



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Diseño en sensores de conductividad eléctrica para medida de calidad del agua en soluciones de suelo

TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

Autor: Míriam Máximo Gutiérrez
Director: Roque Torres Sánchez
Codirector: Martín Oates



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, diciembre de 2020

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS.	4
1.1. Motivación.	4
1.2. Objetivos.	4
1.3. Organización de la memoria.	4
2. MARCO TEÓRICO.	6
2.1. El suelo.	6
2.1.1. <i>Características del suelo.</i>	6
2.1.2. <i>Fases del suelo.</i>	6
2.2. Conductividad eléctrica.	7
2.2.1. <i>Definición de la conductividad eléctrica.</i>	7
2.2.2. <i>Conductividad eléctrica en soluciones acuosas.</i>	7
2.2.3. <i>Efectos de la temperatura en la conductividad eléctrica.</i>	8
2.2.4. <i>Principio de medición.</i>	8
2.3. Calidad del agua en soluciones de suelo.	9
2.4. Sensores.	10
2.4.1. <i>Definición.</i>	10
2.4.2. <i>Sensor de conductividad eléctrica.</i>	10
2.4.3. <i>Sensores comerciales de conductividad eléctrica.</i>	11
3. EQUIPO Y METODOLOGÍA.	14
3.1. Equipos.	14
3.1.1. <i>Conductivímetro.</i>	14
3.1.2. <i>Potenciostato.</i>	15
3.1.3. <i>Generador de señal.</i>	20
3.1.4. <i>Osciloscopio.</i>	21
3.2. Metodología.	21
3.2.1. <i>Preparación de las muestras.</i>	21
3.2.2. <i>Obtención de medidas.</i>	22
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	26
4.1. Obtención de las relaciones de conductividad eléctrica y porcentaje de sal en la solución.	26
4.2. Obtención de los resultados del potenciostato.	31
5. DISEÑO DEL SENSOR.	45
6. CONCLUSIONES.	47
7. BIBLIOGRAFÍA.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Distinta migración de iones al aplicar CC o CA a la celda de medición.....	8
Figura 2-2: Impacto negativo de la polarización y la capacitancia en la lectura de conductividad.	9
Figura 2-3: Sensor resistivo.....	11
Figura 2-4: Especificaciones sensor Inpro7100 de 4 electrodos.	12
Figura 2-5: Sensor inductivo.	12
Figura 2-6: Especificaciones sensor InPro7250ST PEEK.	13
Figura 3-1: Medidor de conductividad portátil Seven2GO S3.....	14
Figura 3-2: Sensor InLab 731-ISM.	15
Figura 3-3: Esquemas de una celda de conductividad de 4 polos.	15
Figura 3-4: Panel frontal del potencióstato modelo PS-305.....	17
Figura 3-5: Panel posterior del potencióstato modelo PS-305.	17
Figura 3-6: Diagrama simplificado de los circuitos eléctricos del potencióstato modelo PS-605. PS-amplificador de control principal, WE- electrodo de trabajo, CE-electrodo contador, REF- electrodo de referencia, PROGRAM- amplificador de forma de onda del programa, B- buffer de alta impedancia, IR- compensación de caída de potencial óhmico, Σ -punto de suma, N- amplificador inversor, D- amplificador diferencial.....	19
Figura 3-7: Constantes de celda recomendadas.	20
Figura 3-8: Representación del error.....	24
Figura 4-1: Electrodo de acero.	31
Figura 4-2: Electrodo de cobre.	31
Figura 4-3: Electrodo de aluminio.....	32
Figura 4-4: Configuración sondas.....	32
Figura 4-5: Geometría de sondas número 1.	33
Figura 4-6: Geometría de sondas número 2.	34
Figura 4-7: Geometría de sondas número 3.	36
Figura 4-8: Geometría de sondas número 4.	37
Figura 4-9: Geometría de sondas número 5.	39
Figura 4-10: Geometría de sondas número 6.	40
Figura 5-1: Circuito del sensor controlado por Arduino.	45

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $20.6 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$	26
Gráfica 4-2: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $21.5 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$	27
Gráfica 4-3: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $22 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$	27
Gráfica 4-4: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $23.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$	28
Gráfica 4-5: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $24 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$	28
Gráfica 4-6: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $25.1 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$	29
Gráfica 4-7: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $26.05 \pm 0.35^{\circ}\text{C}$	29

Gráfica 4-8: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $27.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$	30
Gráfica 4-9: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 1.....	34
Gráfica 4-10: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 2.....	35
Gráfica 4-11: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 3.....	37
Gráfica 4-12: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 4.....	38
Gráfica 4-13: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 5.....	40
Gráfica 4-14: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 6.....	41
Gráfica 4-15: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 4 para el primer intervalo.....	42
Gráfica 4-16: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 3 para el segundo intervalo.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Conductividad eléctrica en distintas aguas.....	8
Tabla 3-1: Especificaciones del potenciómetro modelo PS-605.....	17
Tabla 3-2: Cantidades de sal usadas para realizar las muestras.....	22
Tabla 3-3: Valores que recibe el factor de incertidumbre dependiendo del número de ensayos n.....	23
Tabla 4-1: Resultados de las relaciones lineales de conductividad frente a porcentaje de sal en solución para distintas temperaturas.....	30
Tabla 4-2: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 1.....	33
Tabla 4-3: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 2.....	35
Tabla 4-4: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 3.....	36
Tabla 4-5: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 4.....	38
Tabla 4-6: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 5.....	39
Tabla 4-7: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 6.....	41
Tabla 4-8: Regresiones lineales obtenidas para muestras con valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 2 y 13 mS/cm.....	42
Tabla 4-9: Regresiones lineales obtenidas para muestras con valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 18 y 70 mS/cm.....	43

1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y OBJETIVOS.

1.1.Motivación.

El uso de sensores en la actualidad nos permite recoger información de un determinado proceso con el objetivo de conocer en profundidad en qué estado se encuentra. Además, determinados sensores nos permiten optimizar los recursos necesarios para llevar a cabo el proceso con éxito, es el caso concreto de los sensores que relatamos en este trabajo.

En particular, los sensores de conductividad eléctrica para soluciones de suelo nos permiten estimar la cantidad de sales de la solución. La solución de suelo es el agua retenida en los poros de este, y dependiendo de la cantidad de sal que contenga, estaremos hablando de un suelo de mejor o peor calidad, ya que este factor influye en gran medida a la capacidad que poseen las plantas que se encuentran en ese suelo de absorber el agua disponible. De manera, que conociendo la salinidad de la solución del suelo se podría evaluar la cantidad de agua óptima para la supervivencia del mundo vegetal de la superficie terrestre.

Por otra parte, cabe destacar que la medida de la conductividad eléctrica es un parámetro complejo, pues el resultado de esta medida se ve modificado por múltiples factores, como pueden ser la temperatura y la resistencia que opone al paso de corriente eléctrica. Esta resistencia, a su vez también se verá afectada por las características de las sondas que usemos para su medida.

Por todo esto, el diseño de un sensor de conductividad eléctrica es interesante, pues podremos visualizar como se modifica este parámetro, que posee bastante importancia respecto a la conservación de plantas en un suelo, dependiendo de diversos factores.

1.2.Objetivos.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Aprender a utilizar el potenciómetro como medida de relación entre la intensidad y el voltaje.
- Aprender a realizar modelos de medida a partir de muestras de referencia.
- Estudio de distintas sondas: conocer la relación entre la conductividad eléctrica de una solución y la resistencia que opone al paso de corriente; para diferentes geometrías y materiales.
- Hallar la sonda óptima para el diseño del sensor: encontrar la geometría y el material de la sonda que nos proporcione los valores más fiables a partir del estudio de cada una de ellas.
- Diseño del circuito con plataformas open-source.

1.3.Organización de la memoria.

Esta memoria está organizada en siete capítulos, en cada uno de los cuales se desarrolla un aspecto determinado del trabajo. En este primer capítulo se desarrolla la causa que ha motivado a la realización de este trabajo, los objetivos que se han propuesto y se explica cómo está distribuida la memoria.

En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico, donde se pone en antecedentes al lector del trabajo sobre el tema a tratar. En este capítulo se hablará sobre qué es la solución

de suelo, los principios básicos sobre la conductividad eléctrica que nos van a influir en la toma de medidas, y sobre los sensores, poniendo ejemplos sobre algunos ya disponibles en el mercado.

A continuación, se encuentra el tercer capítulo, en el cual se explican los equipos que se van a utilizar y la metodología que se va a llevar a cabo para la toma de muestras y el posterior tratado de los datos.

El siguiente capítulo, el capítulo cuatro, contendrá los resultados obtenidos durante el proceso de toma de resultados con cada uno de los equipos utilizados.

Posteriormente, en el capítulo quinto se hará un diseño del sensor de conductividad eléctrica.

Por último, los capítulos seis y siete serán ocupados por las conclusiones y la bibliografía respectivamente.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. El suelo.

2.1.1. Características del suelo.

El suelo se encuentra en la capa exterior de la corteza terrestre y se define como un sistema que está en continuo cambio, pues se producen interacciones entre sus fases y con el medio constantemente. Por ello, existen múltiples tipos de suelo, y para distinguirlos podemos hacer uso de sus propiedades. Estas se clasifican en: físicas, químicas y biológicas. Las propiedades físicas son la textura y la estructura, que corresponden a la proporción de partículas minerales y a como se distribuyen en el suelo respectivamente. Estas partículas minerales se dividen en arenas (0.2 a 2mm de diámetro), limos (0.002 a 0.2 mm) y arcillas (menos de 0.002 mm).

Las propiedades químicas son el pH y la capacidad de intercambio catiónico. Un suelo agrícola tendrá valores óptimos de pH entre 6 y 7.5. Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico es la capacidad del suelo de retener carga iónica, es decir, retener las partículas químicas que necesita la planta para nutrirse, de manera que cuando el agua del suelo disminuye quedan adheridas a los coloides (partículas de suelo), y cuando se recupera el agua se vuelven a diluir esos nutrientes necesarios para la planta.

Por último, las propiedades biológicas del suelo están relacionadas con el impacto que tienen los organismos vivos del suelo. Estos organismos se refieren a plantas y animales que por su actividad dotan al suelo de materia orgánica. [1]

2.1.2. Fases del suelo.

Los suelos están compuestos por materia en distintos estados: sólido, líquido y gas. Las características del suelo vendrán determinadas por cada una de estas fases, que, además interactuarán entre ellas.

