiando en el tiempo para poder ofrecer diferentes mediciones
- El circuito tendrá que ser capaz de aguantar la alta temperatura a causa de las potencias con las que se trabajará.
- Los electrodos deberán quedar unidos tanto a la fuente de voltaje como al aparato encargado de medir la diferencia de potencial entre ellos.
- Deberá haber una separación considerable entre el circuito y los electrodos para poder facilitar el uso del aparato si el objeto a medir esta cierta distancia.

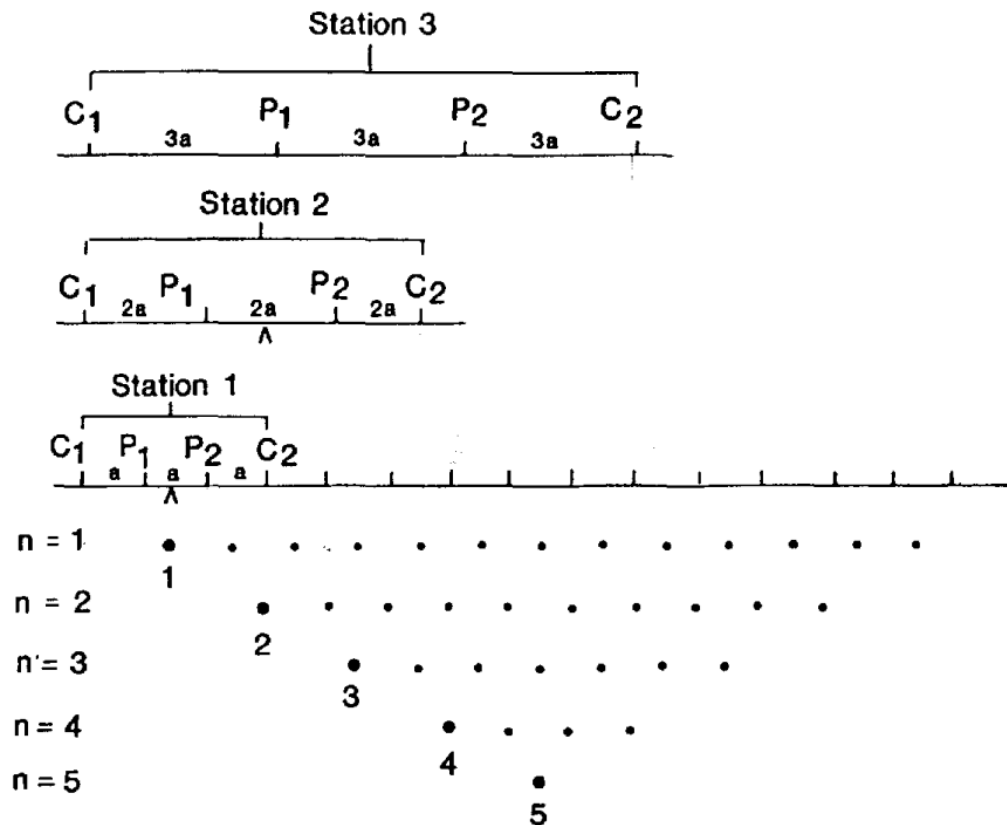


Figura 3-8 Mediciones obtenidas según la función que este realizando cada electrodo [2]

3.4 Programación en Arduino

En esta fase se debe llevar a cabo la programación del sistema para ir activando los electrodos de 4 en 4, dos que trabajen inyectando corriente y otros dos registrando potencial. Esta activación debe permitir realizar barridos a distintos niveles de penetración, es decir, en el nivel 1, tal y como se muestra en la figura anterior, se realiza un barrido de todos los electrodos sin saltar ninguno de ellos, es decir, manteniendo en todo momento la distancia “a” inicial con la que se han espaciado en el montaje.

En los sucesivos niveles esta distancia se va incrementando para ir aumentando la profundidad de penetración. En el nivel 2 la distancia se incrementa a “2a” saltándonos un electrodo entre los 4 electrodos activos. En el nivel 3, la distancia se incrementa a “3a” y así sucesivamente hasta que en el último nivel posible únicamente activaremos los electrodos de los extremos para inyectar corriente y dos internos para registrar la caída de potencial.

3.5 Prueba de concepto

Una vez terminado el montaje, para comprobar su funcionamiento y que efectivamente era capaz de medir la resistividad de los distintos materiales, se realizan dos pruebas diferentes.

En la primera prueba, el objetivo principal era ver si el dispositivo era capaz de diferenciar entre materiales muy resistivos y materiales conductores además de analizar cómo se comportaba a diferentes frecuencias. Para ello, se midieron las resistividades del ladrillo rojo en la disolución y del granito en seco. Por otro lado, encima del ladrillo rojo, se colocó un paño humedecido con disolución para comprobar si al ir cambiando de frecuencias éramos capaces de detectarlo. Se insertó el voltaje en la fuente de alimentación alterna, que al pasar por el circuito del amplificador operacional era de 48 V, y

se consiguió que por los electrodos de corriente circularan 10 miliamperios. Además, para estas medidas, se utilizó una separación “2a” entre electrodos.

Para la segunda prueba, el objetivo era tomar mediciones utilizando las dos conmutaciones que nos permitía el sistema de relés [Figura 4-21]. Para llevarse a cabo, se pusieron los dos materiales de la anterior prueba uno al lado del otro [Figura 3-9]. Del mismo modo que antes, se emplearon también 10 miliamperios y una separación “2a” entre electrodos.

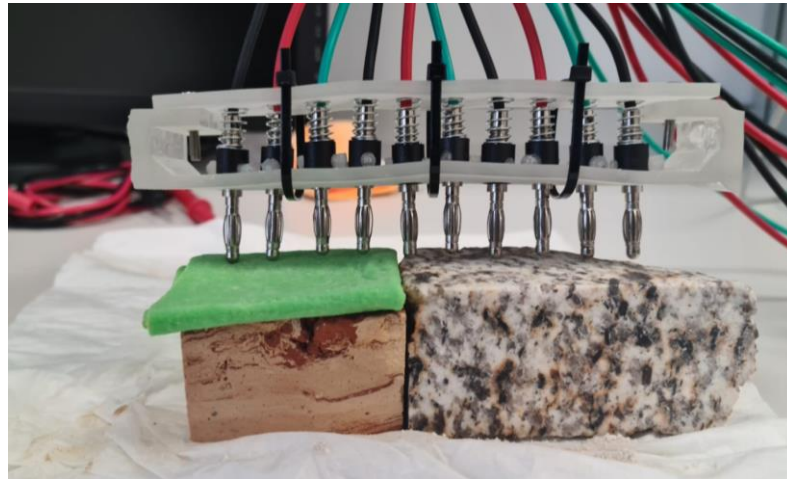


Figura 3-9 Montaje segunda prueba de comprobación de funcionamiento

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Resultados de las mediciones

Datos del material

Las tablas siguientes recogen los datos de partida con los cuales se llevaron a cabo los ensayos, tanto en corriente continua como en alterna, para los diferentes materiales.

En general, se aprecia que el contenido de humedad, independientemente de la disolución con la que se humedeció al material a ensayar, fue similar [Tabla 5]. Esto garantiza que las lecturas de resistividad que se obtengan no estarán influidas por este parámetro. Además, se aprecia que con la selección de materiales realizada se abarca un amplio abanico de materiales con diferente porosidad accesible, desde los ladrillos que son capaces de almacenar una mayor cantidad de disolución (en torno a un 20%), seguido de los morteros de cal (entre un 13-14%) y finalmente de los granitos que son materiales más compactos con una baja porosidad y por tanto baja capacidad de almacenamiento de agua (por debajo del 1%).

Tabla 4 Datos materiales empleados para las mediciones

Identificación Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (W)	Peso húmedo (d)	Distancia (cm)
Ladrillo Rojo	125,94	151,91	153,75	3,49
Ladrillo Amarillo	94,02	116,11	117,44	3,45
Mortero (10% PCM)	163,7	186,13	186,14	4,89
Mortero (5% PCM)	169,36	193,03	193,3	4,85
Granito 1	184,44	185,86	186,15	3,9
Granito 2	200,66	202,17	202,39	4,26

Tabla 5 Contenido de humedad de los materiales tanto en agua como en disolución

Identificación Muestra	Contenido Líquido (W)	Contenido Líquido (D)
Ladrillo Rojo	20,62	22,08
Ladrillo Amarillo	23,5	24,91
Mortero (10% PCM)	13,7	13,71
Mortero (5% PCM)	13,98	14,14
Granito 1	0,77	0,93
Granito 2	0,75	0,86

En este sentido, la selección de materiales se puede considerar correcta ya que si el dispositivo funciona en todos ellos prácticamente queda asegurado su uso en otros tipos de materiales de naturales pétreas como el hormigón.

Corriente continua

En cuanto al montaje que se realizó en corriente continua, se obtuvieron las siguientes resistividades aplicando los tres voltajes.

En todos los casos, independientemente del potencial aplicado, se aprecia que la resistividad ejercida por los materiales cuando estos están secos es demasiado alta como para que la corriente circule [30,31]. Este hecho tiene lógica si se tiene en cuenta que en materiales pétreos la corriente es transportada por los iones disponibles [32], por tanto en un material seco no hay iones en disolución que desempeñen esta función. Este resultado indica que es necesario humedecer las muestras previamente para que la corriente circule.

Cuando las muestras son humedecidas con agua, se aprecia una mayor conducción de la corriente en los morteros y en el ladrillo amarillo. Los materiales que presentan una mayor resistividad, debido a su baja porosidad, son los granitos. En general, en todos los materiales, esta resistividad disminuye al establecer en la fuente un mayor potencial eléctrico, ya que atendiendo a la ley de Ohm para un valor de resistencia similar, a mayor potencial mayor será la corriente que circula por el circuito, hecho que queda verificado en las tablas (por ejemplo para el ladrillo amarillo a 20V circula 1 mA, a 40V circulan 2 mA y a 60V circulan aproximadamente 3 mA).

Finalmente cuando los materiales son saturados con sales, situación similar a la que nos encontramos en la mayoría de los monumentos [17,33,34], la resistividad ejercida por los materiales frente a la circulación de corriente cae drásticamente. En este caso la mayor porosidad de los ladrillos permite almacenar un mayor contenido de sales en disolución que transportarán la corriente una vez se establezca la corriente. Este es el motivo por el cual la resistividad es menor en ladrillos, seguida de los morteros y finalmente de los granitos.

Tabla 6 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 20 V

Identificación Muestra	EN SECO (S)	EN AGUA (W)			EN DISOLUCIÓN (D)		
	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (W)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (D)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)
Ladrillo Rojo	0	19,46	0,0005	2595	4,89	0,0151	23
Ladrillo Amarillo	0	19,04	0,0010	1016	4,1	0,0159	13
Mortero (10% PCM)	0	19,02	0,0010	963	14,2	0,0058	121
Mortero (5% PCM)	0	19,51	0,0005	1884	14,3	0,0057	119
Granito 1	0	19,93	0,0001	18397	16,2	0,0038	275
Granito 2	0	19,96	0,0000	30913	16,9	0,0031	338

Tabla 7 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 40 V

Identificación Muestra	EN SECO (S)	EN AGUA (W)			EN DISOLUCIÓN (D)		
	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (W)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (D)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)
Ladrillo Rojo	0	38,63	0,0014	2030	8,3	0,0317	19
Ladrillo Amarillo	0	38	0,0020	973	6,5	0,0335	10
Mortero (10% PCM)	0	37,98	0,0020	933	30,5	0,0095	159
Mortero (5% PCM)	0	38,87	0,0011	1627	31,3	0,0087	170
Granito 1	0	39,84	0,0002	16089	32,7	0,0073	289
Granito 2	0	39,88	0,0001	20588	34,1	0,0059	358

Tabla 8 Mediciones resistividad de los materiales en CC con 60 V

Indentificaión Muestra	EN SECO (S)	EN AGUA (W)			EN DISOLUCIÓN (D)		
	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (W)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V roca (D)	I (A)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)
Ladrillo Rojo	0	57,84	0,0022	1928	14,5	0,0455	23
Ladrillo Amarillo	0	57,1	0,0029	1009	8,5	0,0515	8
Mortero (10% PCM)	0	56,84	0,0032	892	46,4	0,0136	169
Mortero (5% PCM)	0	58,07	0,0019	1423	49,2	0,0108	216
Granito 1	0	59,76	0,0002	16089	48,6	0,0114	275
Granito 2	0	59,84	0,0002	23169	51,1	0,0089	356

A continuación se muestran de modo gráfico lo indicado anteriormente para facilitar lo indicado en los párrafos anteriores. La Figura 4-1, muestra una comparativa de las resistividades tanto en agua como en disolución y el segundo muestra únicamente las que están en la disolución. En ambos casos se representan los resultados obtenidos utilizando las mediciones más altas de los tres voltajes, ya que estamos trabajando con rangos.

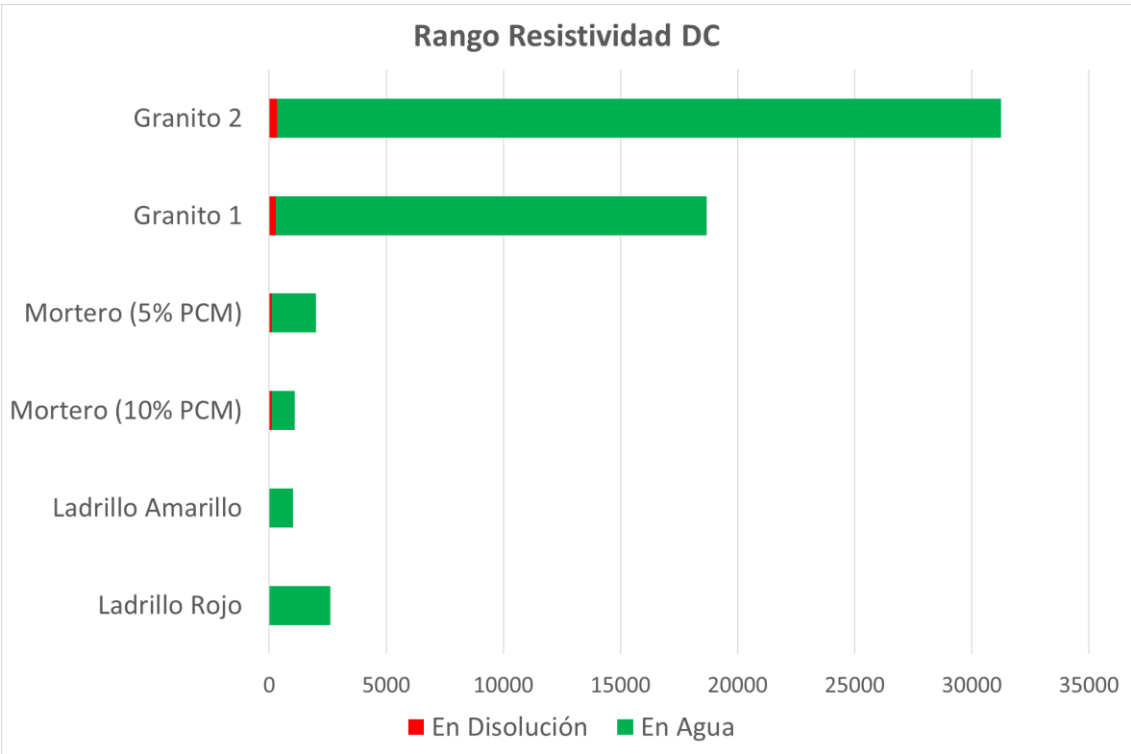


Figura 4-1 Diagrama resultados estudio resistividad DC

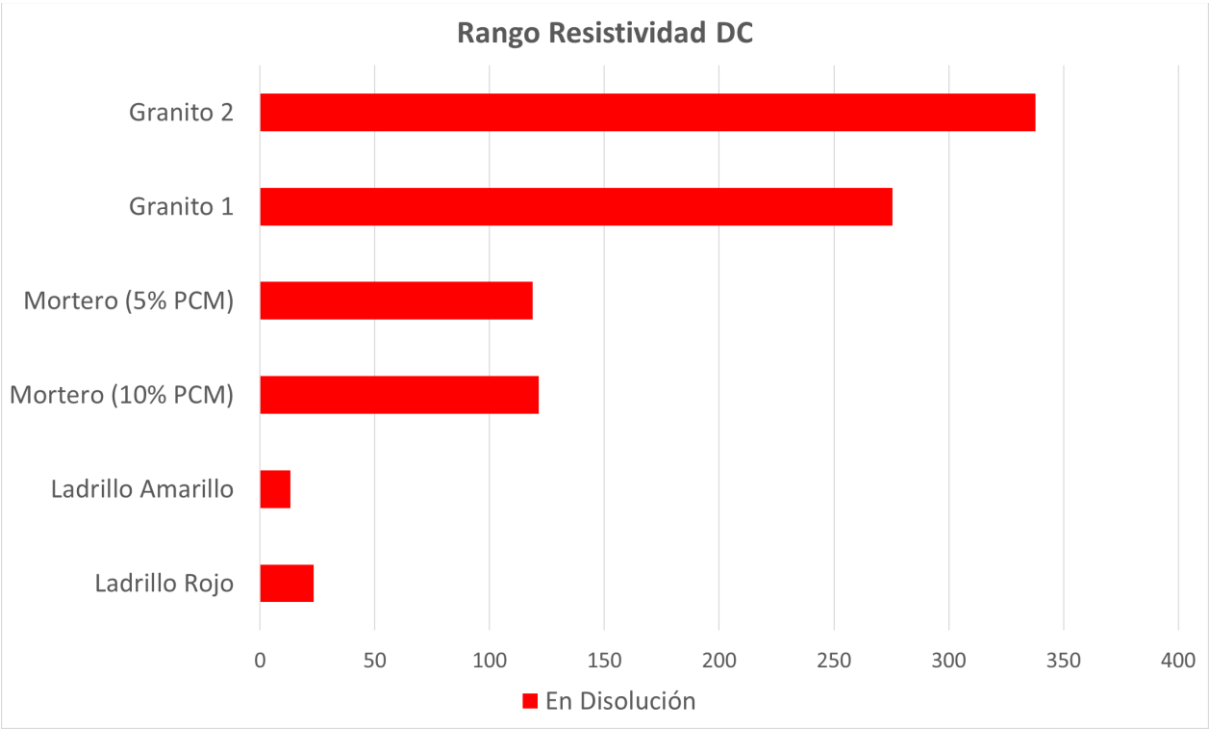


Figura 4-2 Diagrama resultados estudio resistividad DC con la disolución de NaCl

Corriente Alterna

En las mediciones realizadas para el montaje del dispositivo utilizando el circuito de corriente alterna se obtuvieron los siguientes valores. Los resultados obtenidos, en cuanto a la tendencia detectada en las resistividades, fueron similares, mayor en granitos y menor en ladrillo. Por otro lado, no se observa ningún cambio en las resistividades dependiendo de la frecuencia que se use.