La parte sólida puede dividirse en elementos inorgánicos y orgánicos; los primeros son el resultado de la meteorización que han derivado en pequeños fragmentos de rocas. La parte sólida también está constituida por materia que proviene de desechos de seres vivos, esta compone su materia orgánica, gracias a la cual el suelo consigue retener más cantidad de agua, hacer más poroso el suelo, por la acumulación de partículas minerales, y por lo tanto aumenta la fertilidad de dicho suelo. Esta fase sólida es la más estable de las fases del suelo, pues la zona líquida y gaseosa se ven sometidas continuamente a cambios, por ello es la utilizada para la caracterización de los suelos. [2]

La fase gaseosa está compuesta por el aire que se encuentra en los poros más grandes del suelo, este aire lo conforman los mismos elementos que componen el aire atmosférico, pero las cantidades de oxígeno y dióxido de carbono se ven modificadas, pues debido a la actividad biológica del suelo el oxígeno es menor y el dióxido de carbono mayor, además este último elemento aumenta con la profundidad, la existencia de materia orgánica, la temperatura y la humedad. [3]

Por último, la fase líquida del suelo, que será la que estudiaremos en este trabajo y que se denomina solución de suelo, está formada por el agua que se encuentra en los poros del suelo, el tamaño de estos poros debe ser menor al de los poros en los que se encuentra el aire, ya que, si son demasiado grandes el agua no puede ser absorbida por las raíces porque

desliza por gravedad. La solución de suelo está en contacto con las raíces de las plantas y le suministra los nutrientes que necesitan, por ello es muy interesante el estudio de su composición, debido a que esta tiene relación directa con el estado de las plantas de dicho suelo. Por esto, la solución de suelo es un factor importante en el manejo de cultivos.

2.2. Conductividad eléctrica.

2.2.1. Definición de la conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica es un parámetro que evalúa la capacidad que tiene una sustancia de conducir la corriente eléctrica. Para que se produzca el desplazamiento de la electricidad por una sustancia es necesario que estén presentes partículas cargadas.

La ley de Ohm relaciona la diferencia de potencial (V) en un medio, medida en voltios, con la corriente (I) que atraviesa dicho medio, medida en amperios.

$$V = R \cdot I \quad (2.1)$$

Ambos parámetros están relacionados a través de la resistencia (R), cuya unidad es el ohmio. La resistencia es un valor constante que se puede determinar aplicando una tensión y midiendo la corriente producida. La inversa de la resistencia es definida como conductancia (G), medida en siemens.

Si queremos medir la resistencia de una muestra necesitaremos una celda de medición. Esta posee, como mínimo, dos polos de carga opuesta, también denominados electrodos. Esta celda, en conjunto con el cuerpo aislante que la mantiene unida, forman el sensor.

El resultado de la medida de la resistencia depende de la geometría de la celda de medición, que es evaluada con la constante de celda (K).

$$K = l/A \quad (2.2)$$

La constante K relaciona la distancia entre los electrodos (l) con el área de sección transversal efectiva del electrolito entre los electrodos (A).

Esta constante de celda puede ser utilizada para transformar la conductancia en la conductividad estandarizada (κ), siendo esta, independiente de la configuración de la celda de medición.

$$\kappa = G \cdot l/A = G \cdot K \quad (2.3)$$

2.2.2. Conductividad eléctrica en soluciones acuosas.

En concreto, la conductividad eléctrica en disoluciones acuosas está relacionada con la cantidad de sales disueltas. La disociación de esas sales deriva a la formación de iones positivos y negativos, que llamaremos electrolitos, los cuales consiguen transportar energía eléctrica cuando sometemos la disolución a un campo eléctrico. Por consiguiente, la conductividad será la medida de la concentración de iones y la actividad de una solución. De esta manera, una de las aplicaciones del uso de este parámetro será el estudio de disoluciones para determinar su contenido de sales. [4]

La actividad de los iones en aguas cuando aplicamos un campo eléctrico se reduce a diversos movimientos de estos, estos movimientos comprenden que los cationes se desplacen a potenciales más bajos y los aniones a potenciales más altos; de manera que

se crea una corriente eléctrica. Así, podemos justificar que los disolventes puros no son conductores, y su conductividad será de un valor próximo a cero. [5]

La unidad de la conductividad eléctrica en el Sistema Internacional es el Siemens por metro (S/m), aunque comúnmente se mide en Siemens por centímetro (S/cm).

Se muestra a continuación la conductividad eléctrica de ciertos tipos de agua. [6]

Tipo de agua	Conductividad eléctrica
Agua pura	0.055 $\mu\text{S/cm}$
Agua destilada	0.5 $\mu\text{S/cm}$
Agua de montaña	1.0 $\mu\text{S/cm}$
Agua para uso doméstico	500 a 800 $\mu\text{S/cm}$
Máximo para agua potable	10055 $\mu\text{S/cm}$
Agua de mar	52 ms/cm

Tabla 2-1: Conductividad eléctrica en distintas aguas.

2.2.3. Efectos de la temperatura en la conductividad eléctrica.

Una de las características más importantes de la conductividad eléctrica es que varía en gran medida con la temperatura. La causa de este fenómeno es debida a que cuando la temperatura aumenta, la viscosidad se ve reducida porque la unión de las moléculas se vuelve más débil, por lo que la movilidad de los iones será mayor, y la conductividad de la muestra será también mayor. Por lo tanto, debe expresarse cada medida de conductividad con una temperatura de referencia.

2.2.4. Principio de medición.

El principio de medición de la conductividad eléctrica se basa en aplicar un voltaje a un par de electrodos y medir la corriente resultante, con estos dos datos y con la constante de celda se podrá hallar la conductividad.

Si la corriente aplicada es continua (CC), los cationes se desplazarán al electrodo con carga negativa y los aniones al electrodo con carga positiva, de manera que se acumulan iones en la superficie de los electrodos, hecho que afectará a la conductividad eléctrica. Por ello, es conveniente que la corriente aplicada sea alterna (CA), con esto se consigue que los iones oscilen con el ritmo de la frecuencia. [7]

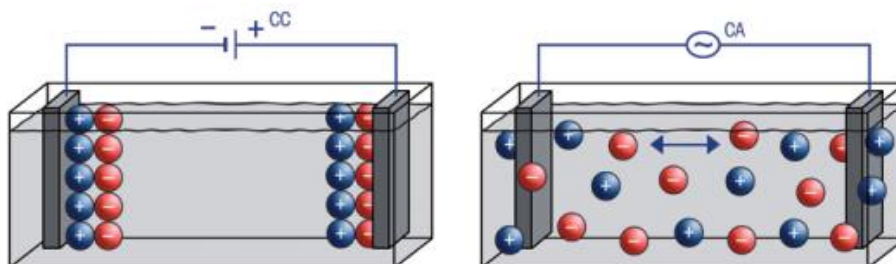


Figura 2-1: Distinta migración de iones al aplicar CC o CA a la celda de medición.

Fuente de procedencia: Guía para la medición de la conductividad. Teoría y práctica de la conductividad. METTLER TOLEDO (2016)

Además, otros problemas que intervienen a la hora de medir la conductividad en las muestras son la polarización, a causa de la formación de una doble capa que afecta a la movilidad de los electrones, y la capacitancia, debido a que las dos sondas en un medio no conductor actúan como un condensador.

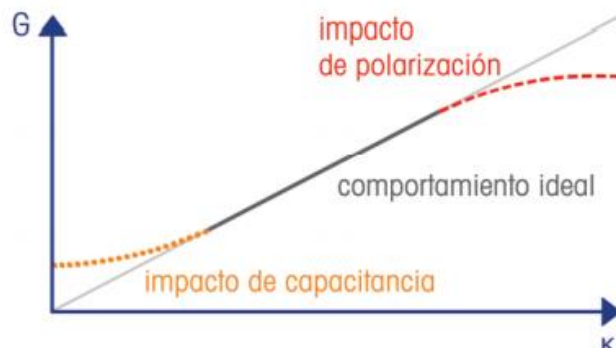


Figura 2-2: Impacto negativo de la polarización y la capacitancia en la lectura de conductividad.

Fuente de procedencia: Guía para la medición de la conductividad. Teoría y práctica de la conductividad. METTLER TOLEDO (2016)

La polarización puede prevenirse optimizando la frecuencia, cuando esta aumenta, los electrones se moverán más rápido de un lado a otro y tendrán menos tiempo para acumularse en los electrodos. También se consigue el mismo objetivo aumentando el área de la superficie del electrodo, puesto que la densidad de corriente disminuirá.

Por otro lado, la capacitancia puede reducirse teniendo en cuenta que su impacto disminuirá cuando disminuimos la frecuencia y con constante de celda altas, pero esta última no es una opción ya que necesitaremos que nuestra constante de celda sea baja cuando estemos midiendo conductividades bajas.

2.3. Calidad del agua en soluciones de suelo.

Anteriormente hemos deducido que la medida de la conductividad eléctrica es un parámetro válido para cuantificar la cantidad de sales disueltas en un agua. De este modo, podemos conocer la concentración de sales disueltas en la solución de suelo, esto es definido como la salinidad del suelo.

Estas sales son resultado de la transpiración de las plantas y de la agregación, por parte del hombre, de sales a las aguas de riego y fertilizantes. Las sales disueltas en la solución de suelo están compuestas por determinados iones. Los cationes presentes más importantes son: sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}) y potasio (K^+). Por otra parte, los aniones que podemos encontrar serán: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) y bicarbonato (HCO_3^-).

El incremento de la concentración de sales en la solución de suelo afecta negativamente al proceso de absorción de agua por parte de las plantas. De manera que cuando la concentración de sales es alta la planta necesitará más energía para absorber el agua. Otro de los efectos negativos de la alta cantidad de sales en el suelo es que iones como el sodio y el cloro pueden producir toxicidad en las plantas por la acumulación de estos en sus tejidos. [5]

En conclusión, es necesaria la evaluación de la salinidad del suelo porque las consecuencias que tiene este factor en los cultivos son de suma importancia.

2.4. Sensores.

2.4.1. Definición.

Un sensor es un dispositivo capaz de convertir una magnitud física en una señal eléctrica, ya sea analógica o digital. La señal eléctrica se debe acondicionar para adaptarla a las necesidades del equipo que debe leer la señal (capaces de captar información de un sistema).

En un proceso industrial, los sensores tomarán datos de una variable determinada que influya en dicho proceso, de esta manera visualizando los datos podemos encontrar posibles errores en el transcurso del proceso. Otra función de los sensores es tomar información para poner en funcionamiento actuadores con la finalidad de automatizar un procedimiento.

Si clasificamos los sensores según el tipo de variable física medida podemos distinguir entre sensores mecánicos, eléctricos, magnéticos, térmicos, acústicos y otros tipos.

2.4.2. Sensor de conductividad eléctrica.

Para medir la conductividad eléctrica del agua se puede hacer uso de diferentes métodos, algunos de ellos son: métodos basados en resistencia, en inducción electromagnética y en reflectometría.

A. Sensores basados en resistividad eléctrica.

Este tipo de sensores tienen como principio fundamental la ley de Ohm, de esta manera se calcula la resistencia como:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.4)$$

En la relación anterior I es la corriente, que suministra una fuente de alimentación, entre dos electrodos metálicos, y ΔV es la diferencia de potencial medida por un voltímetro. Siendo k la constante de celda de la sonda, definida como la longitud de dicha sonda partido del área transversal, se obtiene la conductividad eléctrica (σ) con la siguiente fórmula. [5]

$$\sigma = k \cdot \frac{I}{\Delta V} \quad (2.5)$$

B. Sensores basados en inducción electromagnética.

Estos sensores están formados por una bobina de transmisión y una o más bobinas de recepción. La bobina de transmisión está conectada a un oscilador que trabaja a bajas frecuencias (1-100 kHz), y esta genera un campo magnético primario, que induce un campo eléctrico en el suelo que, a su vez, produce muchas corrientes parásitas alternas en su interior. El fenómeno de inducción electromagnética produce que las corrientes alternas creen un campo magnético secundario, que sumado al campo magnético primario inducen una corriente en las bobinas receptoras.

C. Sensores basados en reflectometría.

Para este método se utilizan electrodos, los cuales producirán corrientes eléctricas alternas que originarán respuestas por parte del medio, que serán diferentes dependiendo de sus propiedades dieléctricas. Además, se generarán otras señales alternas secundarias, que serán analizadas en base a su velocidad, amplitud o frecuencia. Según el parámetro escogido se usará un método específico de reflectometría.

2.4.3. Sensores comerciales de conductividad eléctrica.

A continuación, se nombrarán algunos sensores disponibles en el mercado actualmente y se explicará su modo de funcionamiento.

Sensor Inpro7100 de 4 electrodos



Figura 2-3: Sensor resistivo.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en:
<https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/electrode/probe-InPro-7100.html#documents>

Su modo de funcionamiento está basado en el método resistivo. Es un sensor adecuado para aplicaciones en las industrias química, alimentaria y de pulpa y papel. Sus especificaciones se muestran en la tabla siguiente. [8]

Presión máx. (bar)	0... 20 bares a 135 °C 0... 10 bares a 150 °C
Presión máx. (psi)	0... 290 psi a 275 °F 0... 145 psi a 302 °F
Rango de temperaturas	-20... 150 °C (-4... 302 °F)
Precisión de la temperatura	± 0.1°C (± 0.18°F)
Material del electrodo	acero inox. 316L (1,4435) o Hastelloy C-22 (según especificación), PEEK
Conexión/adaptación al proceso	rosca Pg 13,5
Esterilizabilidad	150 °C máx. (302 °F máx.)
Longitudes disponibles	120mm
ATEX Certification	II 1/2 G Ex Ia IIB
Grado de protección (conector VP)	IP68(NEMA 4X)
Diseño	316L (electrodos)
Segmento/Aplicación	Procesos químicos, farmacéuticos y alimentación y bebidas
Rango de medición	0,02-500 mS/cm

Figura 2-4: Especificaciones sensor Inpro7100 de 4 electrodos.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en: <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/electrode/probe-InPro-7100.html#documents>

Sensor InPro7250ST PEEK



Figura 2-5: Sensor inductivo.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en: <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/conductivity-meter-inductive/probe-InPro-7250-ST.html>

El modo de funcionamiento de este sensor es el inductivo. Su campo de aplicación principal es la industria química. Sus especificaciones se muestran en la tabla siguiente. [9]

DISEÑO EN SENSORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA MEDIDA
DE CALIDAD DEL AGUA EN SOLUCIONES DE SUELO

Rango de medición	0-2000 mS/cm
Presión máx. (bar)	8 bar
Presión máx. (psi)	116 psi
Unidades medidas	0...2000 mS/cm
Juntas tóricas, aislamiento	Viton®
Material de sensor	PEEK, glass-fiber reinforced (GF30)
Precisión	± (0.5 % del valor medido + 25 µS)
Rango de temperaturas	-20 a 100 °C (-4 a 212 °F)
Sensor temperatura	Pt1000
Factor de célula	2.175
Aplicaciones	Efluentes industriales y químicos
Material Number	52 002 736 (3m cable length)

Figura 2-6: Especificaciones sensor InPro7250ST PEEK.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en:
<https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/conductivity-meter-inductive/probe-InPro-7250-ST.html>

3. EQUIPO Y METODOLOGÍA.

3.1. Equipos.

Los equipos utilizados serán un conductivímetro, un potencióstato, un generador de señal y un osciloscopio.

El método en el que nos vamos a basar para el diseño del sensor será el método resistivo, descrito anteriormente. Para ello necesitaremos un equipo capaz de controlar la diferencia de voltaje y que pueda medir la corriente que atraviesa una serie de soluciones. El equipo escogido será un potencióstato. Además, para que no se produzcan efectos de polarización, el voltaje aplicado tendrá que ser alterno. Por esto, necesitaremos un generador de señal que nos suministre esta tensión al potencióstato, y de un osciloscopio que conectado al potencióstato sea capaz de interpretar las señales de voltaje y corriente que circulan por la muestra. De esta manera, podremos calcular la resistencia que opone la muestra al paso de corriente.

El conductivímetro nos ofrece el valor de referencia de la conductividad eléctrica para cada muestra, este valor será tomado como valor real, y servirá para realizar la correlación con la concentración de sal de la solución, y con la resistencia que opone al paso de corriente.

3.1.1. Conductivímetro.

El conductímetro nos proporcionará las medidas de conductividad eléctrica que tomaremos como referencia en cada ensayo. Está compuesto por un medidor (Seven2Go S3) y un sensor (InLab 731-ISM).



Figura 3-1: Medidor de conductividad portátil Seven2GO S3.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en:
https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/portable-pH-meter/seven2go/S3-Meter.html



Figura 3-2: Sensor InLab 731-ISM.

Fuente de procedencia: *METTLER TOLEDO*. [en línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/sensor/conductivity-sensor/InLab-731-ISM.html

El sensor InLab 731-ISM tiene una configuración de 4 polos de grafito y un eje epoxi, la constante de celda es 0.57 cm^{-1} y su rango de medición comprende de 0.01 a 1000 mS/cm. La configuración de 4 polos se distribuye en dos polos exteriores y dos polos interiores. Los polos que se encuentran en la parte externa son los polos de corriente a los que se aplica la corriente alterna. Estos polos crean un campo eléctrico, dentro del cual se encuentran los polos interiores. El objetivo de los polos interiores es medir la tensión. De esta manera, es posible obtener la resistencia que opone la solución, y conociendo la constante de celda se podrá encontrar también la conductividad.

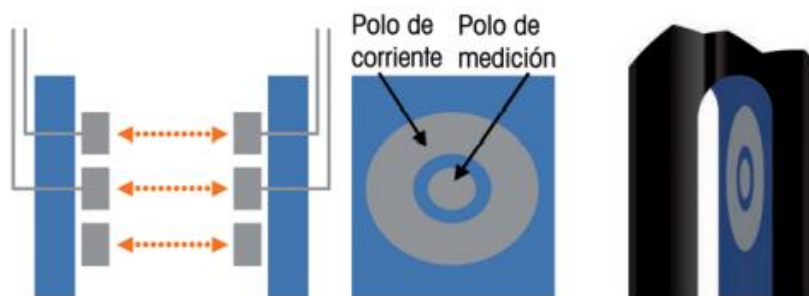


Figura 3-3: Esquemas de una celda de conductividad de 4 polos.

Fuente de procedencia: Guía para la medición de la conductividad. Teoría y práctica de la conductividad. METTLER TOLEDO (2016)

Usar un sensor de 4 polos tiene ciertas ventajas respecto al uso de sensores de 2 polos, una de ellas es que se reducen los efectos de polarización. Además, el rango de conductividades que es capaz de medir es mayor.

3.1.2. Potenciostato.

El potenciostato que se va a utilizar es el modelo PS-305, diseñado con el objetivo de controlar una diferencia de potencial entre dos terminales de salida, WE y REF, el electrodo de trabajo y el de referencia respectivamente, estos dos electrodos están contenidos en una celda electroquímica. El potenciostato consigue el control del voltaje introduciendo una corriente mediante el CE, o electrodo contador. En nuestro caso, la variable controlada será el voltaje, y la variable medida la corriente, de esta manera conseguimos hallar la resistencia que presenta una determinada muestra de solución salina.

A su vez el potenciostato necesitará ser alimentado por un generador de onda, con el que podremos ajustar la frecuencia y la amplitud aplicada en los electrodos. Por otra parte, los conectores de salida E-OUT y I-OUT, deberán derivar en un osciloscopio, pudiéndose así observar y medir las ondas de tensión y corriente que circulan entre los electrodos.

Debido a que este modelo de potencióstato es algo antiguo, no disponemos de su manual, pero sí del modelo PS-605, que prácticamente tiene el mismo funcionamiento. Las especificaciones de este último se encuentran en la siguiente tabla.