Tabla 9 Mediciones resistividad de los materiales en AC con 10 y 100 Hz

Identificación Muestra	Frecuencia (Hz)					
	10			100		
	V (V)	I (mA)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V (V)	I (mA)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)
Ladrillo Rojo	2,66	3,8	50,40	2,59	4,1	45,48
Ladrillo Amarillo	2,65	3,9	34,81	2,61	4,5	29,71
Mortero (10% PCM)	4,83	3,6	66,54	4,82	3,5	68,30
Mortero (5% PCM)	4,81	3,1	73,40	4,82	3,05	74,76
Granito 1	7,42	2,8	171,23	7,42	2,7	177,57

Tabla 10 Mediciones resistividad de los materiales en AC con 500 y 1000 Hz

Identificación Muestra	Frecuencia (Hz)					
	500			1000		
	V (V)	I (mA)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)	V (V)	I (mA)	ρ Roca ($\Omega \cdot m$)
Ladrillo Rojo	2,57	4	46,26	2,55	4,3	42,70
Ladrillo Amarillo	2,59	4,1	32,36	2,58	4,7	28,12
Mortero (10% PCM)	4,81	3,6	66,27	4,79	3,9	60,92
Mortero (5% PCM)	4,83	3,2	71,40	4,81	3,3	68,95
Granito 1	7,41	2,6	184,16	7,37	2,8	170,08

Las tablas se representaron con el diagrama [Figura 4-1 Diagrama resultados estudio resistividad DCFigura 4-3] que alcanza el valor más alto obtenido entre todas las frecuencias y únicamente con los materiales en la disolución. Como se puede observar, al igual que en corriente continua, el granito tiene una mayor resistividad seguido por los dos morteros, y los dos ladrillos.

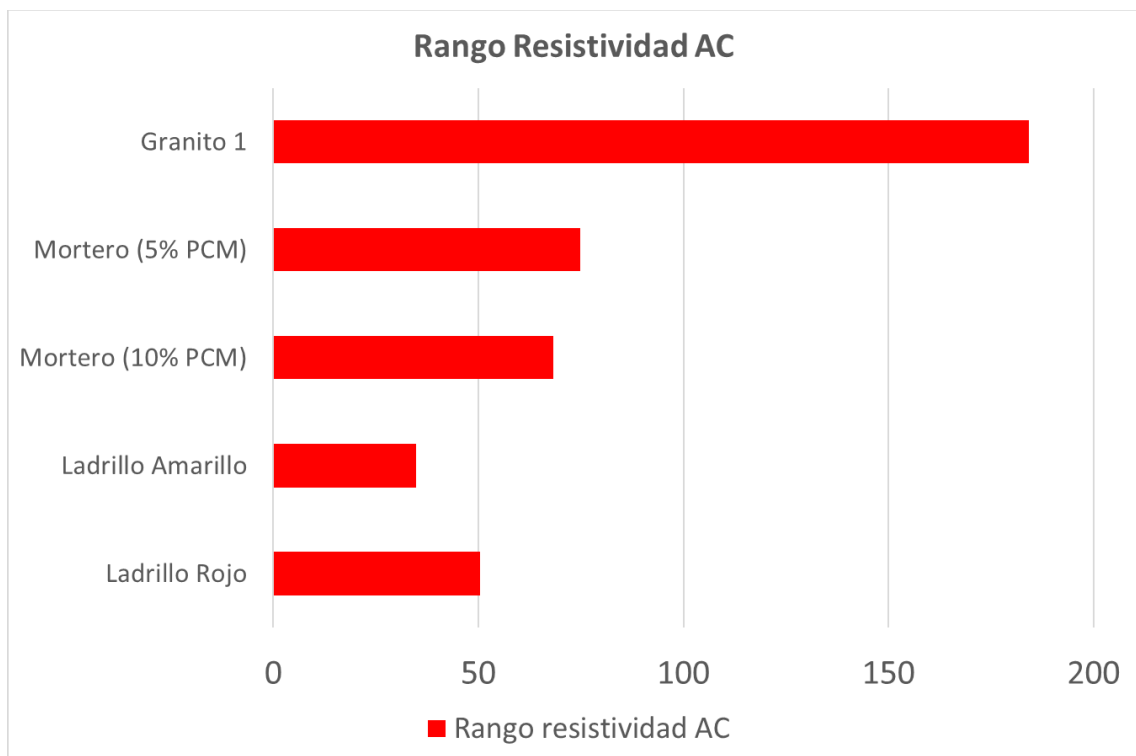


Figura 4-3 Diagrama resultados estudio resistividad AC

4.2 Resultados Soporte

4.2.1 Ensamblaje inicial

Para poder cumplir las premisas especificadas en [3.2] se llevó a cabo el diseño en Inventor del siguiente soporte para los electrodos [Figura 4-4]. El soporte se diseñó para poder introducir unos muelles entre las dos placas horizontales de la [Figura 4-4] que permitan, transmitir la presión ejercida sobre el soporte de manera que los electrodos se acomoden a superficies rugosas. La parte superior del electrodo se ajusta a un orificio realizado sobre la placa superior para garantizar que el movimiento de éstos únicamente se produzca en el eje vertical al mismo tiempo que no se produzca un desplazamiento lateral que modifique la distancia entre ellos.

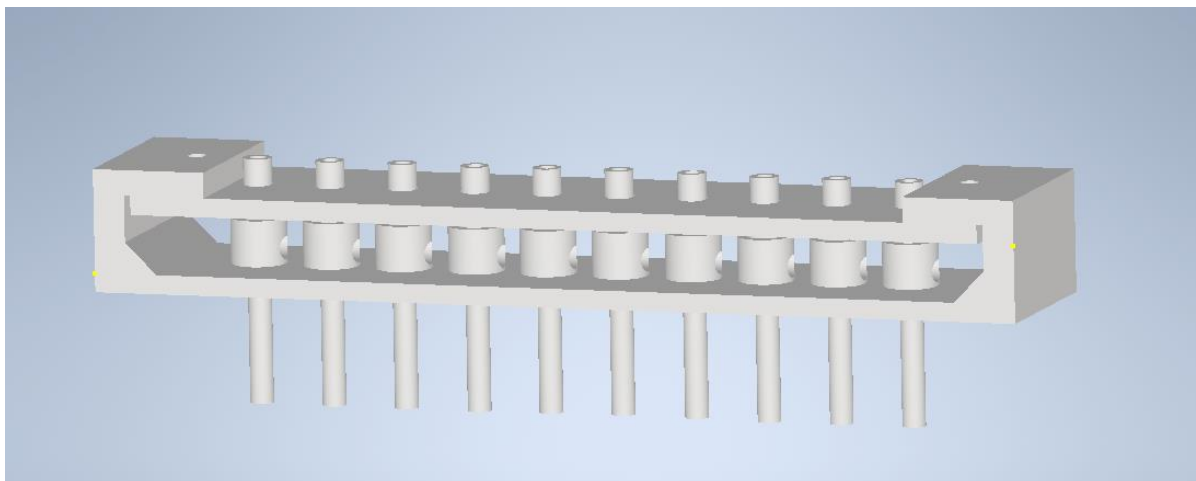


Figura 4-4 Ensamblaje inicial soporte

El soporte se compone de dos placas, una superior y otra inferior:

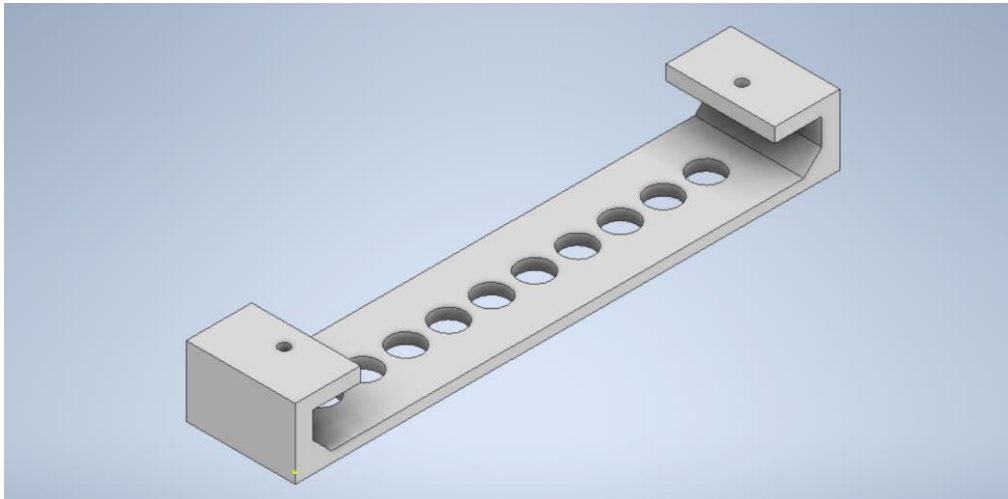


Figura 4-5 Placa superior soporte electrodos

La placa superior [Figura 4-5] permite la colocación de diez electrodos. Por los agujeros de esta placa sale la parte inferior de los electrodos que establecen contacto con el material. Además, en los extremos de la placa se sitúan dos salientes con dos agujeros donde se insertan dos tornillos que se encargan de unir esta placa con la placa inferior.

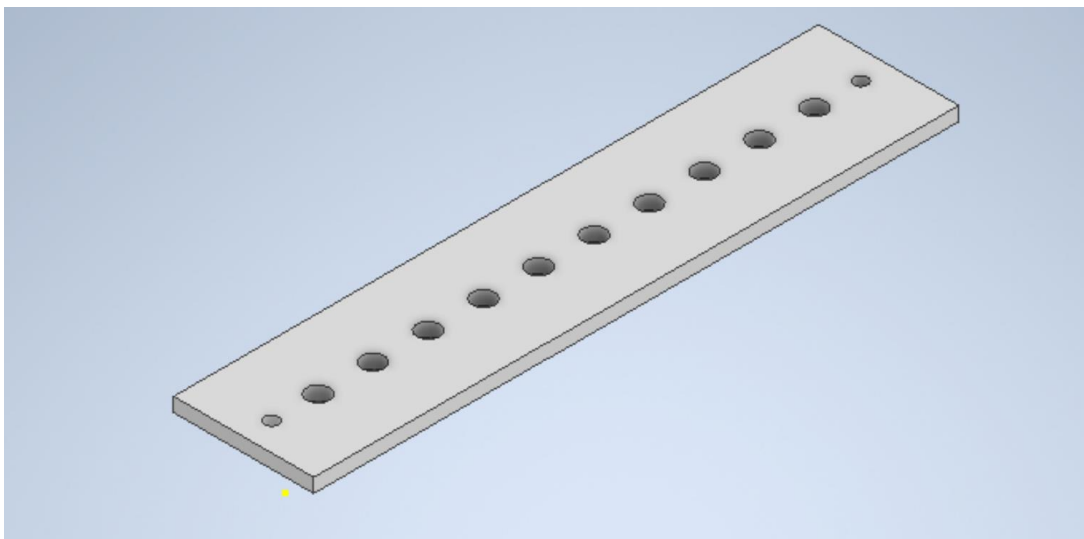


Figura 4-6 Placa inferior soporte electrodos

En cuanto a la placa [Figura 4-6], sobresale la parte superior de los electrodos, la cual se conecta a los cables que a su vez se conectarán a la unidad central. También se realizan en los extremos dos orificios para la unión de las placas. Además, mediante el contacto del muelle con esta placa y con el electrodo se permite el movimiento vertical de este. Los orificios de la placa tienen el diámetro necesario para permitir que pase la parte superior del electrodo con el cable pero no el muelle que ejerce una presión sobre la pared inferior, curvando y deformando ligeramente la placa debido al material de la que está hecha [Figura 3-7 b)].

4.2.2 Problemas del ensamblaje inicial

Tras imprimir el soporte en 3D se encontraron principalmente dos problemas:

- El primer problema fue que la distancia entre las dos placas era muy pequeña [Figura 4-7], por lo tanto, no había suficiente espacio para que el muelle trabajase correctamente. En las partes centrales de la placa, tras deformarse ligeramente, sí que se permitía que el muelle realizase cierta presión. Sin embargo, en los extremos la presión de los muelles era tan alta que apenas permitía el movimiento de los electrodos.

La solución que se planteó fue colocar la placa inferior encima de la superior, aumentando la distancia entre placas. El único inconveniente que podría surgir tras realizar este cambio era que los tornillos que unían ambas placas no soportasen la presión de los muelles, sin embargo, al no ser excesiva, no hubo ningún problema.

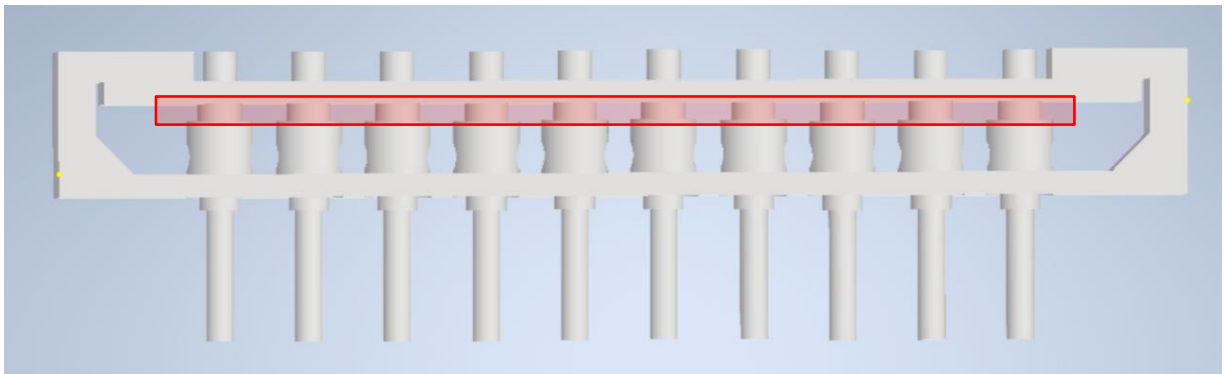


Figura 4-7 Espacio muelles en ensamblaje inicial

- El segundo problema que se encontró fue que los electrodos, a causa de la fuerza que ejercían los muelles hacia abajo, no se fijaban a la placa superior y abandonaban sus posiciones colándose a través de los orificios. Además, tampoco se podía reducir el diámetro de los orificios ya que restringirían el movimiento vertical que intentamos obtener.

Lo que se propuso fue imprimir una barra para cada electrodo [Figura 4-8] en impresión 3D utilizando la misma resina, de forma que al atravesar los electrodos por un orificio lateral del que disponen, a modo de pasadores, estos quedan fijados. Esta solución se puede apreciar en los planos del electrodo en [Anexo IV: Planos Soporte Electrodos]. Estas barras no permiten el deslizamiento del electrodo fuera de su posición, pero si permiten el movimiento hacia el interior del ensamblaje cuando entramos en contacto con un material.

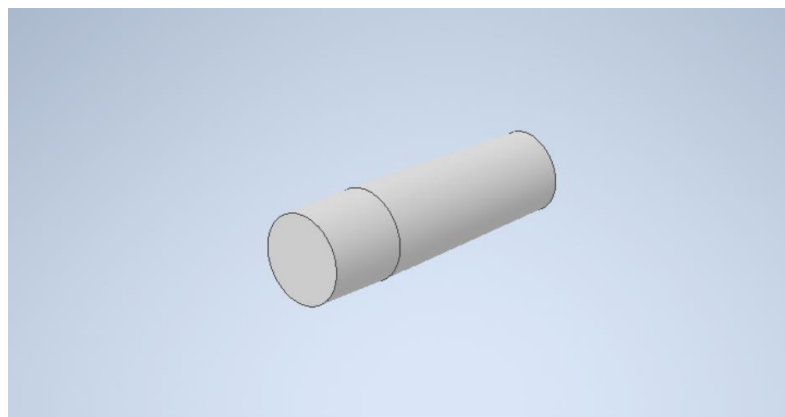


Figura 4-8 Barra soporte electrodos

4.2.3 Ensamblaje final

Aplicando los dos cambios para solucionar los problemas que se encontraron, se consiguió el siguiente ensamblaje: [Figura 4-9]. Aquí, ya se puede apreciar una mayor distancia entre las placas que permiten el uso de los muelles tanto en el centro como en los extremos. Además, con las barras se consiguen sujetar los electrodos al montaje sin restringir su movimiento en el eje vertical.