Medidas de corriente	Máxima corriente	0.3 A
	Rangos	1 nA a 100 mA
	Máxima resolución	0.1 pA
	Señal de sobrecarga	ca. 3 veces el rango de corriente nominal
Control del voltaje	Rango	-10 V a 10 V
	Precisión del voltaje aplicado	0.01 % de lectura + 0.03 % de toda la escala
	Fuentes de voltaje del programa	A: -2 V a +2 V (interna) B: -5 V a +5 V (interna) C: -10 V a +10 V (externa)
	Impedancia potencial de entrada del programa	10 ⁶ ohm
	Rango de lectura del panel frontal	-1999 mV a +1999 mV, -10 V a 10 V
	Resolución del medidor del panel	1 mV
	Resolución del control del voltaje	0.05 mV
	Precisión del medidor del panel	0.01 % de lectura + 0.03 % de escala +1 dígito
	Señal de sobrecarga	-10.3 V a 10.3 V (aprox.)
Contador de salida	Voltaje	1 V por Voltio Convención de signos del voltaje: potenciales más positivos para corrientes más anódicas Resolución: 0.1% de lectura +0.15 % de toda la escala Rango de salida: -10 V a 10 V Resistencia de carga: >500 ohm
	Corriente	1 V por rango nominal Convención de signos: corrientes anódicas positivas (IUPAC Stockholm Convention)

		Resolución: 0.01% de lectura +0.03 % de toda la escala
		Rango de salida: ±3 V (±300 % rango nominal)
		Linealidad extendida: ±10 V
		Resistencia de carga: > 100 ohm
Características eléctricas	Impedancia de entrada	10^{13} ohm
	Impedancia de salida	< 0.2 ohm
	Voltaje de contención	< 10 μ V
	Velocidad de subida	30 V/ μ
	Tiempo de subida	600 ns
	Voltaje de cumplimiento	± 15 V
Parámetros de operación	Fuente de alimentación	110/220 V
	Dimensiones	6.5 x 17 x 16.5, pulgadas (alto x ancho x largo) Jaula de Faraday: 16 x 12 x 10, pulgadas (alto x ancho x largo)

Tabla 3-1: Especificaciones del potenciostato modelo PS-605.



Figura 3-4: Panel frontal del potenciostato modelo PS-305.



Figura 3-5: Panel posterior del potenciostato modelo PS-305.

El potencióstato tiene dos modos, PS y GS, con el primero se consigue controlar el potencial y con el segundo la corriente, nosotros usaremos el primer modo. El interruptor “CELL” controla dos posiciones, una de ellas (OFF) activa una celda ficticia (DUMMY CELL) esta celda la constituye un circuito formado por una resistencia de 1 kohm situada entre WE y CE. La posición ON activa la función externa en la que los tres conectores WE, CE y REF se conectan a circuitos internos para permitir un control total de potencial o corriente dependiendo del modo que estemos utilizando PS o GS. Por otra parte, el interruptor “CONTROL” interviene en que el CE esté (ON) o no (OFF) conectado a la salida del amplificador de potencia.

En el panel de control se pueden seleccionar cuatro posiciones, dependiendo de cuál se elija el medidor de potencial medirá una fuente de voltaje u otra. Existen cuatro posiciones: E, A, B y C. La posición E mide el potencial del electrodo de trabajo, y el resto de las posiciones miden únicamente la fuente que estemos seleccionando. Las fuentes A y B corresponden a dos fuentes de voltaje continuo internas de diferentes rangos, A comprende un rango de -2 V a +2 V y B de -5 V a +5 V; para que estén en funcionamiento se debe poner el interruptor A/B en la fuente de la que queramos hacer uso, y además activar el interruptor que tienen debajo de su ruleta. Por último, la fuente C corresponde con una fuente externa, esta fuente proviene de un generador de señal.

La medida de voltaje que se muestra en el potencióstato puede mostrarse en mV o en V, dependiendo de en qué posición esté el interruptor mV/V. Para seleccionar el rango de corriente se dispone de una ruleta que nos permite seleccionar uno de los nueve rangos disponibles que comprenden de 100 mA a 1 nA, el rango seleccionado se indica mediante un diodo de iluminación.

La ruleta SPEED/FAST tiene cinco posiciones con las que se selecciona la compensación de frecuencia adecuada para la celda electroquímica dada. De forma general, las posiciones de 1 a 3 deberían de funcionar mejor, por ello es recomendable usar estas posiciones a no ser que se encuentre una mejor estabilidad y menor ruido en otras posiciones.

Además, hay dos ruletas de filtros correspondientes al selector de filtro de entrada y al de salida. Ambos tienen seis posiciones, para el primer filtro se corresponden a distintas constantes de tiempo de un filtro de entrada instalado en el amplificador de entrada del programa, y para el segundo filtro se corresponden a distintas constantes de tiempo de un filtro de salida instalado en el amplificador de corriente.

Por último, el interruptor IR comp. sirve para establecer una resistencia para la compensación de caída de potencial óhmico.

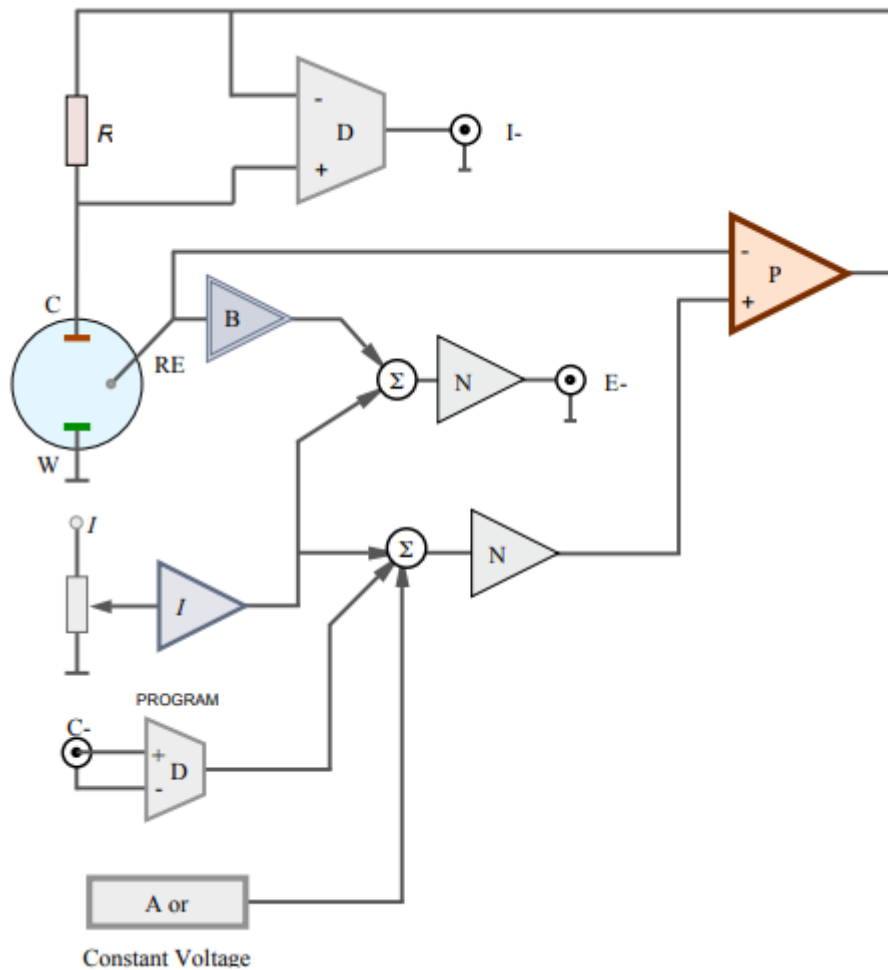


Figura 3-6: Diagrama simplificado de los circuitos eléctricos del potenciostato modelo PS-605. PS- amplificador de control principal, WE- electrodo de trabajo, CE-electrodo contador, REF- electrodo de referencia, PROGRAM- amplificador de forma de onda del programa, B- buffer de alta impedancia, IR- compensación de caída de potencial óhmico, Σ -punto de suma, N- amplificador inversor, D- amplificador diferencial.

Fuente de procedencia: Technical Manual Potentiostat Model PS-605.

Las sondas que usaremos para medir las resistencias de las muestras deberán ser de un material adecuado y deberán tener una geometría conocida.

3.1.2.1. Material de la sonda.

Para seleccionar el material del que estarán hechas las sondas debemos tener en cuenta los siguientes aspectos:

- No deben existir reacciones químicas entre el material del sensor y la muestra, ya que produciría errores en las medidas.
- El material debe tener cierta resistencia mecánica, para que la celda no se destruya.
- Debe tenerse en cuenta la resistencia a la polarización, esta estará determinada por la superficie del electrodo. Cuando la superficie es porosa o áspera el efecto de polarización se ve reducido porque la resistencia de contacto es menor.
- Algunos materiales como el grafito tienen capas porosas que pueden absorber partes de la muestra, esto produce un efecto de transferencia y un tiempo de

respuesta mayor al medir soluciones con concentraciones distintas. El efecto de transferencia es contrario a la resistencia a la polarización.

Los materiales que normalmente se usan para los electrodos son el platino, el platino platinizado, el grafito, el acero inoxidable y el titanio. Para el eje se suele usar el epoxi y el vidrio. Para fabricar electrodos y ejes de una sola pieza es común el uso del acero y el titanio.

3.1.2.2. Geometría de la sonda.

La geometría de la sonda que vamos a utilizar tendrá como constante de celda un valor aproximado de 1 cm^{-1} , puesto que es un valor usado en agricultura. Además, las muestras que vamos a utilizar están dentro del rango óptimo de medidas para esta constante.

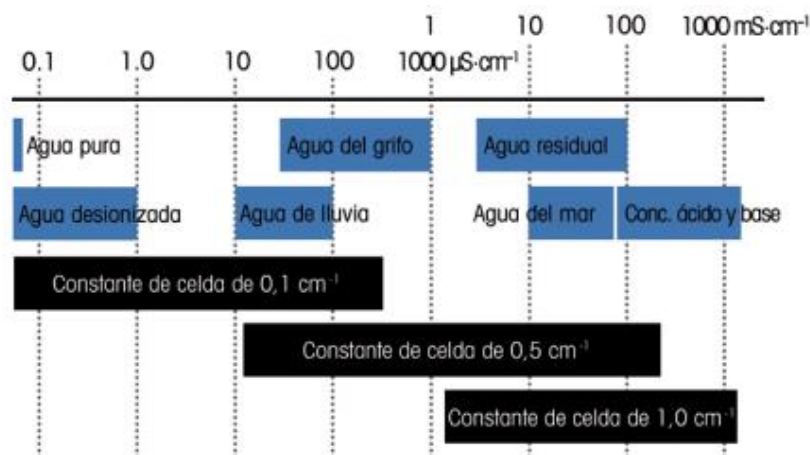


Figura 3-7: Constantes de celda recomendadas.

Fuente de procedencia: Guía para la medición de la conductividad. Teoría y práctica de la conductividad. METTLER TOLEDO (2016)

Siendo K la constante de celda, l la distancia media entre electrodos y A el área de sección transversal efectiva del electrolito entre los electrodos. Se cumple la siguiente relación.

$$K = \frac{l}{A} = 1 \text{ cm}^{-1} \quad (3.1)$$

En el caso real, la constante de celda no queda determinada exclusivamente por los valores de separación entre sondas y superficie de estas, puesto que la superficie de los electrodos no es perfectamente lisa, por lo que no todas las líneas de campo eléctrico son exactamente perpendiculares a la superficie.

3.1.3. Generador de señal.

El generador de señal es un dispositivo que proporciona señales eléctricas, permitiendo modificar su amplitud y frecuencia. También, permite seleccionar la forma de la onda (cuadrada, triangular o senoidal). En nuestro caso, seleccionaremos la forma de onda senoidal.

El generador de señal alimentará al potenciostato, conectándose a él a través de su entrada C. Por ello debemos elegir una frecuencia que no nos produzca ruido ni atenuaciones de corriente, y una tensión que no supere la tensión umbral del potenciostato.

3.1.4. Osciloscopio.

El osciloscopio es un instrumento que nos muestra las señales de corriente y tensión. En su pantalla pueden observarse las ondas de tensión e intensidad en función del tiempo. Además, mide la frecuencia de estas ondas, y sus valores eficaces y máximos.

La función que tendrá en nuestra experimentación será la de proveernos de los valores eficaces de tensión e intensidad que circulan por nuestra muestra, para obtener, con la ley de Ohm, su resistencia. Las salidas I-OUT y E-OUT del potenciómetro irán conectadas a los canales 1 y 2 del osciloscopio para obtener la medición.

3.2. Metodología.

3.2.1. Preparación de las muestras.

Con el fin de obtener la correlación entre la conductividad eléctrica y la concentración de sal de una solución se prepararán diferentes disoluciones salinas de las que mediremos posteriormente su conductividad eléctrica y resistencia. Las muestras están compuestas por agua destilada y sal común.

Para la preparación de las disoluciones salinas tomaremos las siguientes aproximaciones:

- Emplearemos sal común ya que la sal de granulometría mayor suele estar húmeda y por lo tanto 10 gramos de esa sal no son 10 gramos de cloruro sódico, sino algo menos.
- Supondremos que la sal común está compuesta exclusivamente por cloruro sódico, si bien contiene otras sales en pequeñas cantidades.

El método que se ha de seguir para la preparación de cada muestra es el siguiente:

1. Se coloca en la balanza el vaso en el que se deseen preparar las disoluciones y que debe estar graduado.
2. Una vez que se estabilice el peso, se tara la balanza para que quede a cero la indicación del peso.
3. Con una cucharilla se añade la cantidad de sal marcada en la tabla en cada caso. Por ejemplo, para la primera disolución, 2.5 g. La precisión de la balanza hará que el peso real de sal se encuentre entre 2.45 g y 2.54 g, lo que supone una incertidumbre de 0.1 g que se traduciría en una disolución que estaría entre el 0.45 y 0.54% de sal.
4. Se añade agua destilada hasta alcanzar la marca de 500 mL en la graduación del vaso empleado.
5. Se agita con otra cucharilla (la que se emplea para las pesadas debe estar siempre seca para facilitar la adición de las cantidades de sal) hasta observar la desaparición de los granos de sal.
6. Se trasvasa la disolución a otra botella y se reserva para poder realizar la medida.
7. Se lava el vaso batidor con agua destilada y se repite la operación para otra disolución.

Realizaremos varias muestras que poseerán diferentes niveles de concentración de sal, para ello en cada caso añadiremos una cantidad de sal diferente, las cantidades que usaremos se muestran en la tabla siguiente.

Concentración de sal (%)	Masa de sal (g)
0.5	2.5
1	5
1.5	7.5
2	10
2.5	12.5
3	15
3.5	17.5
4	20
4.5	22.5
5	25

Tabla 3-2: Cantidades de sal usadas para realizar las muestras.

Una concentración de sal de 0.5% equivale a una cantidad de sal en agua de 5 g/L.

3.2.2. Obtención de medidas.

3.2.2.1. Obtención conductividades eléctricas con el conductivímetro.

Para la toma de medidas de conductividad eléctrica usaremos el conductivímetro, cuyo funcionamiento viene explicado en el apartado 3.1.1.

El procedimiento de la obtención de medidas comienza calibrando el conductivímetro, esta calibración ha sido realizada para todas las medidas con dos muestras de referencia de 12.88 mS/cm y 1413 μ S/cm, a 25°C ambas. Tras este paso la sonda debe ser limpiada con agua destilada y secada con un papel, este proceso ha de repetirse siempre entre medidas de dos muestras diferentes. Seguidamente introducimos la sonda en la disolución que queramos analizar y tras unos segundos el medidor nos mostrará los datos correspondientes a la conductividad eléctrica y a la temperatura de la muestra, que deberemos anotar.

Puesto que la conductividad eléctrica es muy sensible con la temperatura tomaremos los datos de una misma muestra a diferentes temperaturas. Tomaremos siete datos de cada muestra para una misma temperatura.

Tras la toma de datos se hará uso del criterio de rechazo de Chauvenet, con el que conseguiremos filtrar los valores obtenidos para eliminar aquellos que no sean correctos a causa de errores cometidos en la medida. Este método consiste en no tomar como válidas las medidas que no cumplan la siguiente expresión:

$$\bar{x} - k(n)s \leq x_i \leq \bar{x} + k(n)s \quad (3.2)$$

Siendo \bar{x} la media de las medidas tomadas, s su desviación típica y n el número de reiteraciones de la medida. Las expresiones para calcular \bar{x} y s son las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (3.3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

Por otra parte, k es el factor de incertidumbre y dependiendo de n corresponde a los valores que se muestran en la tabla 3-3.

n	k(n)
2	1.15
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.8
8	1.86
9	1.92
10	1.96

Tabla 3-3: Valores que recibe el factor de incertidumbre dependiendo del número de ensayos n.

Además, habrá que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Deberá aplicarse el método hasta que ninguna medida sea rechazada.
- Para casos en los que el número de repeticiones de la medida es menor o igual a 10 sólo se acepta un rechazo, si el número de repeticiones está entre 10 y 20 los rechazos aceptados ascienden a dos.
- En cada iteración de aplicación del método sólo puede eliminarse un dato.

Una vez hecho el rechazo de datos erróneos, pasaremos a la obtención de la relación entre la salinidad y la conductividad eléctrica. Para ello usaremos el programa Rcommander, este programa calcula una recta a partir de los datos con el método de los mínimos cuadrados. Como resultado, obtendremos múltiples regresiones lineales correspondientes a cada una de las temperaturas.

3.2.2.2. Obtención de las conductividades con el potencióstato.

El osciloscopio conectado al potencióstato nos muestra los valores de tensiones e intensidades que existen entre los electrodos, a partir de los cuales obtendremos el valor de la resistencia que opone la muestra a dicho campo eléctrico, con la ley de Ohm.

$$V = I \cdot R \quad (3.5)$$

Con el conductímetro obtenemos los valores de conductividad eléctrica, de esta manera podremos relacionar la conductividad eléctrica con las resistencias obtenidas. Estas rectas son calculadas de la misma manera que las anteriores.

3.2.2.3. Ajuste de una recta por mínimos cuadrados.

Para obtener una determinada recta que se ajuste de manera fiable a un conjunto de datos puede usarse el método de mínimos cuadrados. Este método nos proporciona la recta de regresión lineal que minimiza los residuos, que son la diferencia entre el valor del dato obtenido y el valor que obtenemos con la recta.

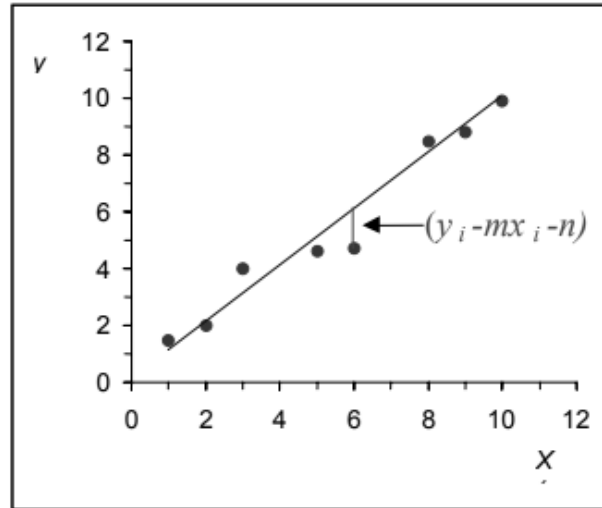


Figura 3-8: Representación del error.

Fuente de procedencia: *Universidad de Valencia*. [en línea] Disponible en: https://www.uv.es/zuniga/08_Ajuste_de_una_recta_por_minimos_cuadrados.pdf

La recta que obtenemos tiene la siguiente forma:

$$y = m \cdot x + n \quad (3.6)$$

Definimos la suma total de cuadrados a continuación. Siendo N el número de pares de medidas (x_i, y_i) .

$$\chi^2(n, m) = \sum_{i=1}^N (y_i - m \cdot x_i - n)^2 \quad (3.7)$$

El objetivo de este método es encontrar los valores de m y n que hacen mínima la suma total de cuadrados. Entonces:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial m} = 0 \rightarrow 0 = \sum_{i=1}^N -2(y_i - m \cdot x_i - n)x_i = -2 \sum_{i=1}^N (y_i x_i - m \cdot x_i^2 - n \cdot x_i) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial n} = 0 \rightarrow 0 = \sum_{i=1}^N -2(y_i - m \cdot x_i - n) \quad (3.9)$$

Definiendo:

$$S_x = \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.10)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.11)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (3.12)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i \quad (3.13)$$

Los valores m y n quedan como:

$$m = \frac{N \cdot S_{xy} - S_x \cdot S_y}{N \cdot S_{xx} - S_x \cdot S_x} \quad (3.14)$$

$$n = \frac{S_{xx} \cdot S_y - S_x \cdot S_{xy}}{N \cdot S_{xx} - S_x \cdot S_x} \quad (3.15)$$

Si suponemos que los errores en y son todos iguales, estimando a partir de la varianza de los datos:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - m \cdot x_i - n)^2 = \frac{\chi^2(n, m)}{N-2} \quad (3.16)$$