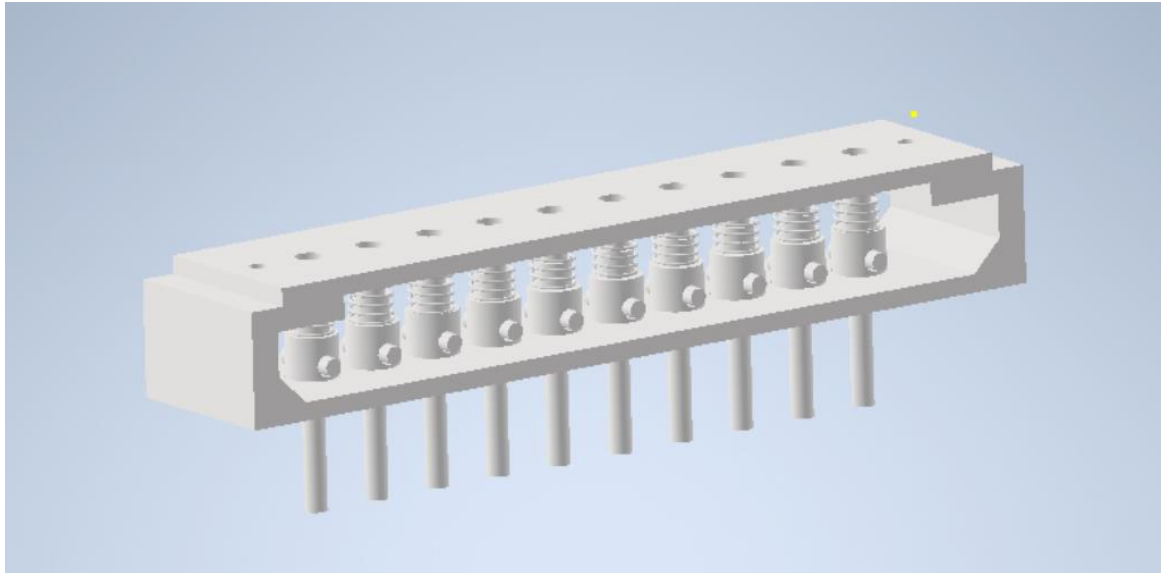


Figura 4-9 Ensamblaje final soporte electrodos

Tras el ensamblaje de todas las partes y la conexión de los cables a los electrodos, el resultado obtenido fue el siguiente:

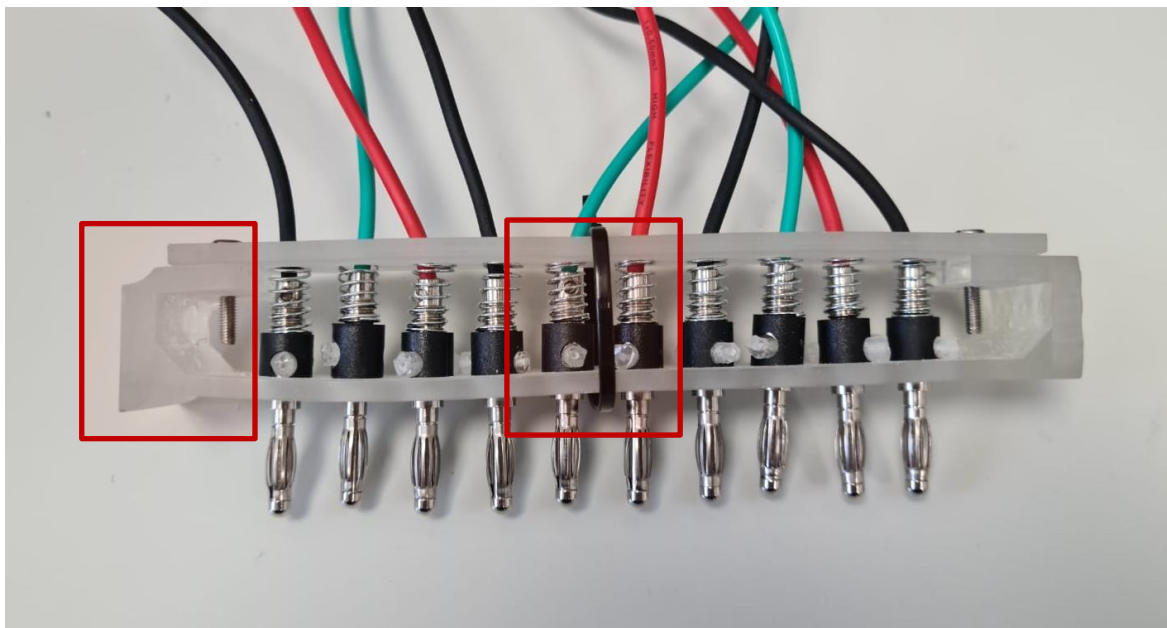


Figura 4-10 Soporte final impreso

Al concluir la impresión 3D, se produjo un pequeño error, el cual se muestra en [Figura 4-10]. Sin embargo, este no afectaba a la función del soporte y por tanto se consideró no modificarlo. También se

observa que la deformación es más grande de lo esperado y por tanto se colocó una brida para disminuirla y permitir el correcto funcionamiento de los muelles independientemente de su distancia con respecto al centro de las placas.

En conclusión, el soporte se construyó con los siguientes componentes que se muestran en [Figura 4-11]:

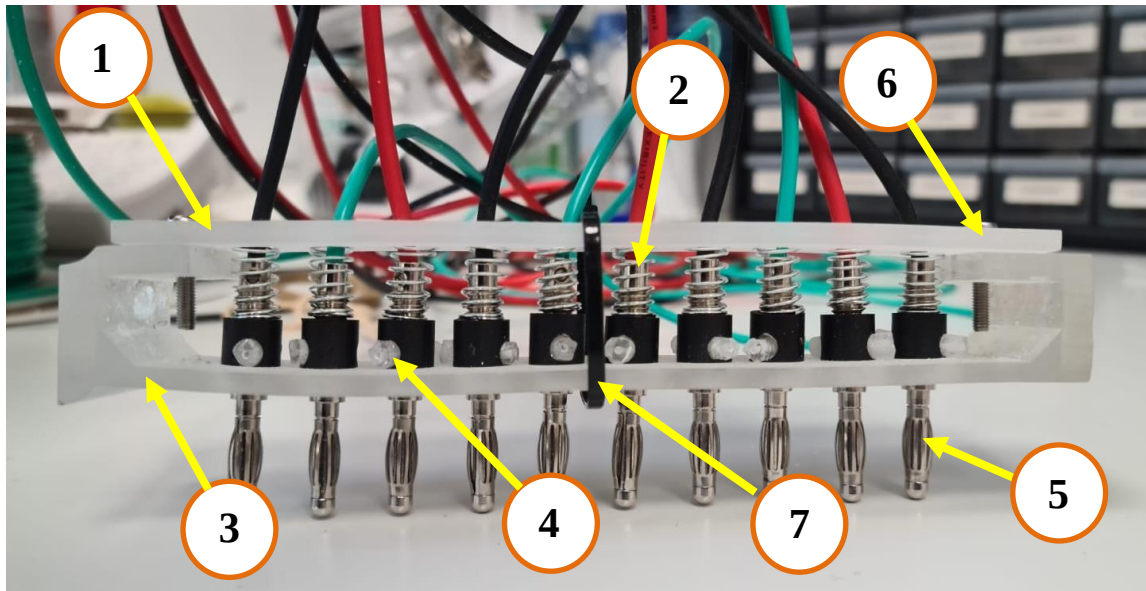


Figura 4-11 Partes soporte final impreso

1. **Placa inferior:** cambiada inicialmente de posición, permite absorber el contacto de los muelles
2. **Muelle:** para permitir el movimiento vertical del electrodo
3. **Placa superior:** sujeta a los electrodos y funciona como base de todo el soporte.
4. **Barra unión:** en cada electrodo para evitar que se caigan por el orificio
5. **Electrodo:** en contacto en todo momento con el material
6. **Tornillos:** Para unir las dos placas
7. **Brida:** Reduce la deformación de la placa.

4.3 Resultados circuito eléctrico

En el siguiente apartado, aparecen reflejadas las acciones llevadas a cabo para construir un circuito eléctrico que cumpliera con las especificaciones que se consideraron necesarias para el funcionamiento de nuestro equipo de tomografía eléctrica. Para más detalles se remite al lector a los dos primeros puntos de [3.3].

4.3.1 Amplificador Operacional

Los equipos de tomografía eléctrica utilizan corriente alterna (AC) porque este tipo de corriente permite generar un campo eléctrico que cambia de dirección a una frecuencia determinada. Al aplicar un voltaje AC a los electrodos de la tomografía eléctrica, se genera un campo eléctrico que varía su dirección de forma cíclica a lo largo del tiempo. Este campo eléctrico induce corrientes eléctricas en el medio que se está analizando. Las corrientes eléctricas resultantes son proporcionales a la conductividad eléctrica del medio, lo que permite obtener información sobre las propiedades eléctricas del medio.

Además, el uso de corriente alterna también permite evitar la polarización de los electrodos. La polarización ocurre cuando los iones presentes en el medio se acumulan en las superficies de los electrodos, lo que altera el campo eléctrico aplicado y distorsiona la imagen final, afectando la calidad de las mediciones. Por lo tanto, el circuito que se empleó utiliza corriente alterna. Sin embargo, el generador de funciones disponible en los laboratorios de investigación para operar con AC tenían un límite de 10 V para una resistencia de salida esperada de 50Ω. Mediante el análisis realizado en [3.1], se observó que utilizando una impedancia baja (la resistencia de 1 kΩ), obteníamos una mucho más alta (la resistencia de la roca), cayendo en la roca la mayoría del potencial empleado. Para solucionar este inconveniente y tener unas medidas adecuadas, necesitábamos extender el límite del voltaje a más de 10 V. Tras barajar varias opciones, se optó por una solución eficaz y también poco compleja, un montaje que desadapte las impedancias a través del uso de un amplificador operacional. En particular, el montaje realizado es el de un amplificador inversor.

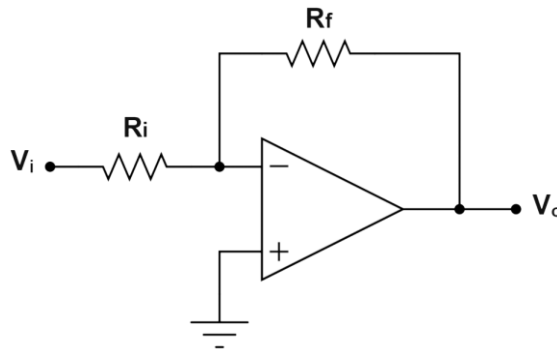


Figura 4-12 Esquema AO inversor

El AO inversor sigue el siguiente circuito [Figura 4-12]. Como se observa, el voltaje que suministraremos se coloca en la terminal inversora del amplificador y la terminal no inversora se conecta a tierra, por tanto, justo en el nodo que conecta las dos resistencias también tendríamos 0 voltios. Si se analiza [Figura 4-12] con el método de los nodos y se tiene en cuenta que la corriente que pasa por R_i y R_f es la misma ya que no entra corriente en el amplificador (o es despreciable), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{0-V_o}{R_f} = \frac{V_i-0}{R_i} ; V_o = V_i \times \frac{R_f}{R_i} \quad (18)$$

Se puede concluir entonces que a la salida del AO se conseguirá un voltaje con una ganancia proporcional a la división de las resistencias que empleemos.

Para comprobar que en efecto, se podía utilizar este método en el montaje del prototipo, se decidió realizar un montaje de prueba con un amplificador operacional y analizar los resultados.

4.3.1.1 Montaje AO experimental

El montaje del circuito se pretendía montar en una placa y conectar los elementos mediante soldadura. Sin embargo, antes se decidió montar en una protoboard debido a la facilidad de poder corregir errores en ella de forma más rápida. Tras montar el circuito, se comprobaron los resultados tanto con un multímetro, como con un osciloscopio, [Figura 4-13].

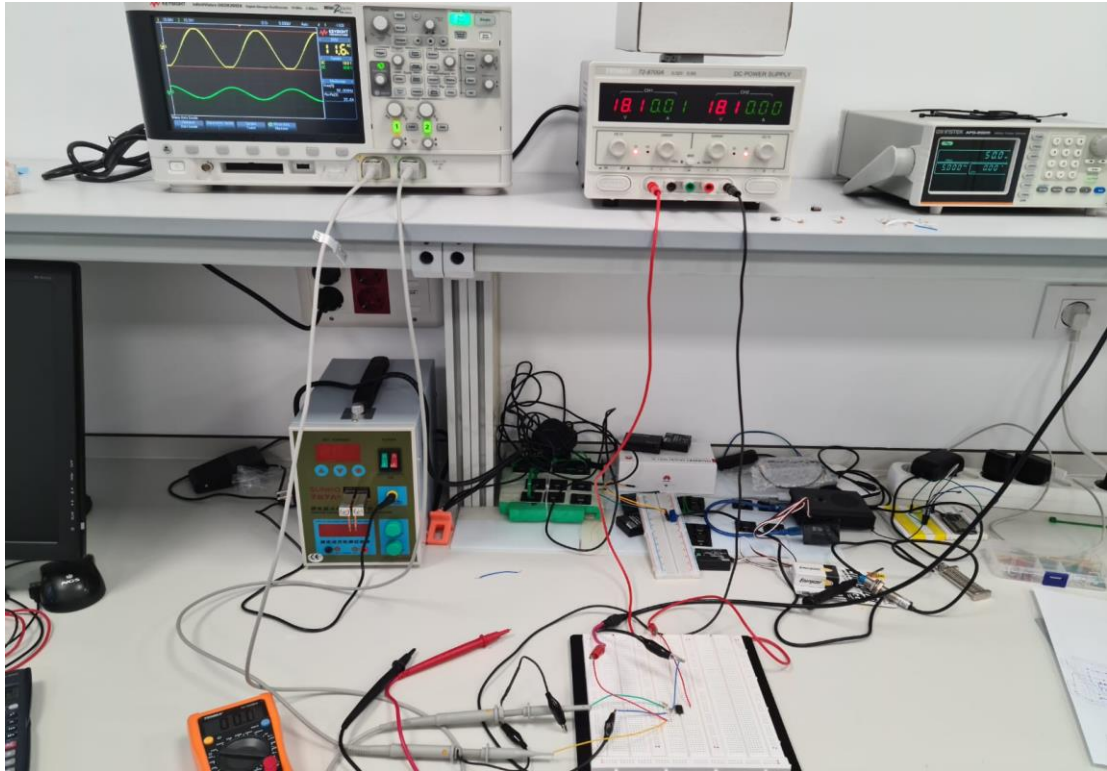


Figura 4-13 Montaje AO protoboard

Al observar que los resultados eran óptimos, se monta el circuito en la placa [Figura 4-14]. Este consta de los siguientes elementos:

1. Una resistencia de $1\text{ k}\Omega$
2. Una resistencia de $3,3\text{ k}\Omega$
3. Un cable para el positivo del equipo de DC que alimenta el AO
4. Un cable para el negativo del equipo de DC que alimenta también el AO
5. Un cable para el positivo del equipo de AC que suministra voltaje a la terminal inversora dl AO.
6. Un cable para el negativo del equipo de AC que va al terminal no inversor y a la vez a tierra.

Todos estos elementos van soldados al AO, a una parte específica de este. Dependiendo del modelo del AO, irán a un sitio u otro.

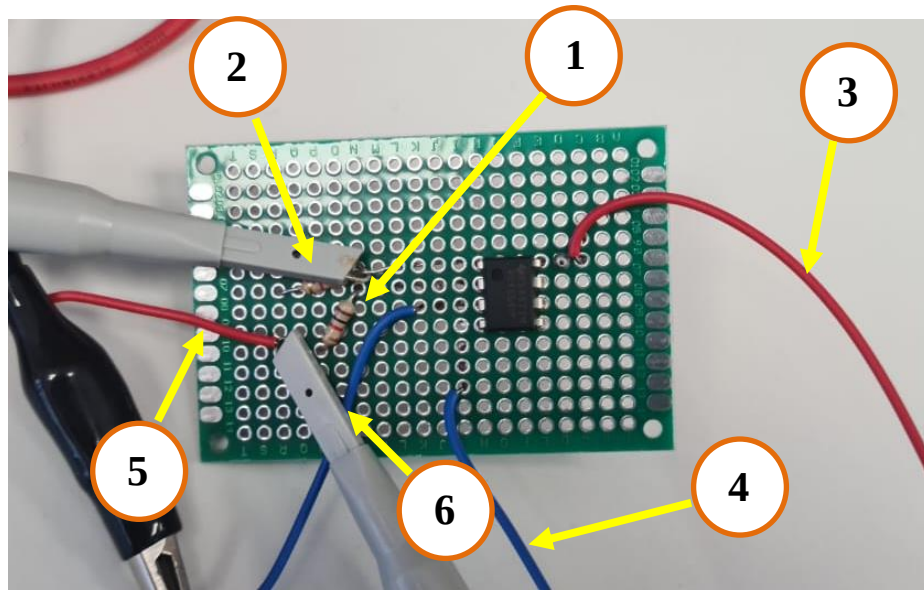


Figura 4-14 Montaje AO en placa

Con el equipo de DC se aplicaron +18 y -18 voltios, teniendo un voltaje pico a pico máximo de 36 voltios. Con este voltaje, se tiene un gran margen respecto a la señal de salida para que esta no se sature ni se distorsione. En cuanto al equipo de AC utilizamos una frecuencia de 50 Hz y una amplitud de voltaje de 3 voltios.