Aplicando propagación de errores y operando obtenemos las desviaciones que se obtienen para m y para n.

$$\sigma_m^2 = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial m}{\partial y_j} \sigma_y \right)^2 = \frac{N}{N \cdot S_{xx} - S_x S_x} \frac{\chi^2(n, m)}{N-2} \quad (3.17)$$

$$\sigma_n^2 = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial n}{\partial y_j} \sigma_y \right)^2 = \frac{S_{xx}}{N \cdot S_{xx} - S_x S_x} \frac{\chi^2(n, m)}{N-2} \quad (3.18)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

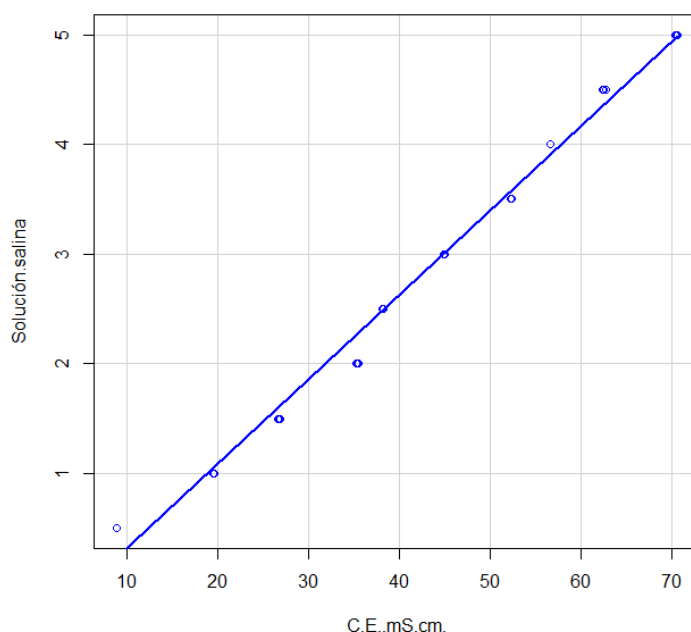
4.1. Obtención de las relaciones de conductividad eléctrica y porcentaje de sal en la solución.

A continuación, se muestran, para cada intervalo de temperatura, su relación entre conductividad eléctrica y porcentaje de sal en la solución, su coeficiente de determinación y la representación de los datos, haciendo una comparativa con el ajuste lineal.

Intervalo de temperatura: $20.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4495 + 0.077 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.1)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9902, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

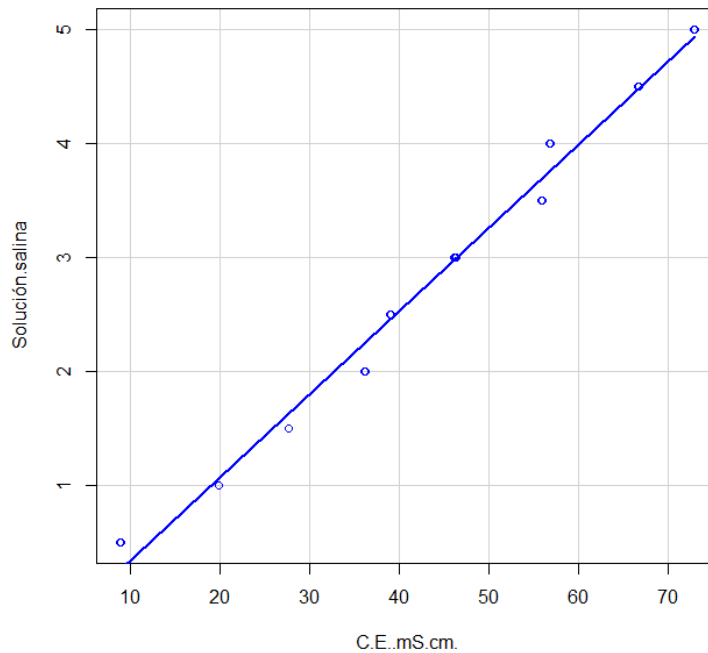


Gráfica 4-1: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $20.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $21.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.3883 + 0.0729 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.2)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9878, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

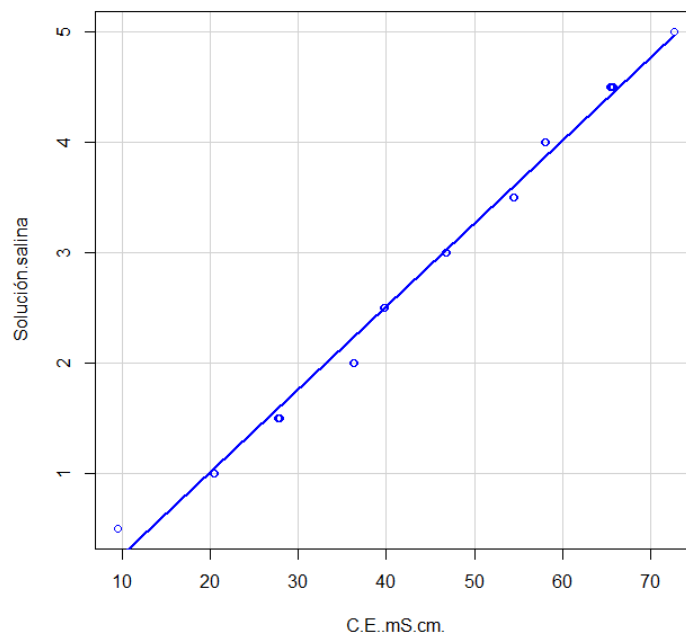


Gráfica 4-2: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $21.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $22 \pm 0.2^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4785 + 0.0748 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.3)$$

El valor de R^2 para esta regresión es 0.9917, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

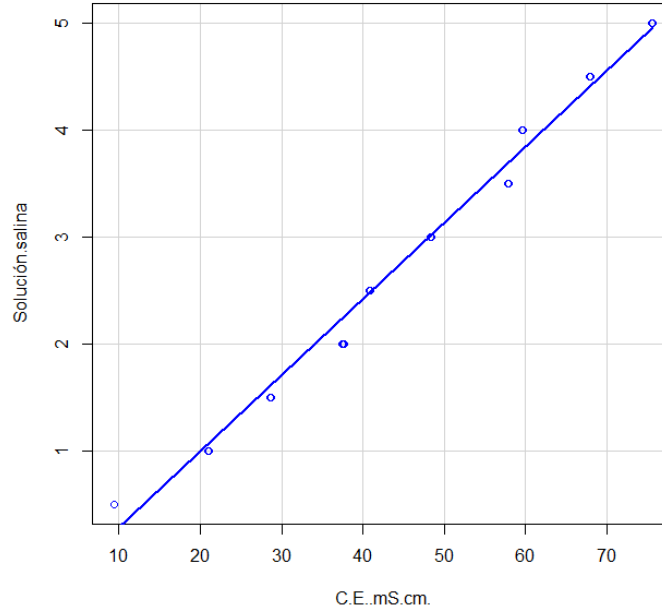


Gráfica 4-3: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $22 \pm 0.2^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $23.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4273 + 0.0711 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.4)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9891, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

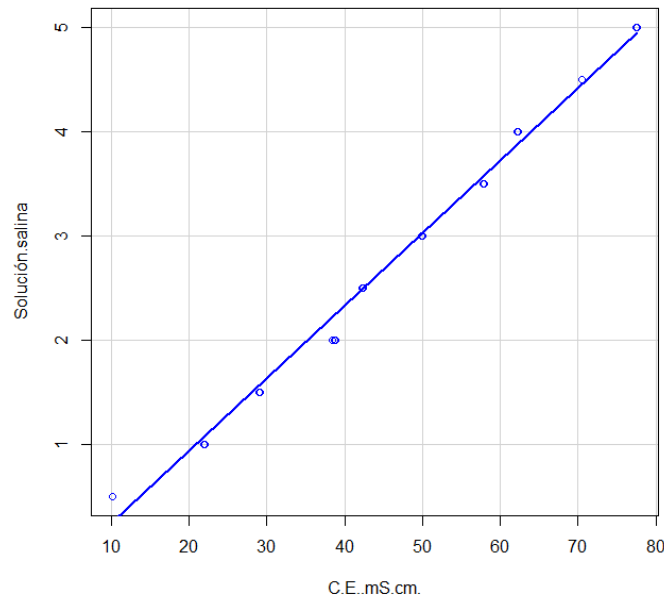


Gráfica 4-4: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $23.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $24 \pm 0.4^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4501 + 0.0695 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.5)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9923, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

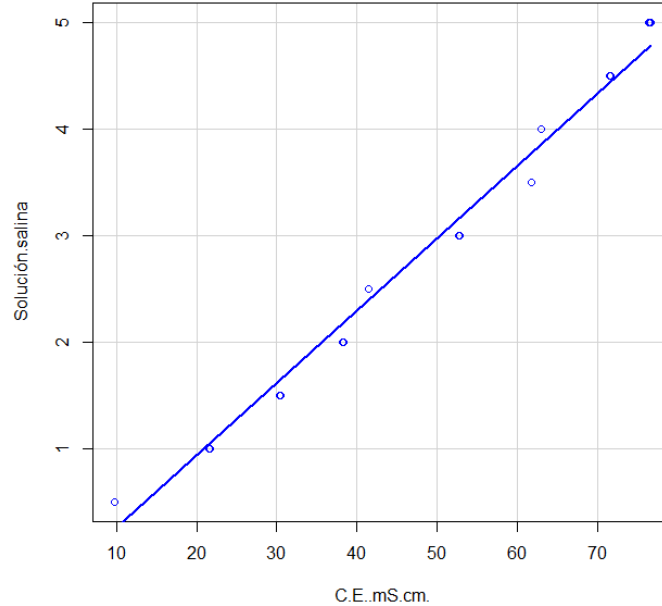


Gráfica 4-5: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $24 \pm 0.4^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $25.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4485 + 0.0679 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.6)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9849, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

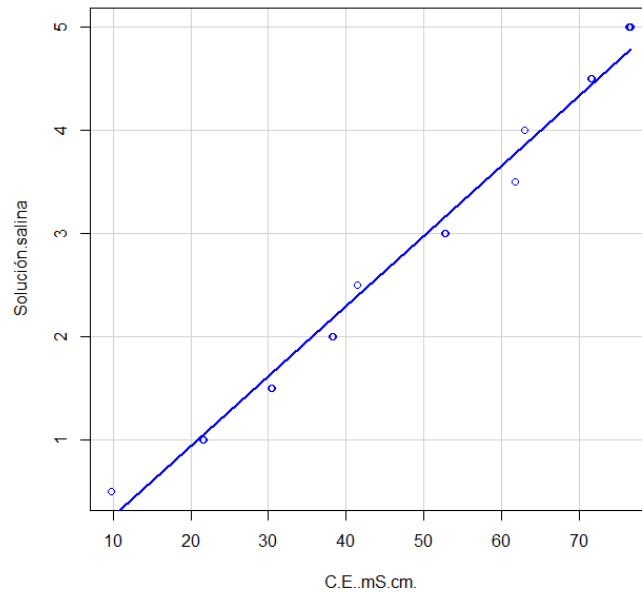


Gráfica 4-6: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $25.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $26.05 \pm 0.35^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4505 + 0.0664 \cdot \text{C. E. (mS/cm)} \quad (4.7)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9866, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.

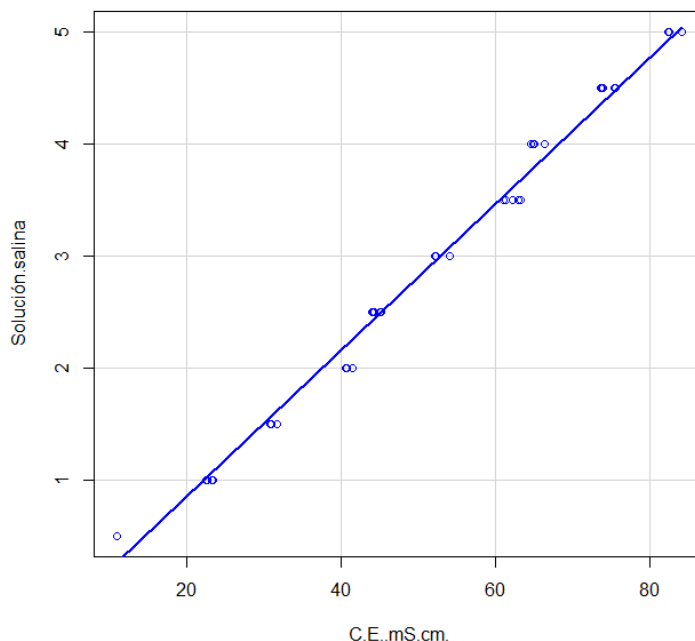


Gráfica 4-7: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $26.05 \pm 0.35^\circ\text{C}$.

Intervalo de temperatura: $27.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$

$$\text{Solución salina (\%)} = -0.4445 + 0.0652 \cdot \text{C.E. (mS/cm)} \quad (4.8)$$

El valor de \mathcal{R}^2 para esta regresión es 0.9912, que confirma una buena regresión lineal entre ambas variables.



Gráfica 4-8: Conductividad eléctrica frente a porcentaje de sal en la solución para una temperatura de $27.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Relación lineal
$20.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4495 + 0.0770 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$21.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.3883 + 0.0729 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$22 \pm 0.2^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4785 + 0.0748 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$23.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4273 + 0.0711 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$24 \pm 0.4^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4501 + 0.0695 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$25.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4485 + 0.0679 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$26.05 \pm 0.35^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4505 + 0.0664 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *
$27.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$	Solución salina (%) = $-0.4445 + 0.0652 \cdot \text{C.E. (mS/cm)}$ *

Tabla 4-1: Resultados de las relaciones lineales de conductividad frente a porcentaje de sal en solución para distintas temperaturas.

Podemos observar que para todos los intervalos de temperatura se cumple que el porcentaje de solución salina y la conductividad eléctrica están fuertemente relacionados linealmente.

Para poder programar el sensor que nos facilite el porcentaje de solución salina a partir de un valor de conductividad eléctrica y de temperatura, procedemos a obtener una única relación entre las variables temperatura, concentración salina y conductividad eléctrica. Esta regresión será calculada con los datos obtenidos de conductividades eléctricas para distintas temperaturas nombrados en este apartado. La relación entre las variables se muestra a continuación.

$$\text{Solución salina} = -0.4182 + 0.1092 \cdot \text{C.E.} - 0.0008 \cdot T^a - 0.0016 \cdot \text{C.E.} \cdot T^a \quad (4.9)$$

La solución salina viene dada en %, la conductividad eléctrica (C.E.) en mS/cm y la temperatura (T^a) en °C. El valor de R^2 para esta regresión es 0.9888, que confirma que se ha realizado un buen ajuste. Por otra parte, el valor de porcentaje de solución salina que obtenemos con la relación anterior puede llegar a poseer un error de 0.1552.

4.2. Obtención de los resultados del potencióstato.

Esta fase de la experimentación tiene como objetivo encontrar la relación entre la conductividad eléctrica, medida con el conductímetro, y la resistencia que opone una solución, para lo que se usará el potencióstato. Comenzamos seleccionando el material del que estarán formadas las sondas. Las sondas utilizadas son las que se describen a continuación.

En primer lugar, seleccionamos unas sondas de acero. Si observamos en la imagen 4-1 las puntas están ennegrecidas, esto ocurrió a causa de aplicar un voltaje continuo, en vez de alterno, de esta manera se han polarizado las puntas de manera irreversible.



Figura 4-1: Electroodos de acero.

En segundo lugar, utilizamos unas sondas de cobre. Como puede observarse en la imagen 4-2 el material de las sondas ha reaccionado con la muestra en la que han sido introducidas, de esta manera las medidas tomadas nos conducen a error y no son fiables.



Figura 4-2: Electroodos de cobre.

Finalmente, y tras realizar varios ensayos sin observar ningún tipo de reacción entre el material y las muestras, seleccionamos las sondas de aluminio, mostradas en la siguiente imagen. Además, realizamos varios ensayos para diferentes valores de frecuencia. Pues necesitaremos seleccionar una frecuencia óptima que no nos produzca un impacto de capacitancia ni de polarización. Tras varios ensayos realizados con la geometría 1 que se explicará más adelante, se comprueba que existe un rango de frecuencias para los que la resistencia obtenida se mantiene constante, fuera de este rango de frecuencias se produce una atenuación de la corriente. Finalmente se selecciona una frecuencia de 173 hercios, dentro de este rango, para todos los ensayos que realizaremos.



Figura 4-3: Electrodo de aluminio.

Para comparar los distintos resultados de resistencias dependiendo de la constante de celda, realizaremos varios ensayos modificando la geometría de las celdas. Esto lo conseguiremos utilizando un soporte para fijar la distancia entre sondas, y cubriremos las sondas con un material retráctil para controlar el área efectiva de la sonda, según muestra la siguiente figura.



Figura 4-4: Configuración sondas.

A continuación, se muestran las geometrías utilizadas y los resultados obtenidos para cada una de ellas, mostrando también una representación de estos resultados.

Geometría 1

La primera geometría está formada por un par de sondas cubiertas con un material retráctil de 45 mm de longitud, dejando libre una longitud en cada sonda de 42 mm. La distancia entre las sondas será de 35 mm.

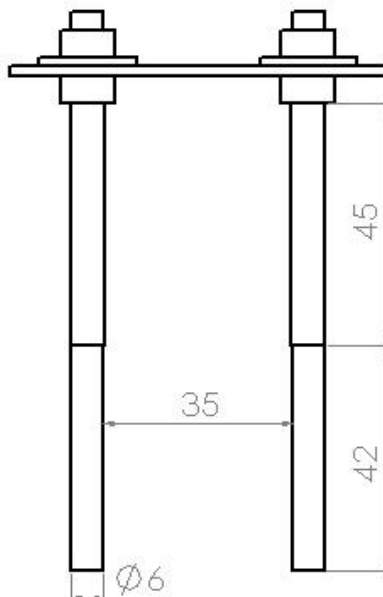
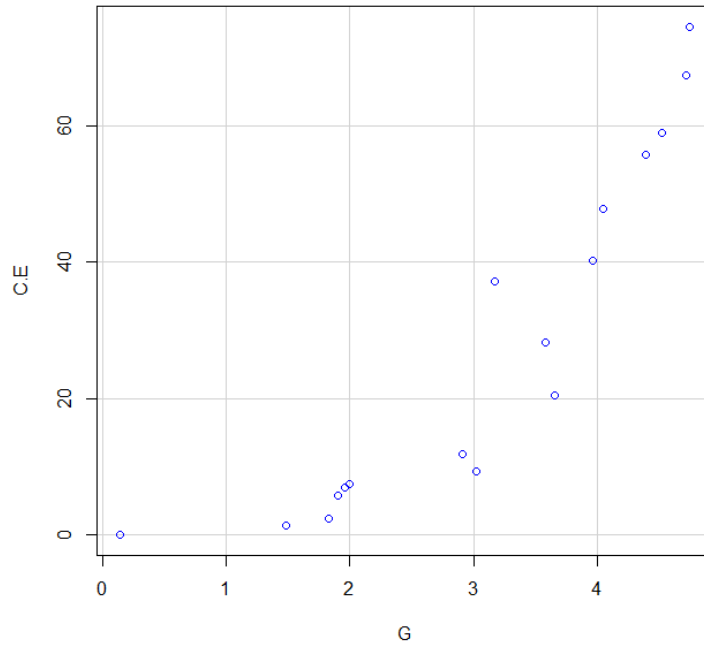


Figura 4-5: Geometría de sondas número 1.

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.0104	21.4	7103.920	0.1408
1.310	21.2	676.426	1.4784
11.790	21.5	343.513	2.9111
2.336	21	546.944	1.8283
5.754	21.08	525.439	1.9032
6.925	21.04	511.366	1.9556
7.466	21.06	501.594	1.9937
9.221	21.26	330.536	3.0254
20.504	21.12	273.825	3.6520
28.184	21.08	279.009	3.5841
37.144	21.2	315.474	3.1698
40.244	21.18	252.505	3.9603
47.876	21.18	247.156	4.0460
55.876	21.1	227.684	4.3921
59.088	21.1	220.975	4.5254
67.382	21.1	211.836	4.7206
74.586	21.1	210.562	4.7492

Tabla 4-2: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 1.



Gráfica 4-9: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 1.

Geometría 2

La segunda geometría, poseerá la misma superficie libre en cada sonda que la geometría número uno, pero esta vez la distancia entre sus sondas será de 45 mm.