Aplicando la expresión (18) vista anteriormente, se deduce que con una resistencia de $1\text{ k}\Omega$ y otra de $3,3\text{ k}\Omega$, el voltaje de salida debería ser aproximadamente 3,3 veces más grande que el de entrada. Para comprobar este resultado se utilizaron dos métodos distintos al igual que con el montaje de la protoboard.

En el primero, se utiliza un multímetro para medir el voltaje de entrada y de salida en modo AC. El voltaje de entrada se midió con el cable para el positivo de AC y con el del negativo obteniendo 1,7 voltios. Para el de salida, se midió el extremo de R2 que conecta con el AO y tierra como terminal negativo obteniendo 5,8 voltios [Figura 4-15].

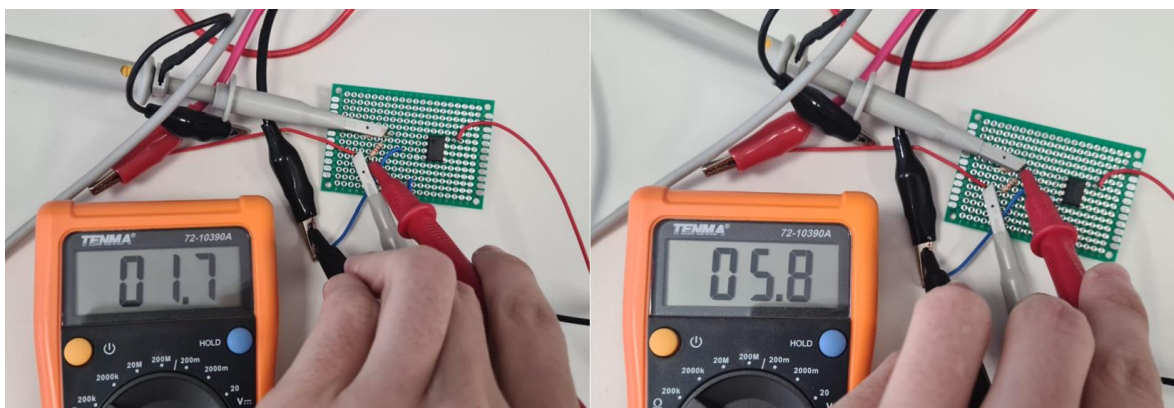


Figura 4-15 Mediciones voltaje circuito experimental AO

Al dividir el voltaje de salida entre el de entrada se obtiene una ganancia de 3,4, como se estimaba teóricamente.

El segundo método con el que se comprobaron los resultados es un método más visual ya que se utilizó un osciloscopio que nos mostró las gráficas de los voltajes de entrada y de salida. En la pantalla [Figura 4-16], aparecen dos señales, la de entrada en verde y la de salida en amarillo. Con estas gráficas se aprecia claramente que estamos trabajando con un operacional inversor y también se puede estimar que la señal amarilla es tres veces mayor que la verde.

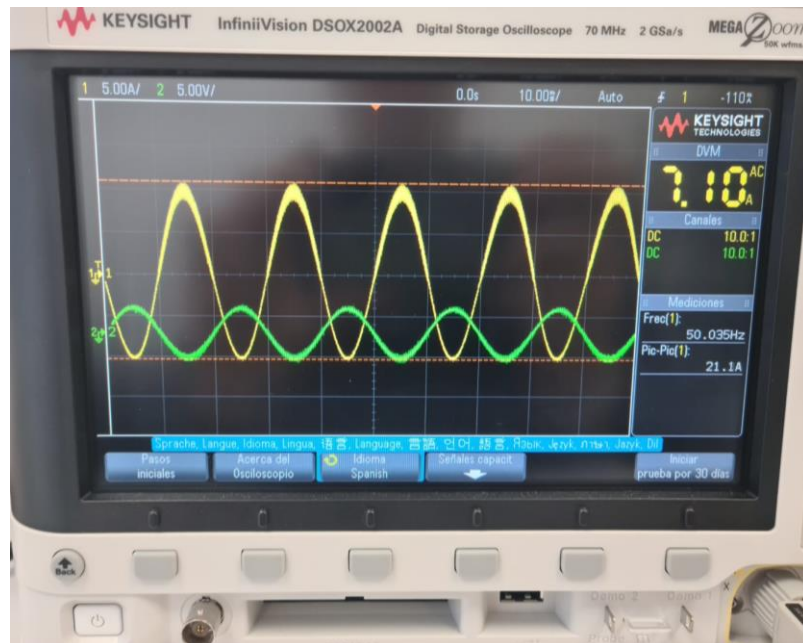


Figura 4-16 Señales osciloscopio montaje AO experimental

Para el circuito del prototipo se utilizará el mismo esquema pero se aplicarán 10 voltios de corrientes continua y 60 voltios de pico a pico en corriente continua para poder conseguir el máximo voltaje de salida. También se emplea un amplificador operacional específico, el OPA 541.

4.3.1.2 OPA 541

El amplificador operacional OPA 541 es un amplificador de potencia de alta corriente y alta tensión fabricado por Texas Instruments. Está diseñado para manejar cargas de hasta 5 amperios de corriente y voltajes de alimentación de hasta ± 40 voltios, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren amplificación de señales de alta potencia.

El OPA 541 tiene una ganancia de voltaje de hasta 200 V/V, lo que significa que puede amplificar señales de entrada muy débiles hasta niveles mucho más altos. Además, cuenta con protección térmica y de cortocircuito integradas para evitar daños en el dispositivo y en el circuito en el que se utiliza. El OPA 541 es un dispositivo disponible en varias versiones diferentes, de 8 y 11 pines.

A continuación, se muestra una descripción general de los pines del amplificador operacional OPA 541 en el paquete PDIP [Figura 4-17], que es el que se incluirá en el circuito:

1. **+In:** Entrada V_i no inversora
2. **-In:** Entrada V_i inversora
3. **V-:** Pin de conexión a la fuente negativa de alimentación.
4. **V-:** Pin de conexión a la fuente negativa de alimentación.
5. **Output:** Salida V_o
6. **NC:** Pin sin conexión
7. **Output:** Salida V_o

- 8. **Current Sense:** Mide la corriente que fluye a través del amplificador
- 9. **NC:** Pin sin conexión.
- 10. **V+:** Pin de conexión a la fuente positiva de alimentación.
- 11. **V+:** Pin de conexión a la fuente positiva de alimentación.

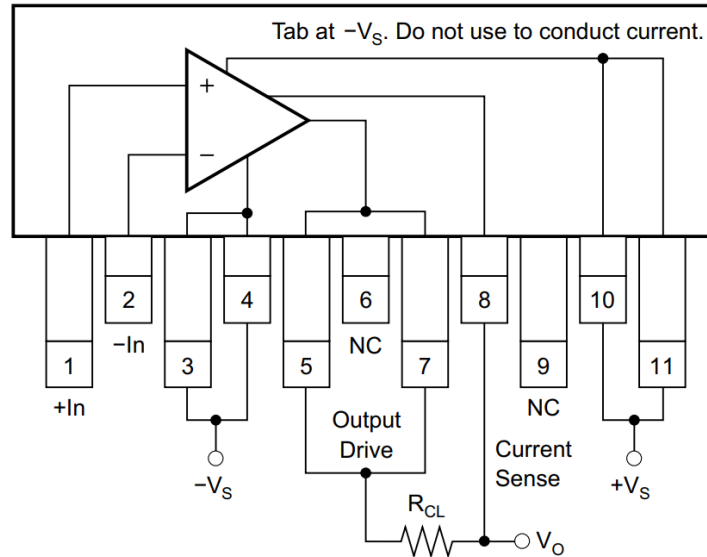


Figura 4-17 Distribución pines OPA541 [35]

En resumen, se decidió trabajar con el amplificador operacional OPA 541 ya que es un dispositivo de alta potencia que satisface las especificaciones para el montaje del prototipo.

4.3.1.3 Montaje AO final

Al recibir el OPA541 nos dimos cuenta de que no era compatible con la placa y no se consiguió encontrar una que se adaptase a la separación de pines del AO. Finalmente, se decidió operar con el montaje en la protoboard [Figura 4-18], uniendo a ella los pines del AO mediante cables.

Las mediciones obtenidas concordaban con las del montaje experimental lo cual permitió tener una ganancia de 3,2 en este caso. Con estas comprobaciones también se apreció que el AO se calentaba en exceso al exponerlo mucho tiempo a altos voltajes y para disminuir este efecto se le colocó un pequeño disipador en la base.

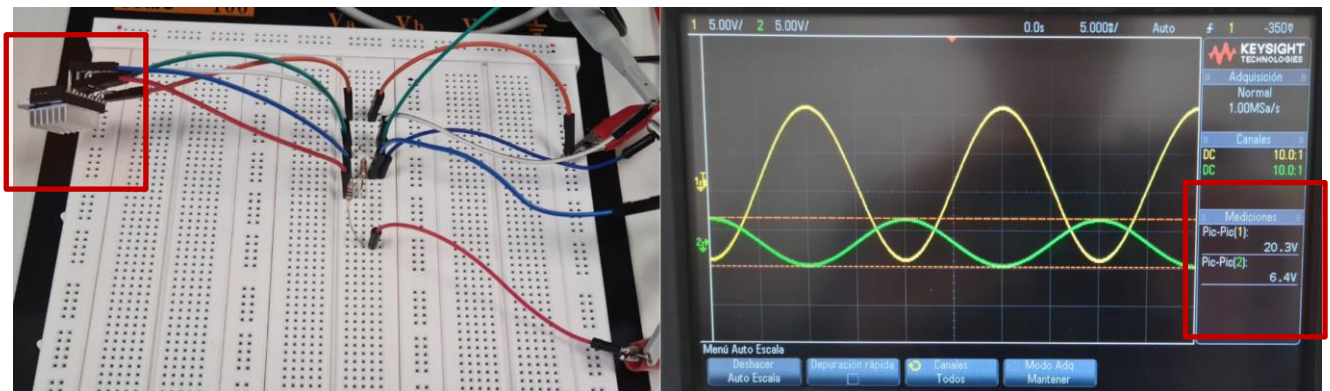


Figura 4-18 Montaje y voltajes AO final

4.3.2 Relés

Una vez conseguido el montaje adecuado para producir una señal que cumpla los requisitos necesarios para calcular la resistividad de los materiales, se necesitaba otro elemento que la distribuyese por los electrodos para calcular la caída de potencial entre ello. Para ello, se propone el uso de relés.

Los relés son dispositivos electromecánicos que se utilizan en circuitos eléctricos para controlar el flujo de corriente eléctrica mediante un interruptor que se activa por medio de un campo electromagnético. Estos, se utilizan para controlar circuitos de alta potencia o voltaje a través de circuitos de baja potencia o voltaje, lo que permite a los dispositivos de bajo voltaje controlar dispositivos de alta potencia. Un relé funciona mediante el uso de una bobina que, cuando se energiza, crea un campo magnético que mueve un interruptor o un conjunto de contactos eléctricos. Estos contactos pueden abrir o cerrar circuitos eléctricos separados, permitiendo que la corriente fluya a través de ellos o interrumpiendo la corriente.

Normalmente, tienen 3 patas, la común, la normalmente abierta y la normalmente cerrada [Figura 4-19]. La corriente pasa por el contacto común y de ahí va por una de las dos patas dependiendo del tipo de relé ya que algunos están en NC y otros en NA. Al activarse la bobina está atraerá el interruptor como un imán y se abrirá o cerrará el circuito dependiendo de cómo estuviese anteriormente.

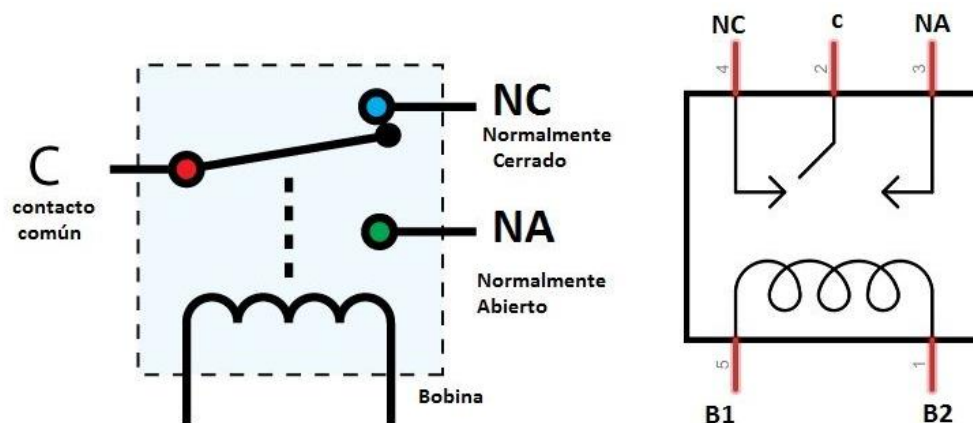


Figura 4-19 Esquema funcionamiento relé [36]

4.3.2.1 Montaje sistema de relés

Para el sistema de relés [Figura 4-20] se propuso dos conjuntos de relés: uno de 10 y otro de 8. El primer conjunto se encargaría de activar o desactivar el relé. El segundo conjunto elegiría si el electrodo en cuestión medirá el voltaje o estará conectado a la fuente de corriente alterna.

Normalmente, los electrodos estarán apagados al estar conectados el común con el normalmente cerrado (en el cual no se conectará nada irrumpiendo la conexión del circuito). Al activarlos, se conectarán al normalmente abierto, permitiendo que la conexión siga hasta el segundo conjunto de relés. No obstante, en el primer y décimo electrodo, ya que no tiene sentido que midan el voltaje al no tener más electrodos al lado capaces de generar el campo eléctrico, únicamente tienen un relé que al activarlo recibe corriente automáticamente. Por contra, el resto de electrodos sí que puede realizar las dos funciones. Por tanto, el segundo conjunto de relés se encarga de elegir cuales de las dos funciones desempeñará cada uno de ellos.

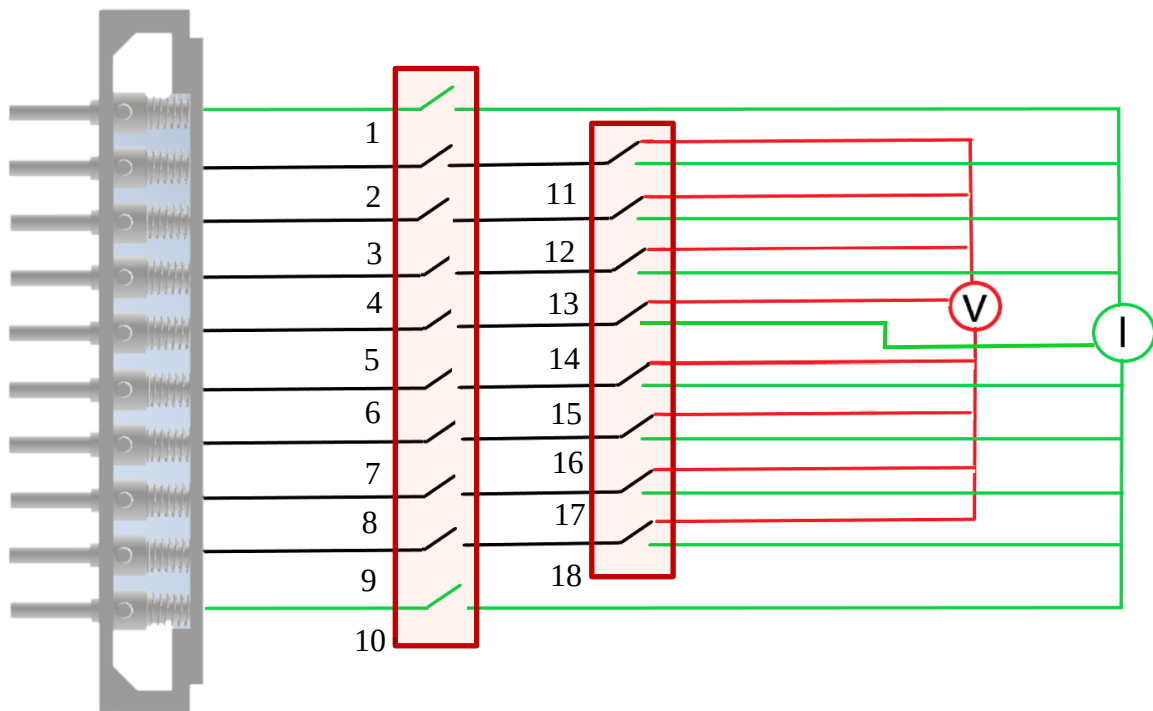


Figura 4-20 Sistema relés inicial

Debido al gran número de relés necesario, lo ideal era comprar módulos de relés: dos de 8 y uno de 2. Esto no fue posible ya que ninguno de los que se encontraron podían llegar en la fecha prevista. La solución por la que se optó fue conectar los relés en serie en una protoboard para que la placa de Arduino pudiese alimentar a todos al mismo tiempo. Esto no permitía conectar todos los relés que hubiéramos necesitado para los electrodos de los que dispone el ensamblaje. A pesar de los mencionados contratiempos, se consiguió montar 8 relés para 5 electrodos permitiendo 2 conmutaciones [Figura 4-21].

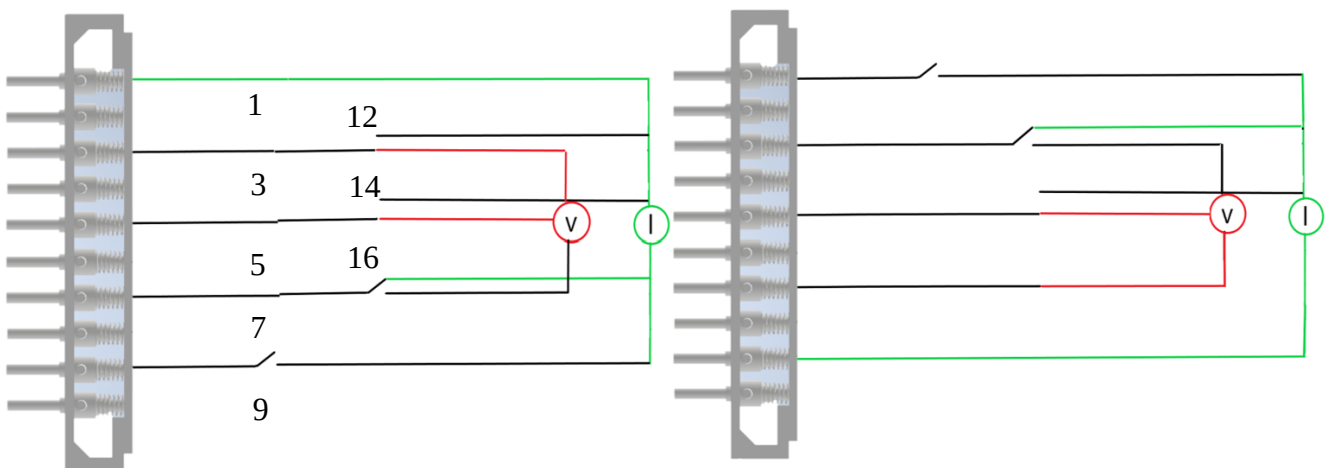


Figura 4-21 Conmutaciones 5 electrodos diagrama

En la primera conmutación transmiten la corriente los electrodos uno y siete y miden el voltaje el tres y el cinco. En la segunda conmutación, transmiten el tres y el nueve y miden el cinco y el siete. Esto nos permite tomar dos mediciones cada vez que posicionemos el soporte en el material. Para variar la profundidad de las mediciones habría que cambiar manualmente el cableado, teniendo para el número

disponible de electrodos tres posibilidades: a, 2a y 3a siendo “a” la distancia entre electrodos. Cuanto más grande sea esta distancia, más grande será la profundidad de medición, siendo esta un quinto de “a” [2.2.4.3 Profundidad de investigación]. Únicamente se retira el cable del primer conjunto de relés y se inserta el otro.

El montaje de los relés real siguiendo las conmutaciones de [Figura 4-21] sería el siguiente:

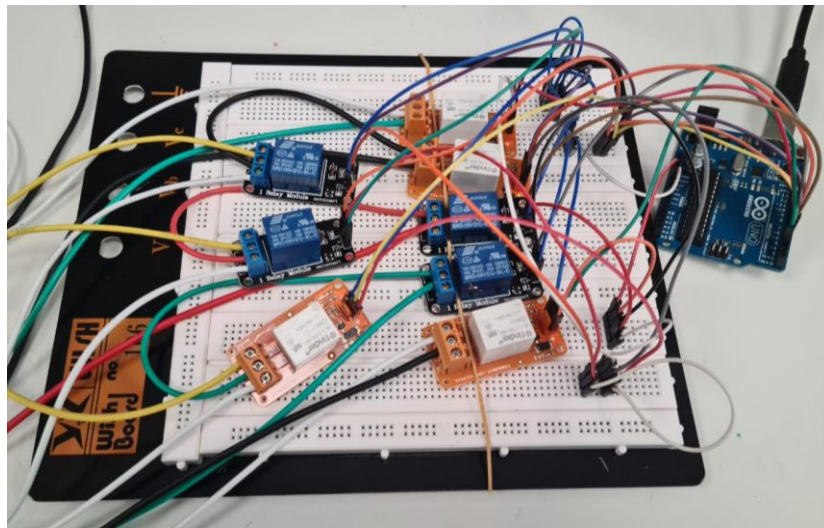


Figura 4-22 Montaje real relés 5 electrodos

En [Figura 4-22] los 8 relés se conectan en serie al pin de 5 V de la placa que se encarga de alimentarlos y al pin de tierra de la placa. Además, también se conecta cada relé a un pin de señal distinta de la placa de Arduino para poder realizar la conmutación que se explicará a continuación en [3.3.2.1 Programación Arduino]. Del mismo modo, se observa que el primer conjunto de relés está conectado al segundo conjunto (excepto los extremos) mediante cables y estos a los electrodos.

Por otro lado, si al final se hubieran conseguido todos los relés requeridos para realizar las conmutaciones con los diez electrodos, este montaje ya no serviría por distintas razones: la primera es que seguramente la placa de Arduino no habría tenido tanta fuerza para poder alimentar a una cantidad tan grande de relés. La segunda razón es que la placa no dispone de tantas señales para conectar los relés, por ello, haría falta otra placa de Arduino y juntar el programa para que funcionase en las dos al mismo tiempo.

3.3.2.1 Programación Arduino

Los relés están numerados de la siguiente forma: el primer conjunto de relés va del uno al diez empezando por la izquierda y el segundo conjunto del once al dieciocho empezando también por la izquierda. Lo primero que se hace el programa es asignar cada relé a su señal de la placa, es decir, especificar que relés están conectados por cable a las distintas señales.

```
// Definir el pin del relé
int pin_rele1 = 2;
int pin_rele3 = 3;
int pin_rele5 = 4;
int pin_rele7 = 5;
int pin_rele9 = 6;
int pin_rele12 = 7;
```

```
int pin_rele14 = 8;  
int pin_rele16 = 9;
```

Posteriormente, se establecerán todos los relés como salida.

```
void setup() {  
  // Configurar el pin del relé como salida  
  pinMode(pin_rele1, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele2, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele3, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele4, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele5, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele10, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele11, OUTPUT);  
  pinMode(pin_rele12, OUTPUT);  
}
```

Por último, se escribirán las conmutaciones que queremos realizar, en este caso como se estipula en [Figura 4-21]. Cada conmutación, tendrá una duración de 5 segundos.

```
void loop() {  
  // Activar el relé  
  digitalWrite(pin_rele1, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele2, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele3, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele4, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele5, LOW);  
  digitalWrite(pin_rele10, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele11, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele12, LOW);  
  
  // Esperar cinco segundos  
  delay(5000);  
  
  // Desactivar el relé  
  digitalWrite(pin_rele1, LOW);  
  digitalWrite(pin_rele2, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele3, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele4, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele5, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele10, LOW);  
  digitalWrite(pin_rele11, HIGH);  
  digitalWrite(pin_rele12, HIGH);  
  
  // Esperar un segundo  
  delay(5000);  
}
```

Este diagrama, sería para dos conmutaciones utilizando una distancia de “2a” entre electrodos. Además, también sería valido para otras dos conmutaciones de distancia “2a” o para cualquier conmutación que queramos con una distancia “a” cambiando manualmente los cables. Sin embargo, si queremos hacer la medición utilizando una distancia “3a” valdría únicamente con utilizar seis relés estando todos abiertos, ya que no habría posibilidad de hacer ninguna conmutación. En este caso, inducirían corriente los electrodos uno y diez activando los relés uno y diez y medirían el voltaje los electrodos cuatro y siete, activando los relés cuatro y trece y los relés siete y dieciséis respectivamente.

Si dispusiésemos de los dieciocho relés, podríamos utilizar un programa para activar todas las conmutaciones a la vez e ir cambiando de profundidad al mismo tiempo. El programa que se utilizaría en ese caso aparece reflejado en [Anexo III: Programa Arduino 10 electrodos].

4.4 Montaje completo equipo tomografía eléctrica

Juntando todos nuestros elementos, nuestro equipo de tomografía eléctrica constaría de lo siguiente: el soporte impreso en 3D donde irán situados los electrodos, el circuito del amplificador operacional y los dos conjuntos de relés que conmutan mediante el programa de Arduino.

El montaje final se puede visualizar esquematizado en [Figura 4-23]. En este se diferencian los siguientes elementos:

1. **Osciloscopio:** para medir el Voltaje
2. **Fuente corriente continua:** para alimentar el AO
3. **Fuente corriente alterna:** encargada de inducir la corriente
4. **Placa Arduino Uno:** permite conmutaciones entre electrodos
5. **Portátil:** ejecuta el programa de Arduino
6. **Soporte electrodos**
7. **Sistema relés**
8. **Circuito con AO**

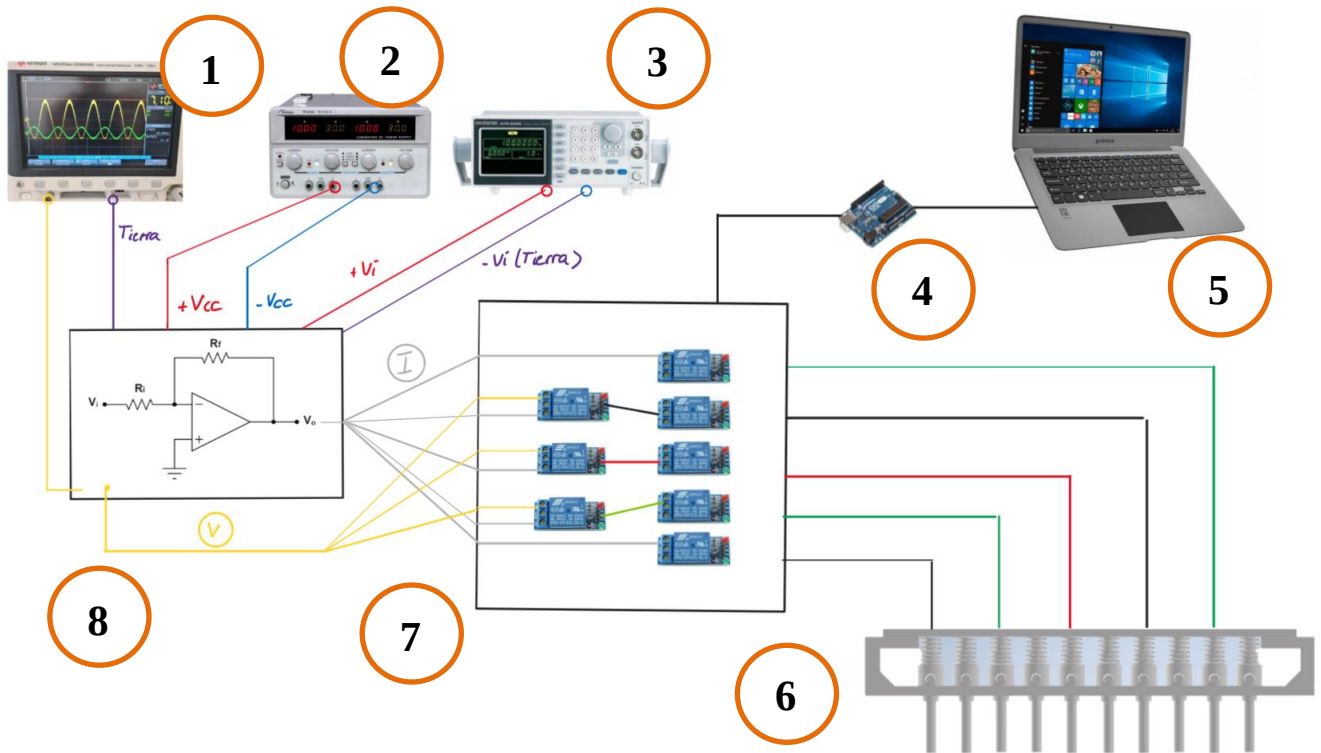


Figura 4-23 Esquema montaje completo del equipo de tomografía eléctrica

Para que funcione correctamente, todos estos elementos deben ir conectados de la siguiente manera:

- La fuente de corriente continua se conecta al OPA541 para alimentarlo. Este voltaje pico a pico debe ser mayor que el voltaje de salida para evitar la saturación del AO.
- La fuente de corriente alterna también se conecta al circuito del AO con el objetivo de incrementar el voltaje que llega a los electrodos que inducen la corriente para crear el campo eléctrico en el subsuelo o roca.
- Esa corriente llega a los dos electrodos de los lados pasando antes por el sistema de relés conectado a la placa de Arduino, a la vez conectada al portátil.
- Los otros dos electrodos que están en el centro de los que inducen corriente pasan también a través del sistema de relés hasta la protoboard del circuito del AO.
- En la protoboard se conectan al osciloscopio que medirá el voltaje entre esos dos electrodos. Con ese voltaje, con la corriente y con la separación de los electrodos sabremos la resistividad del material.

En el montaje real [Figura 4-24] la corriente que va desde el AO hasta los electrodos iría desde los cables blancos y el voltaje medido por el osciloscopio que viene de los otros dos electrodos se trasladaría por los cables amarillos. Ambos, o empiezan o terminan en la protoboard del circuito del AO, donde se conectarán en serie para poder llegar las conexiones a todos los electrodos.

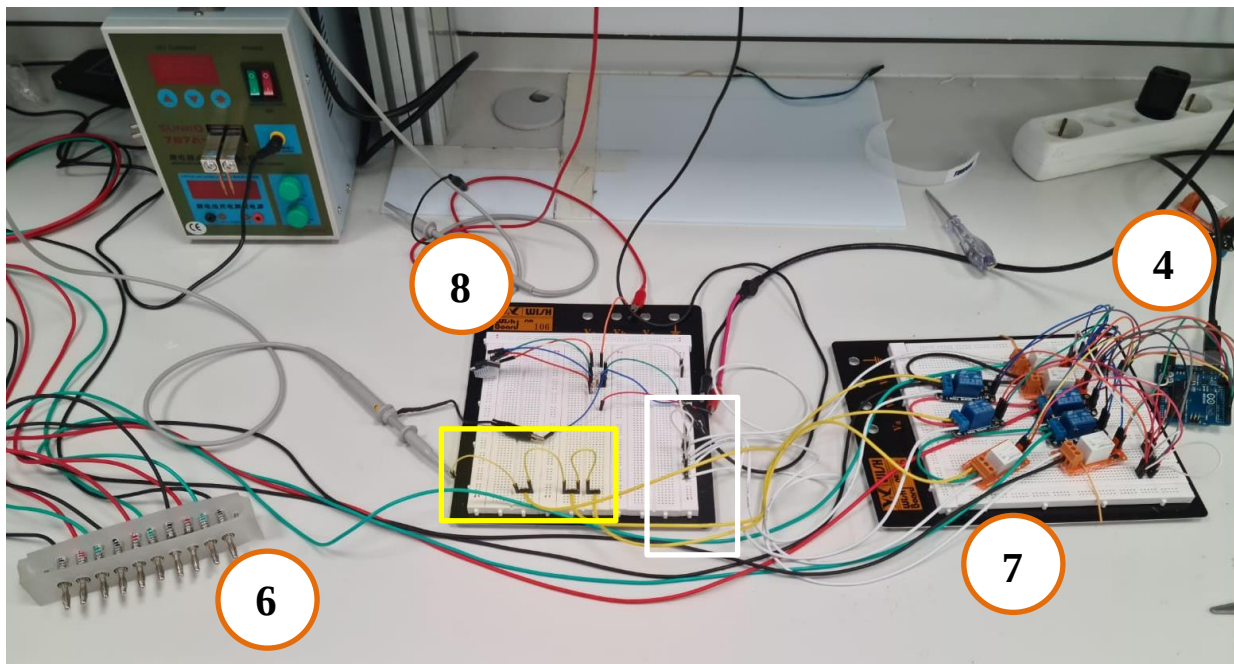


Figura 4-24 Montaje completo del equipo de tomografía eléctrica

4.5 Resultados prueba de concepto

En la primera prueba, tras realizar las diferentes mediciones tanto en el ladrillo rojo con el paño humedecido como en el granito seco, se obtuvieron los diferentes resultados:

Tabla 11 Resultados mediciones primera prueba

Frecuencia (Hz)	V Ladrillo Rojo (D)	ρ Ladrillo Rojo (D)	Granito (S)	ρ Granito (S)
10	0,048	0,756	6,000	94,451
50	0,044	0,693	11,690	184,022
500	0,068	1,070	10,060	158,363
1000	0,056	0,882	11,750	184,967
5000	0,000	0,000	9,400	147,974

Observando [Tabla 11] podemos sacar dos conclusiones importantes:

- Se puede apreciar una clara diferencia entre la resistividad del ladrillo rojo con el paño y la del granito seco, siendo esta última mucho mayor. Este resultado se puede reafirmar observando las mediciones iniciales tomadas en [4.1] o simplemente razonando que además de ser un material más poroso, el ladrillo rojo al contener un líquido disuelto en sales, contiene más iones y por tanto permite de forma más sencilla el paso de la corriente eléctrica [2.1.3][37].
- Con estos resultados también podemos ver de qué forma afecta la frecuencia a las mediciones. Si empleamos frecuencia muy bajas, se tomarán mediciones a más profundidad, mientras que si empleamos frecuencias más altas, se conseguirán mediciones cercanas a la superficie de la roca. Si nos centramos en el ladrillo rojo, inicialmente, con 10 y 50 Hz

obtenemos unas resistividades similares, sin embargo, con 500 Hz esta sube ya que la medición pasa por una cavidad (mancha de color más oscuro) [Figura 4-25]. Posteriormente con 1000 Hz, al encontrarse la medición más cerca de la superficie, humedecida de forma directa por el paño, vuelve a bajar. Por último, con la última frecuencia, obtenemos directamente la resistividad del paño que sería igual a 0 [38].

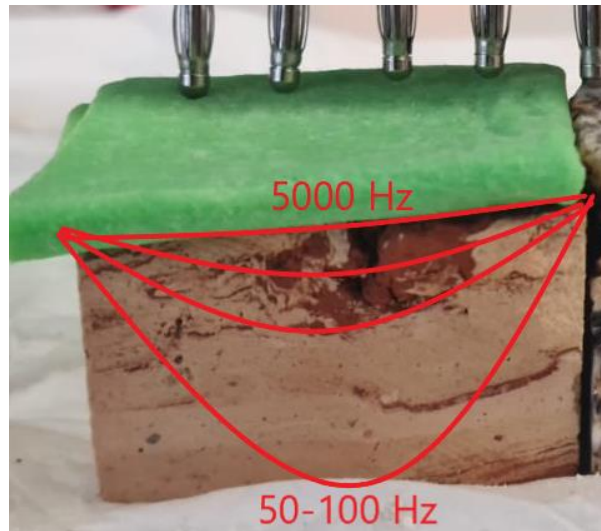


Figura 4-25 Altura mediciones según la frecuencia utilizada

En cuanto a la segunda prueba, alternando que electrodos introducían corriente y cuales median el voltaje, se recopiló la siguiente tabla de resistividades:

Tabla 12 Resultados mediciones segunda prueba

Frecuencia (Hz)	V 1° Conmutación (Ladrillo)	ρ 1° Conmutación	V 2° Conmutación (Granito)	ρ 2° Conmutación
10	0,310	4,880	2,100	33,058
50	0,330	5,195	8,770	138,056
500	0,350	5,510	9,300	146,399
1000	0,280	4,408	4,700	73,987
5000	0,110	1,732	2,300	36,206

Analizando las mediciones de [Tabla 12] se concluye que:

- En la primera conmutación, que tiene lugar en el ladrillo rojo justo en el límite con el granito [Figura 4-26 a)], se obtienen resistividades bajas pero ligeramente más altas que cuando se tomaron únicamente al ladrillo. Esto se debe a que la alta resistividad del granito interfiere ligeramente en esta medición.

Por otro lado, en la segunda conmutación, pasa justamente lo contrario. Las mediciones se toman en el granito, justamente en el límite con el ladrillo rojo [Figura 4-26 b)]. Por ello, la baja resistividad de este último, afecta las mediciones tomadas, siendo las del granito también más bajas que las de la primera prueba. También hay que tener en cuenta la fisura entre las dos rocas que está justo entre los dos electrodos que miden. Esta fisura crea huecos

con aire, creando al mismo tiempo un camino de baja resistividad que permite que la corriente eléctrica fluya con mayor facilidad.

- En cuanto a cómo afectan las frecuencias a las mediciones, al seguir un patrón similar a de la primera prueba se puede concluir que es debido a las mismas causas. A medida que aumenta la frecuencia de las mediciones, la señal eléctrica puede penetrar menos en el material, sin embargo, la señal puede detectar con mayor sensibilidad las variaciones en la conductividad eléctrica del materia [38].

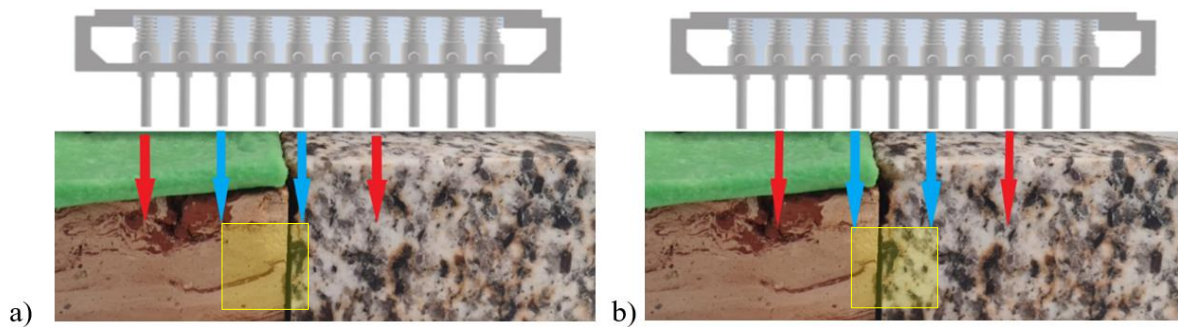


Figura 4-26 Posición electrodos durante la segunda prueba a) Primera conmutación b) Segunda conmutación

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado, se presentarán las conclusiones extraídas a lo largo del trabajo realizado. Además, se explicará si se alcanzaron o no los objetivos principales y específicos establecidos en el primer apartado de este TFG. Por último, se propondrán unas posibles líneas futuras en las que se podría seguir trabajando para mejorar y ampliar este TFG.

5.1 Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se han llevado a cabo diversos procesos (análisis de rasgos de resistividad en diferentes materiales, diseño e impresión 3D del soporte y elaboración de un circuito eléctrico) que al combinarlos consiguen el objetivo principal de este TFG. Es decir, la construcción de un equipo de tomografía eléctrica que puede trabar a diferentes rangos de frecuencia. Tanto del proceso general en sí, como de los diferentes subprocesos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Con el análisis de resistividades se observó no solo que estas varían según el material, sino también según las condiciones que lo afectan, como la cantidad de fluido que hay en él y la salinidad de este.
- En el proceso de elaboración del soporte, se consiguió imprimir una pieza de forma precisa para que cumpliera con todas las premisas necesarias respecto al movimiento de los electrodos. Tras la fabricación del soporte, se comprobó la importancia de poder permitir que los electrodos se adaptaran de forma correcta a la superficie ya que la mayoría de estas no eran lisas y el aparato no habría podido tomar las medidas correctamente.
- A través del montaje del circuito se concluyen varias cuestiones. La primera es que fue acertada la decisión de ampliar el voltaje debido a los límites de la fuente de AC, ya que únicamente con el generador de funciones no hubiera bastado. La segunda es que, aunque era efectivo, el sistema de relés era demasiado aparatoso incluso al realizar únicamente dos conmutaciones. Si se hubiesen conseguido los módulos de relé que se plantearon en un inicio, se hubiera conseguido simplificar todo el montaje.
- En general, tras la realización del trabajo se puede afirmar que, en efecto, la tomografía eléctrica es un método muy útil debido a la rapidez y precisión de sus medidas, y a que es un método no destructivo.

5.2 Líneas futuras

Este TFG es una versión simplificada de un equipo de tomografía real ya que estos no solo permiten analizar áreas más grandes, sino que también son más cómodos y portables y pueden mostrar los valores obtenidos mediante diagramas para posteriormente facilitar el análisis. A continuación se expondrán algunas ideas para poder mejorar el equipo en varios aspectos:

- En primer lugar, aunque para construcción no hace falta cubrir áreas tan grandes como en análisis de suelos, si se necesita ampliar esta, hacer un soporte más grande podría ser difícil de manejar. Una buena solución podría ser utilizar electrodos adhesivos que se utilizan en medicina. Estos tendrían que colocarse en el lugar a medir procurando dejar una distancia entre ellos óptima según la configuración que vayamos a realizar [39].
- Otra mejora podría ser adaptar el aparato para que sea compatible con un software como RES2DINV, que permita visualizar de forma sencilla todos los resultados [16].
- Por último, el equipo de tomografía construido, cuenta con dos protoboards, una fuente de DC, otra de AC y un osciloscopio, por lo tanto es imposible de transportar en caso de necesitar tomar varias medidas en el exterior. Para ello, los montajes del circuito se podrían realizar soldados en placas y posteriormente meterlos en una carcasa. El amplificador se podría alimentar mediante baterías que se introducen en la carcasa también y en lugar del osciloscopio, se podría buscar otro aparato más pequeño que tome las medidas y las pase directamente al software para su visualización.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Ungureanu, A. Priceputu, A.L. Bugea, A. Chirică, Use of electric resistivity tomography (ERT) for detecting underground voids on highly anthropized urban construction sites, *Procedia Eng.* 209 (2017) 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.148>.
- [2] JOHN M. REYNOLDS, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 1959.
- [3] M.Á. de la E. Cámara, Qué es la Tomografía por impedancia eléctrica, (n.d.). <http://www.tecnicosradiologia.com/2014/10/que-es-la-tomografia-por-impedancia.html>.
- [4] R. Zuñiga, Marco teorico. Tomografía eléctrica., *Detección Zo. Riesgo En La CCudad Guatemala*. (1982).
- [5] L. Estrada, *Prospección geoeléctrica*, Fac. Ciencias Exactas Y Tecnol. Dep. Geod. Y Topogr. 1 (2013) 2.
- [6] R. Curley, Conrad Schlumberger and Marcel Schlumberger _ German geophysicists, (n.d.). <https://www.britannica.com/biography/Conrad-Schlumberger-and-Marcel-Schlumberger>.
- [7] J. Feijoo, L.M. Ottosen, X.R. Nóvoa, T. Rivas, I. de Rosario, An improved electrokinetic method to consolidate porous materials, *Mater. Struct.* 50 (2017) 186. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1063-1>.
- [8] L. Mol, H.A. Viles, The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone, *Earth Surf. Process. Landforms.* 37 (2012) 301–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.2252>.
- [9] L. Mol, H. Viles, Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions, *Environ. Earth Sci.* 68 (2013) 1647–1659. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1858-x>.
- [10] I.S. Yoon, C.H. Chang, Effect of chloride on electrical resistivity in carbonated and non-carbonated concrete, *Appl. Sci.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/APP10186272>.
- [11] E. Orellana, *Tomografía Geoeléctrica: Desarrollo y aplicaciones en geotecnia., Prospección Geoeléctrica En Corriente Contin.* (1982) 14–30. https://www.researchgate.net/publication/266136632_TOMOGRAFIA_GEOELECTRICA_DE_SARROLLO_Y_POTENCIALES_APLICACIONES_EN_GEOTECNIA.
- [12] T. Teixidó, Á.R. Quintana, *Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía*, (2013) 56.
- [13] B.M. Niculescu, G. Andrei, Using Vertical Electrical Soundings to characterize seawater intrusions in the southern area of Romanian Black Sea coastline, *Acta Geophys.* 67 (2019) 1845–1863. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00341-y>.
- [14] S.P.E. Resistivity, What is VES , ERT , IP and SP Electrical Resistivity What is electrical resistivity ?, (n.d.) 1–8.
- [15] H. Vanhala, P. Lintinen, A. Ojala, Electrical resistivity study of permafrost on Ridnitšohkka fell in Northwest Lapland, Finland, *Geophysica.* 45 (2009) 103–118.
- [16] *Res2DInv y Res3DInv - Seequent*, (n.d.).
- [17] R. Fort, J. Feijoo, M.J. Varas–Muriel, M.A. Navacerrada, M.M. Barbero–Barrera, D. De la Prida, Appraisal of non-destructive in situ techniques to determine moisture- and salt crystallization-

- induced damage in dolostones, J. Build. Eng. 53 (2022) 104525. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104525>.
- [18] VTBatteriesSL, Batería Varta Blue Dynamic E23, (n.d.). [bateria-varta-blue-dynamic-e23-70ah-630aen-12v-261x175x220mm.html](https://www.vtbatteries.com/bateria-varta-blue-dynamic-e23-70ah-630aen-12v-261x175x220mm.html).
- [19] Equipo De Tomografía 2d De Resistencia Eléctrica, Duk-2a Sistema De Inspección De Resistencia De Múltiples Electrodos, (n.d.). [electrical-resistivity-2d-tomography-equipment-duk-2a-multi-electrode-resistivity-survey-system.html](https://www.duk-2a.com/electrical-resistivity-2d-tomography-equipment-duk-2a-multi-electrode-resistivity-survey-system.html).
- [20] Tomografía Eléctrica, (n.d.). [tomografia-electrica.html](https://www.tomografia-electrica.com).
- [21] J. Bernard, Short note on the depth of investigation of electrical methods, Source: Google Search. (2003). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:SHORT+NOTE+ON+THE+DEPTH+OF+INVESTIGATION+OF+ELECTRICAL+METHODS#0>.
- [22] C.A. Moreira, L. Guireli Netto, P.L. Camarero, F.B. Bertuluci, M.E. Hartwig, R. Domingos, Application of electrical resistivity tomography (ERT) in uranium mining earth dam, J. Geophys. Eng. 19 (2022) 1265–1279. <https://doi.org/10.1093/jge/gxac082>.
- [23] M. Matias, F. Almeida, ERT and the Location of Mining Cavities in Anisotropic Media: A Field Example, Cave Investig. (2017). <https://doi.org/10.5772/intechopen.68475>.
- [24] E.A. Ávila, U.M. Brouard, J.Á.P. Benito, J.V. Iriso, P.M. Pagán, Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica, Ingeopres Actual. Técnica Ing. Civil, Minería, Geol. y Medio Ambient. 122 (2003) 34–39. <https://upct.portalcientifico.es/documentos/5d3999c32999520684452f85>.
- [25] R. Eissa, Electrical Resistivity Tomography Application for Buried Foundation Investigations: Insights and Review, Iraqi Geol. J. 54 (2021) 122–133. <https://doi.org/10.46717/IGJ.54.2E.8MS-2021-11-24>.
- [26] R. Fort, M.J. Varas-Muriel, J. Feijoo, M. Alvarez de Buergo, Efectos de la humedad en el deterioro de los materiales de la Torre de la Iglesia San Juan Bautista en Guadalix de la Sierra, Madrid Acciones para su conservación, 2019.
- [27] Resistividad_ Materiales, Fórmula y Conductividad, (n.d.). <https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/interaccion-electromagnetica/resistividad/>.
- [28] Anycubic Resina UV – ANYCUBIC, (n.d.). https://www.anycubic.es/products/colored-uv-resin-for-photon-series?currency=EUR&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Google Shopping&gclid=Cj0KCQiAm5ycBhCXARIsAPldzoUtKvwCb-L5O5TSNWp0gLLJY5tk8qoEPzY92a_MerbSHq7DLhtJs4aAvbpEALw_wcB.
- [29] ELEGOO Mars 2 Mono LCD MSLA Resin 3D Printer – ELEGOO Official, (n.d.). <https://www.elegoo.com/products/elegoo-mars-2-mono-lcd-3d-printer>.
- [30] L.M. Ottosen, T.H. Larsen, P.E. Jensen, G.M. Kirkelund, H. Kern-Jespersen, N. Tuxen, B.H. Hyldegaard, Electrokinetics applied in remediation of subsurface soil contaminated with chlorinated ethenes – A review, Chemosphere. 235 (2019) 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.075>.
- [31] J. Feijoo, L.M. Ottosen, O. Matyscak, R. Fort, Electrokinetic desalination of a farmhouse applying a proton pump approach. First in situ experience, Constr. Build. Mater. 243 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308>.
- [32] J. Feijoo, O. Matyščák, L.M. Ottosen, T. Rivas, X.R. Nóvoa, Electrokinetic desalination of protruded areas of stone avoiding the direct contact with electrodes, Mater. Struct. Constr. 50

- (2017). <https://doi.org/10.1617/S11527-016-0946-X>.
- [33] I. de Rosario, T. Rivas, G. Buceta, J. Feijoo, M.J. Mosquera, Surfactant-Synthesized Consolidants Applied To A Granitic Medieval Necropolis In NW Spain. Laboratory And In Situ Effectiveness Evaluation, *Int. J. Archit. Herit.* 11 (2017) 1166–1176. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1354097>.
- [34] J. Feijoo, I. de Rosario, T. Rivas, M.J. Mosquera, R. Benavides, Influence of a Pre-consolidation Treatment on the Desalination Effectiveness of a Highly Deteriorated Granite Façade of Medieval Age, *Int. J. Archit. Herit.* 0 (2022) 1–19. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2086506>.
- [35] Burr-Brown, OPA541 High Power Monolithic OPERATIONAL AMPLIFIER, *Power.* 6133 (2016) 1–8.
- [36] AreaTecnologia, *Rele o Relevador*, (n.d.). <https://www.areatecnologia.com/electricidad/rele.html>.
- [37] F. Informativo, M. Lake, Folleto Informativo Conductividad Eléctrica / Salinidad, (n.d.) 1–4.
- [38] M. de E. y Ciencia, I.G. y M. de España, *Tomografia Geoelectrica : Desarrollo Para La Caracterizacion De Acuíferos*, (2006) 176.
- [39] Dispositivos electrónicos médicos - Henkel Adhesives, (n.d.). <https://www.henkel-adhesives.com/co/es/industries/medical/dispositivos-electronicos-medicos.html>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

En el siguiente Anexo se redactarán las diferentes implicaciones sociales, económicas y ambientales que tienen en general los equipo y el método de tomografía eléctrica:

IMPLICACIONES SOCIALES

- Mejora de la seguridad en la construcción: La utilización de la tomografía eléctrica puede ayudar a detectar posibles riesgos en el subsuelo que podrían afectar la seguridad de los trabajadores o de la estructura en construcción.
- Reducción de costos: La detección temprana de problemas o anomalías en el subsuelo puede ayudar a reducir costos de reparación o reubicación de la estructura en construcción además de ser una técnica no destructiva y no dañar el material que se analiza.
- Protección del patrimonio cultural: En lugares donde existen monumentos históricos o patrimonio cultural, la tomografía eléctrica puede ser una herramienta útil para detectar posibles estructuras subterráneas que podrían dañar estos bienes.
- Mejora de la planificación urbana: La información obtenida a través de la tomografía eléctrica puede ser utilizada para mejorar la planificación urbana y la toma de decisiones en cuanto a la construcción de infraestructura en un área determinada.
- Aceleración del proceso de construcción: Al tener información precisa sobre el subsuelo, los ingenieros y arquitectos pueden trabajar de manera más eficiente, reduciendo el tiempo de construcción y mejorando la calidad de la obra.

IMPLICACIONES ECONÓMICAS

Como se ha comentado en implicaciones sociales, la tomografía eléctrica afecta de forma directa a la reducción de costes. A continuación en [Tabla A1 1], se muestra el presupuesto aproximado que se hubiera utilizado para la construcción de nuestro equipo, ya que alguno de estos componentes estaban ya disponibles en el laboratorio.

En total, el equipo completo nos hubiera costado 187 €, teniendo en cuenta que para los elementos que no tienen unidades, el precio reflejado sería para un pack completo cuando en realidad únicamente se utilizaban algunas piezas del pack.

Tabla A1 1 Presupuesto total equipo

		UNIDADES	COSTE UNITARIO (€)
SOPORTE	RESINA UV...	1	32
	CABLES	-	22
	BANANAS	10	1,95
	MUELLES	-	5
	TORNILLOS	-	6
CIRCUITO	CABLES PROTOBOARD	-	12
	AMPLIFICADOR	1	23,45
	RELÉS	8	4,95
	PLACA ARDUINO	1	35
PRESUPUESTO TOTAL:			187

IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

- Reducción del impacto ambiental: La utilización de la tomografía eléctrica permite una mejor planificación de la construcción, lo que puede reducir la cantidad de excavación y movimientos de tierra necesarios. Esto puede minimizar el impacto ambiental en el área circundante.
- Detección de contaminación: Este método también puede utilizarse para detectar la presencia de contaminación en el suelo, como residuos tóxicos o metales pesados, lo que puede contribuir a una mejor gestión ambiental [2.2.5.4 Problemas medioambientales].
- Consumo de energía: Sin embargo, el proceso de tomografía eléctrica en sí mismo puede requerir una gran cantidad de energía, lo que puede aumentar la huella de carbono del proyecto.
- Generación de residuos: La tomografía eléctrica también puede generar residuos, como baterías y cables eléctricos, que deben ser gestionados adecuadamente para evitar su impacto ambiental.
- Impacto en la biodiversidad: Las actividades de construcción, incluyendo la utilización de la tomografía eléctrica, pueden afectar la biodiversidad de la zona, especialmente si se trata de un área natural protegida.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Mucha gente, sobre todo fuera del entorno de la ingeniería, no conoce el método de la tomografía eléctrica ni su potencial. Sin embargo, es una realidad todas las aplicaciones que se pueden realizar con esta técnica y las ventajas que nos proporciona a todos como sociedad.

Aunque no lo parezca, hoy en día para iniciar cualquier obra, infraestructura o para poder preservarlas es necesario analizar los materiales con los que vamos a tratar o sobre los que vamos a tratar. Esto se puede visualizar en nuestro entorno como, por ejemplo en la Escuela Naval Militar, prediciendo donde se podría utilizar este método:

- En la nueva construcción del edificio ‘Marqués de la Victoria’ para asegurar la seguridad de la construcción y la reducción de costos.
- En la estatua del patio de aulas [Figura A2 1 a)] para conservar el patrimonio cultural de la ENM
- En la mayoría de las infraestructuras de la escuela [Figura A2 1 b)] que debido a su antigüedad y a la prevalencia del ambiente marítimo, presentan un claro deterioro.



Figura A2 1 a) Estatua patio de aulas b) Pared de la galería de tiro

ANEXO III: PROGRAMA ARDUINO 10 ELECTRODOS

A continuación se muestra en este anexo el programa que se utilizaría para poder realizar todas las conmutaciones de los diez electrodos. Este programa consta de doce conmutaciones: siete para una distancia “a”, cuatro para una distancia “2a” y una para una distancia “3a”. Cada conmutación tiene una duración de cinco segundos.

```
// Definir los pines de los relés
int pin_rele1 = 1;
int pin_rele2 = 2;
int pin_rele3 = 3;
int pin_rele4 = 4;
int pin_rele5 = 5;
int pin_rele6 = 6;
int pin_rele7 = 7;
int pin_rele8 = 8;
int pin_rele9 = 9;
int pin_rele10 = 10;
int pin_rele11 = 11;
int pin_rele12 = 12;
int pin_rele13 = 13;
int pin_rele14 = 14;
int pin_rele15 = 15;
int pin_rele16 = 16;
int pin_rele17 = 17;
int pin_rele18 = 18;

// Definir los objetos de los relés
Relay rele1(pin_rele1);
Relay rele2(pin_rele2);
Relay rele3(pin_rele3);
Relay rele4(pin_rele4);
Relay rele5(pin_rele5);
Relay rele6(pin_rele6);
Relay rele7(pin_rele7);
Relay rele8(pin_rele8);
Relay rele9(pin_rele9);
Relay rele10(pin_rele10);
Relay rele11(pin_rele11);
Relay rele12(pin_rele12);
Relay rele13(pin_rele13);
Relay rele14(pin_rele14);
Relay rele15(pin_rele15);
Relay rele16(pin_rele16);
Relay rele17(pin_rele17);
Relay rele18(pin_rele18);
```

```
void setup() {
  // Configurar los pines de los relés como salida
  pinMode(pin_rele1, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele2, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele3, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele4, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele5, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele6, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele7, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele8, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele9, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele10, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele11, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele12, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele13, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele14, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele15, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele16, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele17, OUTPUT);
  pinMode(pin_rele18, OUTPUT);
}

void loop() {
  // Conmutaciones distancia "a"
  // Activar conmutación 1-2-3-4
  digitalWrite(pin_rele1, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele2, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele3, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele4, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele11, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele12, HIGH);

  // Esperar cinco segundos
  delay(5000);

  // Desactivar conmutación 1-2-3-4 y activar 2-3-4-5
  digitalWrite(pin_rele1, LOW);
  digitalWrite(pin_rele5, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele11, LOW);
  digitalWrite(pin_rele13, HIGH);

  // Esperar un segundo
  delay(5000);

  // Desactivar conmutación 2-3-4-5 y activar 3-4-5-6
  digitalWrite(pin_rele2, LOW);
  digitalWrite(pin_rele6, HIGH);
  digitalWrite(pin_rele12, LOW);
  digitalWrite(pin_rele14, HIGH);
```

```
// Esperar cinco segundos
delay(5000);

// Desactivar conmutación 3-4-5-6 y activar 4-5-6-7
digitalWrite(pin_rele3, LOW);
digitalWrite(pin_rele7, HIGH);
digitalWrite(pin_rele13, LOW);
digitalWrite(pin_rele15, HIGH);

// Esperar un segundo
delay(5000);

// Desactivar conmutación 4-5-6-7 y activar 5-6-7-8
digitalWrite(pin_rele4, LOW);
digitalWrite(pin_rele8, HIGH);
digitalWrite(pin_rele14, LOW);
digitalWrite(pin_rele16, HIGH);

// Esperar cinco segundos
delay(5000);

// Desactivar conmutación 5-6-7-8 y activar 6-7-8-9
digitalWrite(pin_rele5, LOW);
digitalWrite(pin_rele9, HIGH);
digitalWrite(pin_rele15, LOW);
digitalWrite(pin_rele17, HIGH);

// Esperar un segundo
delay(5000);

// Desactivar conmutación 6-7-8-9 y activar 7-8-9-10
digitalWrite(pin_rele6, LOW);
digitalWrite(pin_rele10, HIGH);
digitalWrite(pin_rele16, LOW);
digitalWrite(pin_rele18, HIGH);

// Esperar cinco segundos
delay(5000);

// Conmutaciones distancia "2a"
// Desactivar conmutación 7-8-9-10 y activar 1-3-5-7
digitalWrite(pin_rele8, LOW);
digitalWrite(pin_rele9, LOW);
digitalWrite(pin_rele10, LOW);
digitalWrite(pin_rele1, HIGH);
digitalWrite(pin_rele3, HIGH);
digitalWrite(pin_rele5, HIGH);
digitalWrite(pin_rele17, LOW);
digitalWrite(pin_rele18, LOW);
```

```
digitalWrite(pin_rele12, HIGH);
digitalWrite(pin_rele14, HIGH);

// Esperar un segundo
delay(5000);

// Desactivar conmutación 1-3-5-7 y activar 2-4-6-8
digitalWrite(pin_rele1, LOW);
digitalWrite(pin_rele3, LOW);
digitalWrite(pin_rele5, LOW);
digitalWrite(pin_rele7, LOW);
digitalWrite(pin_rele2, HIGH);
digitalWrite(pin_rele4, HIGH);
digitalWrite(pin_rele6, HIGH);
digitalWrite(pin_rele8, HIGH);
digitalWrite(pin_rele12, LOW);
digitalWrite(pin_rele14, LOW);
digitalWrite(pin_rele13, HIGH);
digitalWrite(pin_rele15, HIGH);

// Esperar cinco segundos
delay(5000);

// Desactivar conmutación 2-4-6-8 y activar 3-5-7-9
digitalWrite(pin_rele2, LOW);
digitalWrite(pin_rele4, LOW);
digitalWrite(pin_rele6, LOW);
digitalWrite(pin_rele8, LOW);
digitalWrite(pin_rele3, HIGH);
digitalWrite(pin_rele5, HIGH);
digitalWrite(pin_rele7, HIGH);
digitalWrite(pin_rele9, HIGH);
digitalWrite(pin_rele13, LOW);
digitalWrite(pin_rele15, LOW);
digitalWrite(pin_rele14, HIGH);
digitalWrite(pin_rele16, HIGH);

// Esperar un segundo
delay(5000);

// Desactivar conmutación 3-5-7-9 y activar 4-6-8-10
digitalWrite(pin_rele3, LOW);
digitalWrite(pin_rele5, LOW);
digitalWrite(pin_rele7, LOW);
digitalWrite(pin_rele9, LOW);
digitalWrite(pin_rele4, HIGH);
digitalWrite(pin_rele6, HIGH);
digitalWrite(pin_rele8, HIGH);
digitalWrite(pin_rele10, HIGH);
digitalWrite(pin_rele14, LOW);
```

```
digitalWrite(pin_rele16, LOW);
digitalWrite(pin_rele15, HIGH);
digitalWrite(pin_rele17, HIGH);

// Esperar cinco segundos
delay(5000);

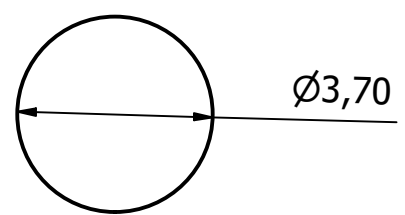
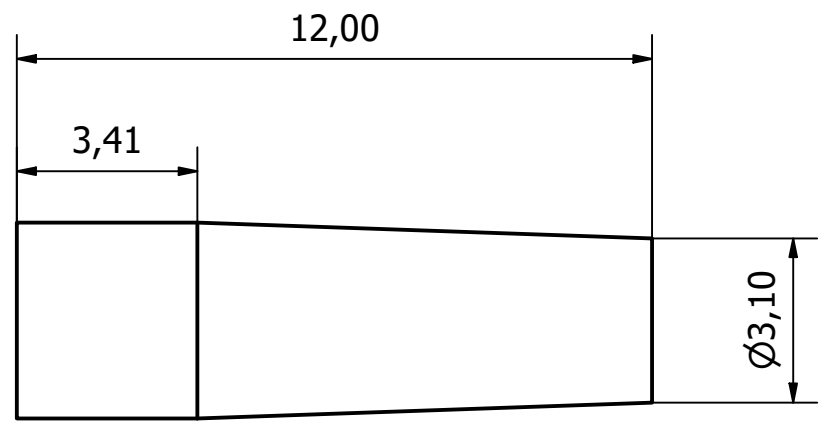
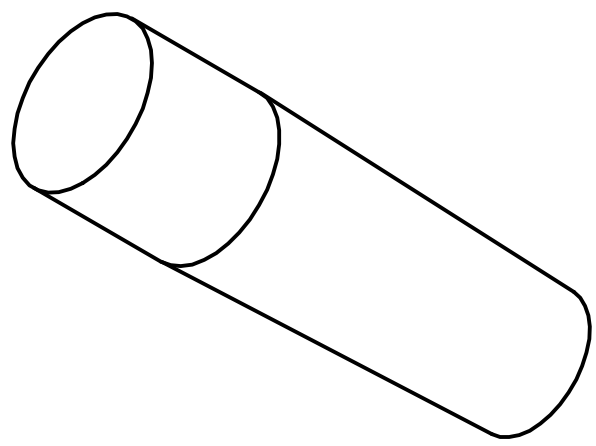
// Conmutación distancia "3a"
// Desactivar conmutación 4-6-8-10 y activar 1-4-7-10
digitalWrite(pin_rele4, LOW);
digitalWrite(pin_rele6, LOW);
digitalWrite(pin_rele8, LOW);
digitalWrite(pin_rele10, LOW);
digitalWrite(pin_rele1, HIGH);
digitalWrite(pin_rele4, HIGH);
digitalWrite(pin_rele7, HIGH);
digitalWrite(pin_rele10, HIGH);
digitalWrite(pin_rele15, LOW);
digitalWrite(pin_rele17, LOW);
digitalWrite(pin_rele13, HIGH);
digitalWrite(pin_rele16, HIGH);

// Esperar un segundo
delay(5000);
}
```

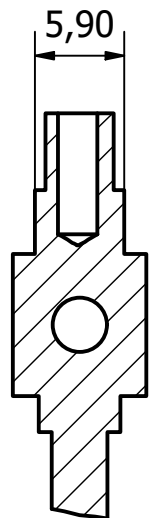
ANEXO IV: PLANOS SOPORTE ELECTRODOS

A continuación se presentan los siguientes planos:

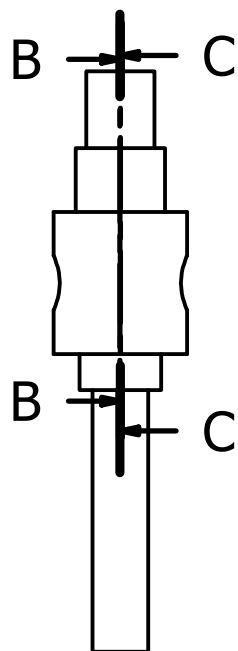
1. Barras unión cortas
2. Electrodo con tapa
3. Placa superior
4. Placa inferior
5. Ensamblaje soporte final
6. Ensamblaje soporte final



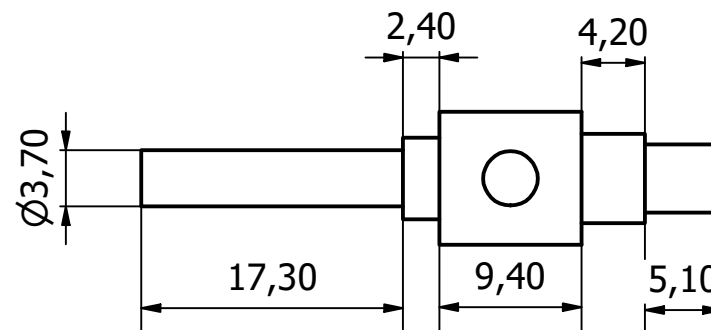
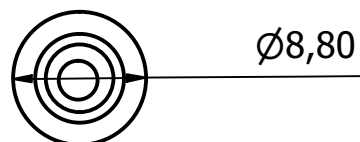
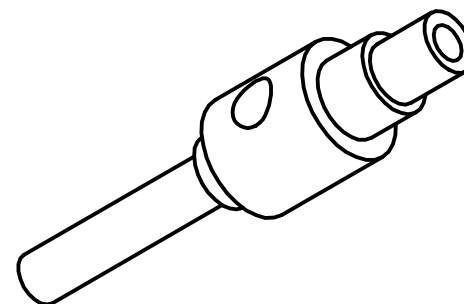
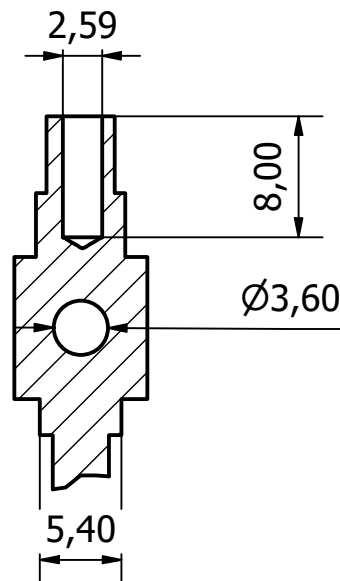
Designed by Germán Vicente Arévalo	Trabajo TFG	Nº Pieza 1	Date 06/03/2023
	Ensamblaje Soporte Final		
	Barras union cortas	Escala 7:1	Sheet 1 / 6



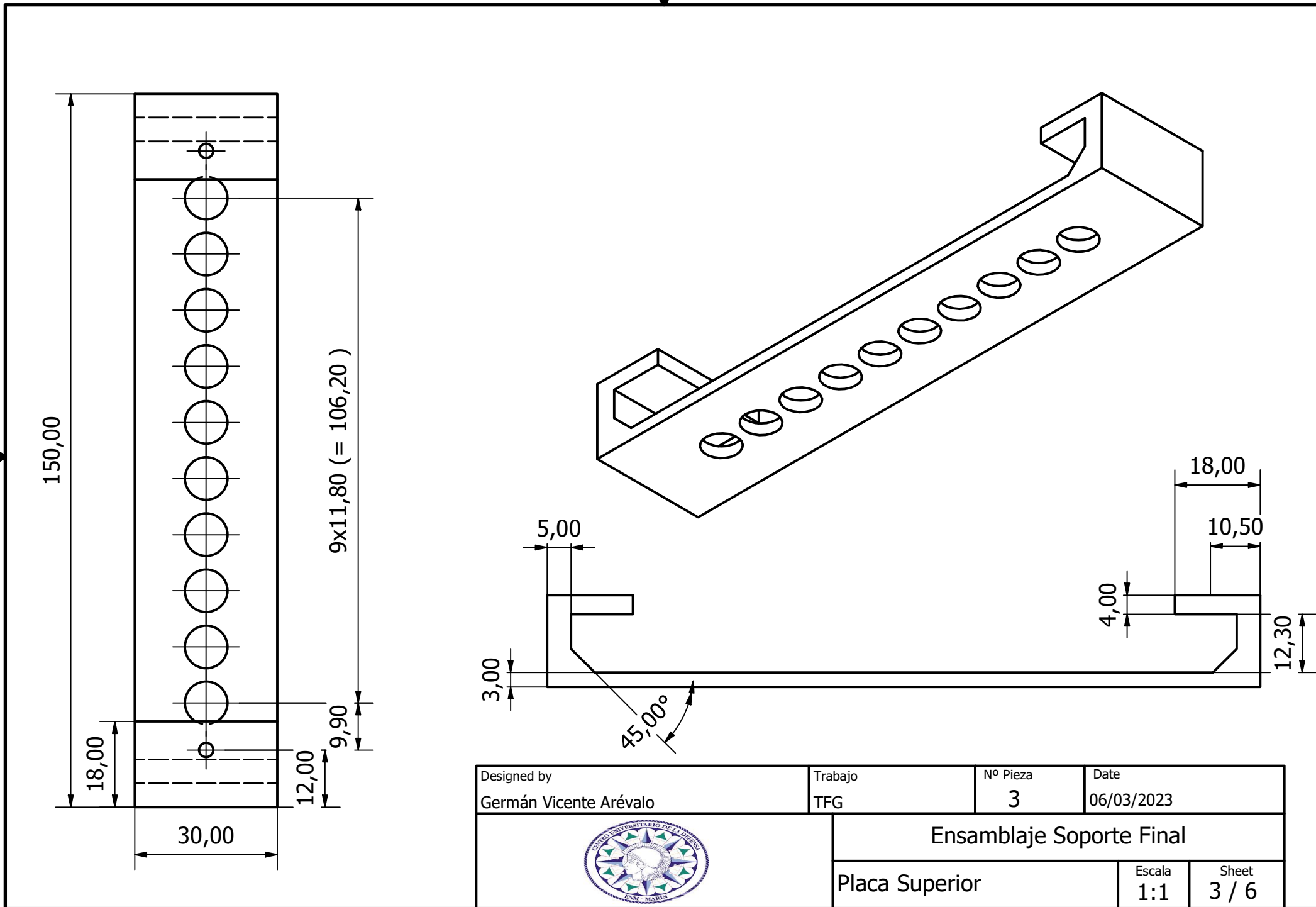
C-C (2 : 1)

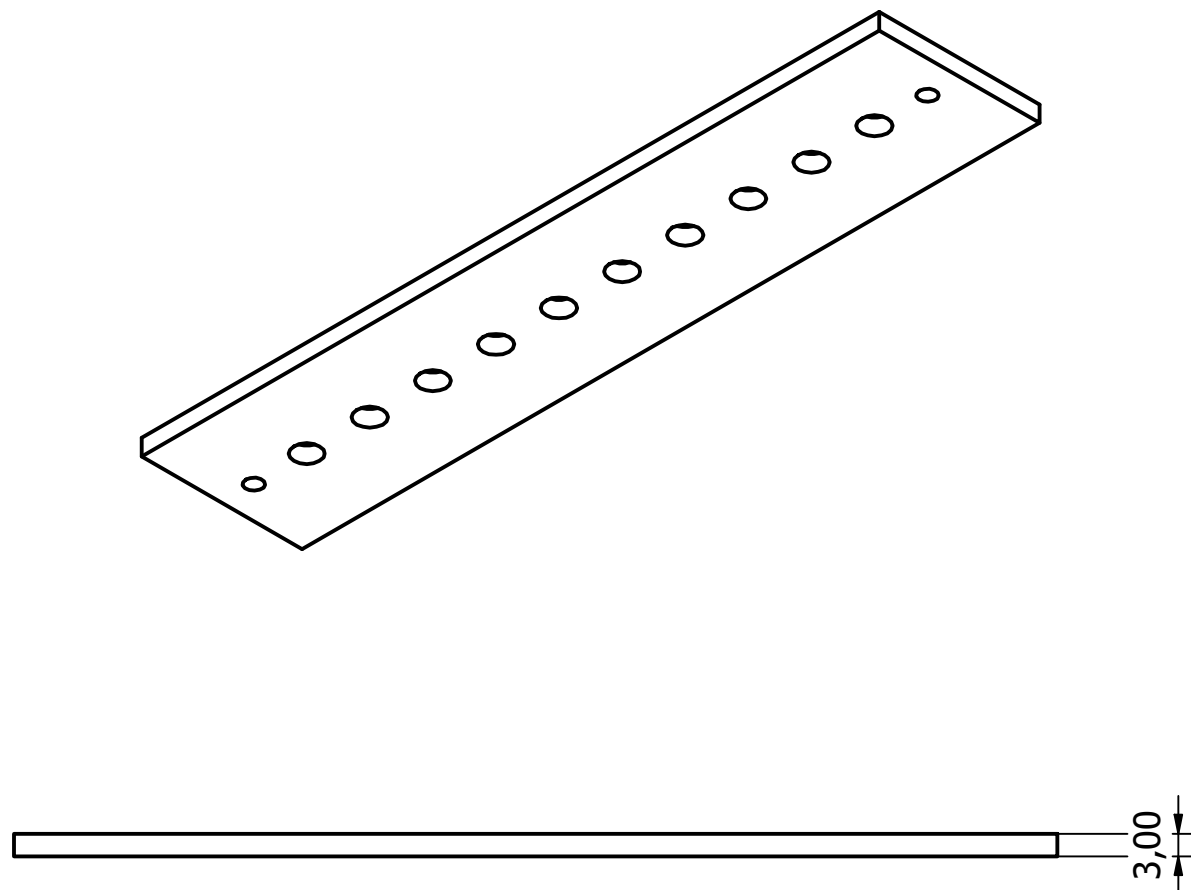
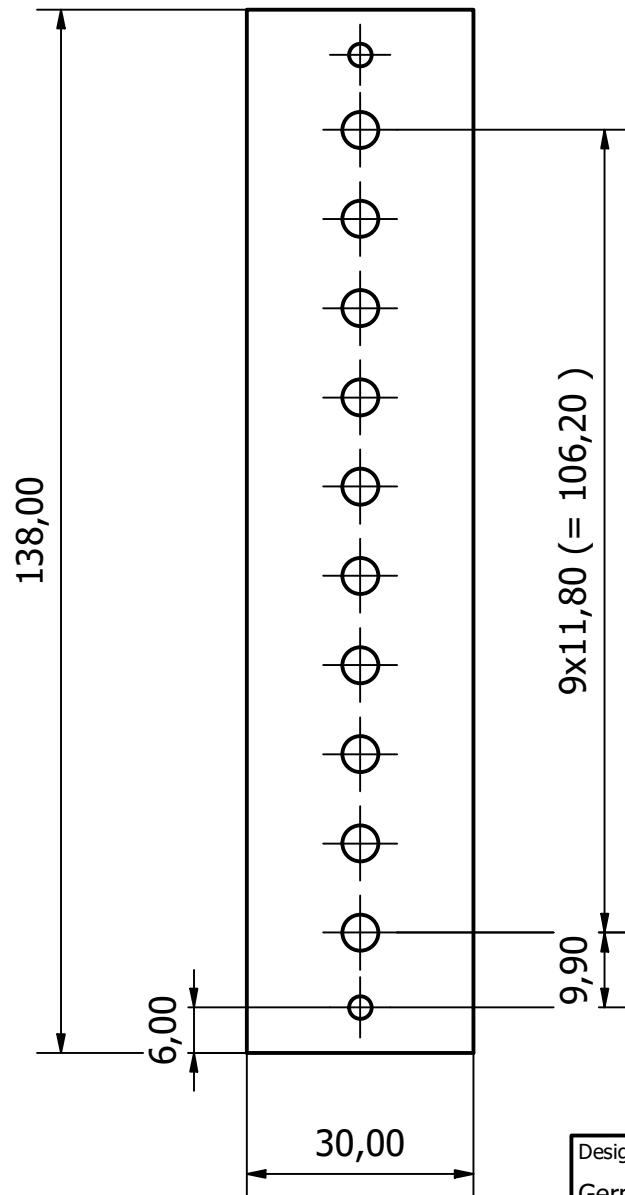


B-B (2 : 1)



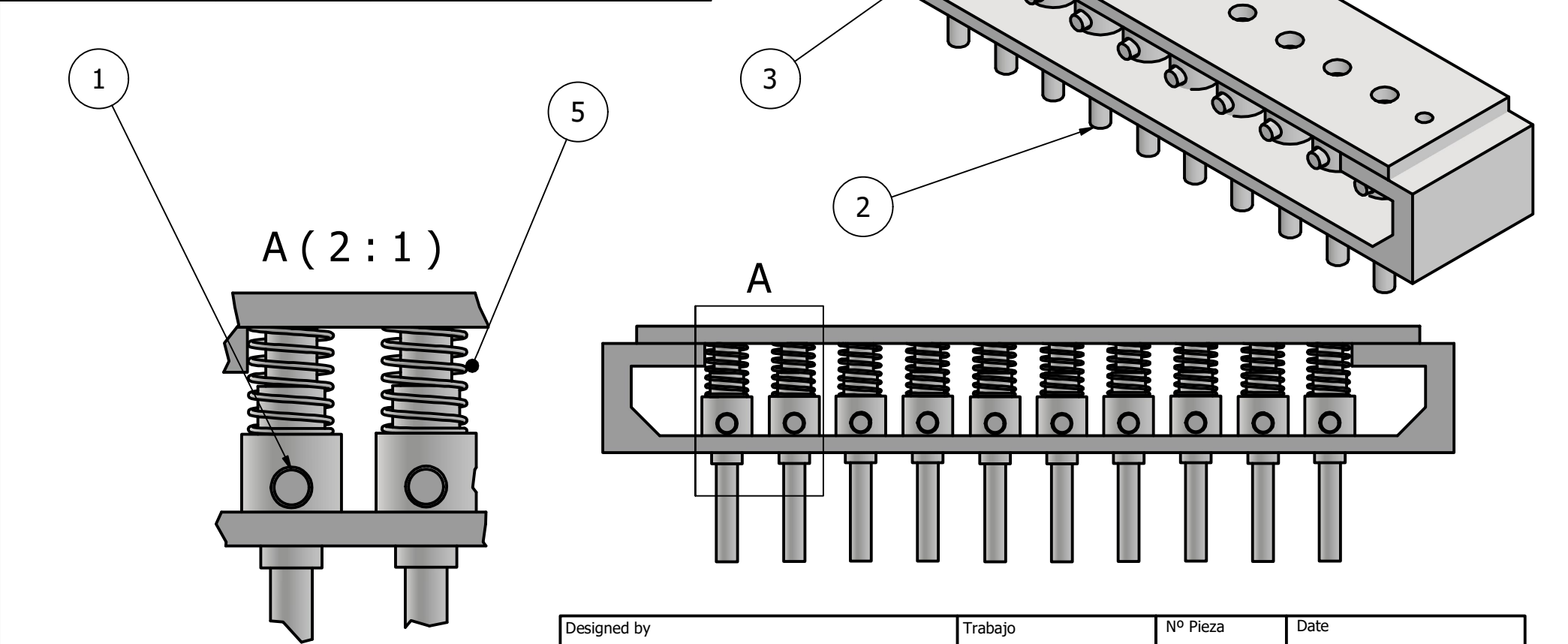
Designed by Germán Vicente Arévalo	Trabajo TFG	Nº Pieza 2	Date 06/03/2023
	Ensamblaje Soporte Final		
	Electrodo con tapa	Escala 2:1	Sheet 2 / 6





Designed by Germán Vicente Arévalo	Trabajo TFG	Nº Pieza 4	Date 06/03/2023
	Ensamblaje Soporte Final		
	Placa Inferior	Escala 1:1	Sheet 4 / 6

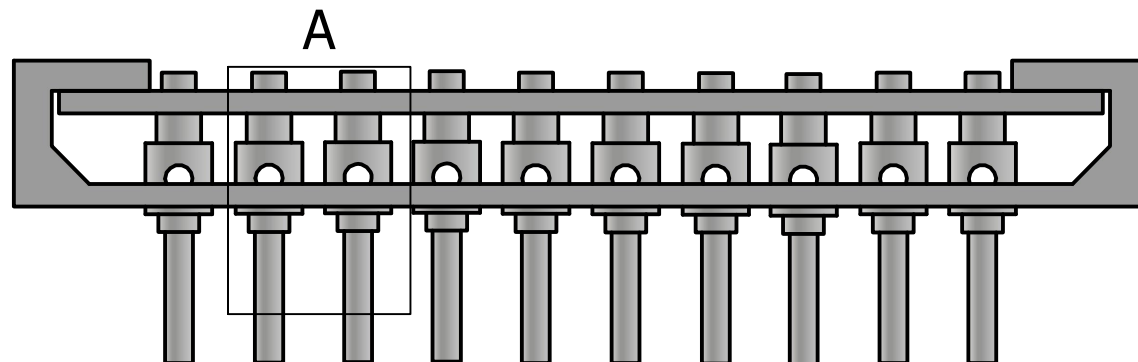
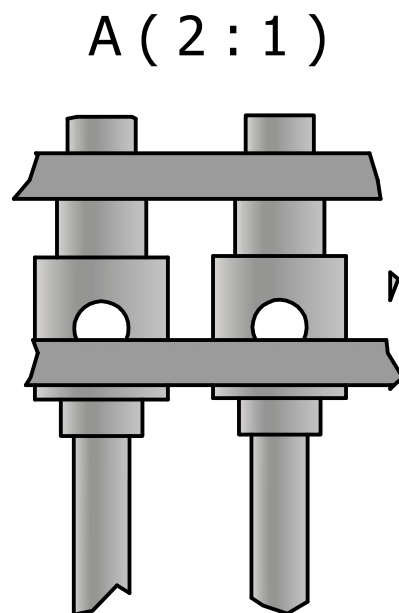
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	10	Barras Unión Cortas
2	10	Electrodos con tapa
3	1	Placa Superior
4	1	Placa Inferior
5	10	Muelles



Designed by Germán Vicente Arévalo	Trabajo TFG	Nº Pieza 5	Date 06/03/2023
	Ensamblaje Soporte Final		
	Ensamblaje Soporte Final	Escala 1:1	Sheet 5 / 6

Sin barras para sujetar los electrodos

Sin espacio suficiente entre placas para insertar los muelles



Designed by Germán Vicente Arévalo	Trabajo TFG	Nº Pieza -	Date 06/03/2023
		Ensamblaje Soporte Inicial	
		ensamblaje inicial	Escala 1:1 Sheet 6 / 6