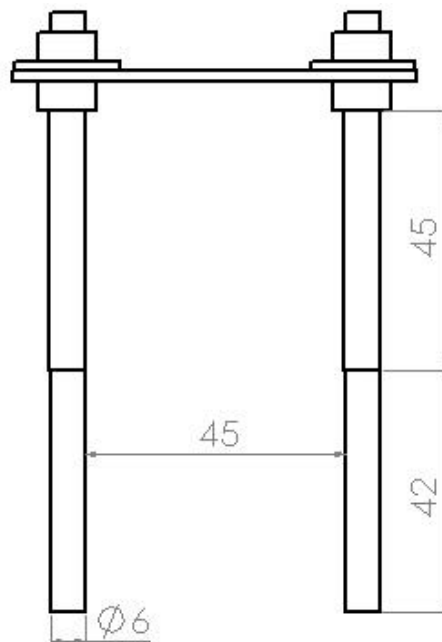
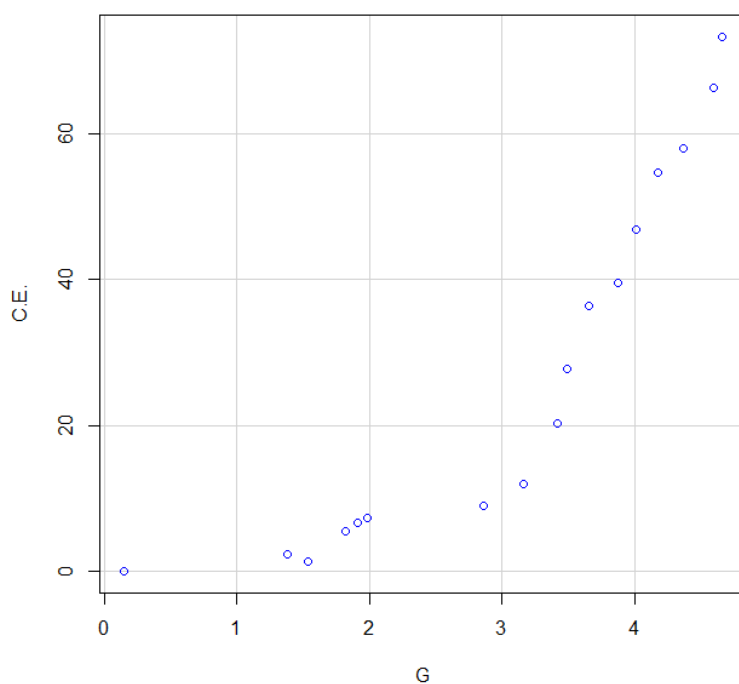


Figura 4-6: Geometría de sondas número 2.

DISEÑO EN SENSORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA MEDIDA
DE CALIDAD DEL AGUA EN SOLUCIONES DE SUELO

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.0127	21.12	6667.793	0.1500
1.316	21.4	650.831	1.5365
11.886	20.9	315.948	3.1651
2.268	21.2	722.483	1.3841
5.566	21.04	548.783	1.8222
6.727	21	522.825	1.9127
7.261	21.1	503.197	1.9873
9.033	21.04	349.034	2.8651
20.212	21.16	292.073	3.4238
27.710	21.06	286.234	3.4937
36.342	20.96	273.558	3.6556
39.502	21.04	257.775	3.8794
46.884	21	249.309	4.0111
54.718	20.9	239.272	4.1794
57.952	20.9	229.008	4.3667
66.248	20.96	217.467	4.5984
73.270	21.02	214.359	4.6651

Tabla 4-3: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 2.



Gráfica 4-10: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 2.

Geometría 3

La tercera geometría tiene la misma superficie libre en cada sonda que las dos geometrías anteriores, y la distancia entre sus sondas es de 55 mm.

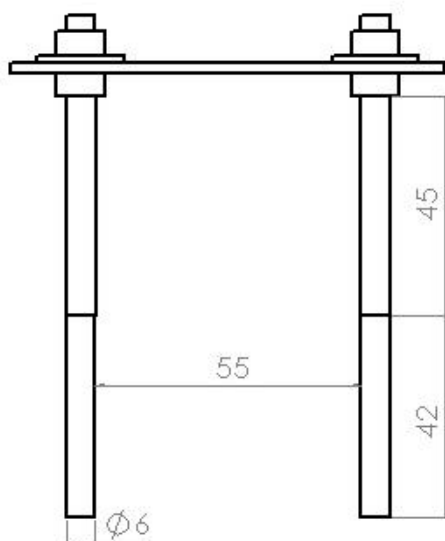
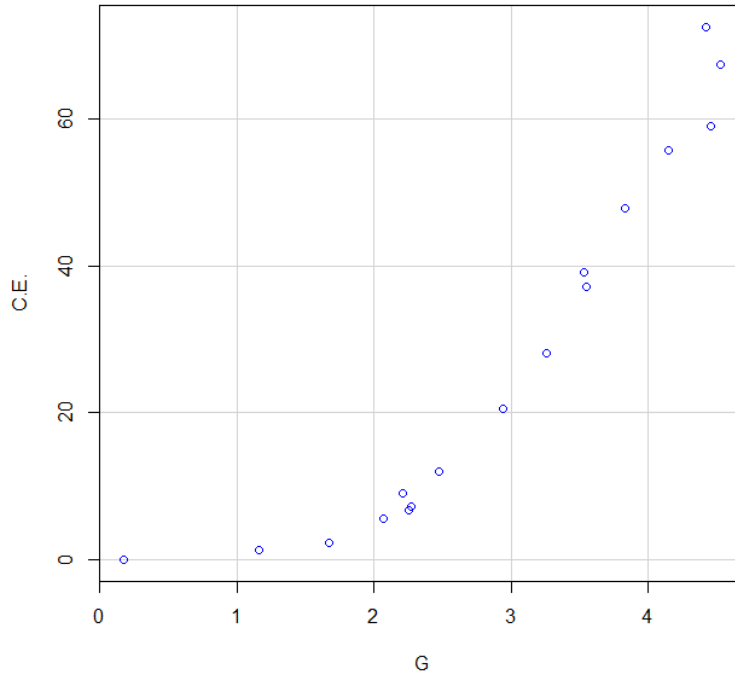


Figura 4-7: Geometría de sondas número 3.

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.0139	21.40	5818.383	0.1719
1.313	21.30	865.394	1.1556
11.982	21.30	404.106	2.4746
2.280	21.22	598.863	1.6698
5.610	21.20	484.244	2.0651
6.735	21.14	443.039	2.2571
7.269	21.14	439.638	2.2746
9.021	21.28	453.237	2.2063
20.486	21.40	340.415	2.9376
28.170	21.38	306.824	3.2592
37.194	21.36	282.041	3.5456
39.082	20.90	283.529	3.5270
47.862	21.48	260.961	3.8320
55.770	21.36	240.848	4.1520
59.050	21.38	224.256	4.4592
67.366	21.36	220.692	4.5312
72.506	20.98	226.050	4.4238

Tabla 4-4: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 3.



Gráfica 4-11: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 3.

Geometría 4

La geometría cuarta la conforman unas sondas recubiertas por un material retráctil de 58 mm de longitud, y con una separación 35 mm.

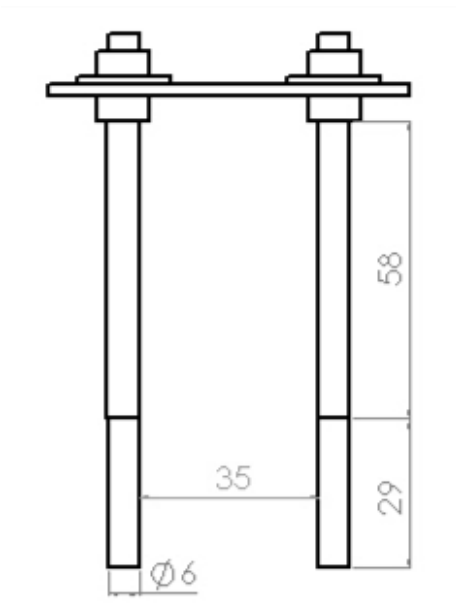
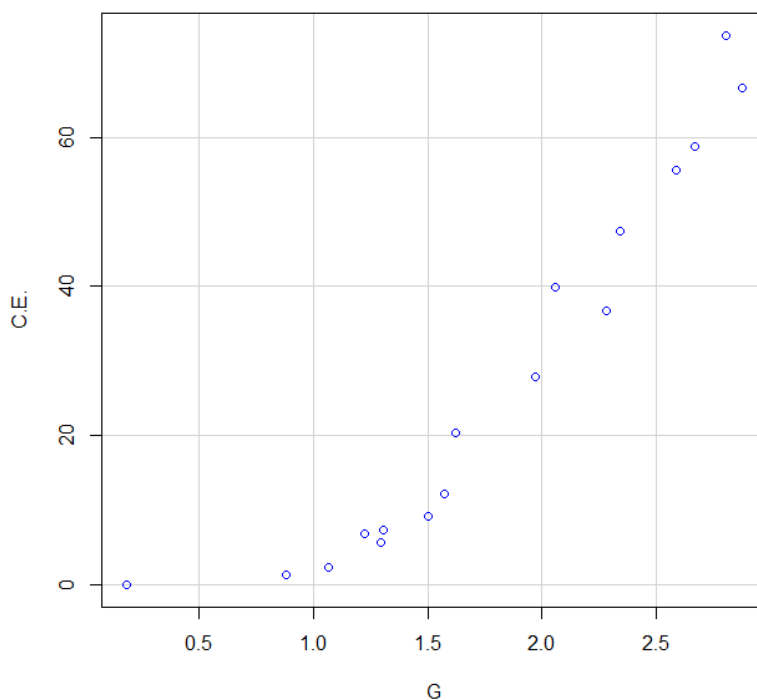


Figura 4-8: Geometría de sondas número 4.

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.02699	21.30	5533.150	0.1808
1.324	21.70	1139.263	0.8778
12.150	22.00	636.370	1.5714
2.323	21.32	937.509	1.0667
5.717	21.40	773.972	1.2921
6.850	21.24	816.070	1.2254
7.406	21.32	766.430	1.3048
9.172	21.34	665.965	1.5016
20.332	21.28	616.442	1.6222
27.920	21.30	507.656	1.9698
36.746	21.38	438.415	2.2810
39.916	21.36	486.489	2.0556
47.422	21.44	427.498	2.3392
55.546	21.36	386.519	2.5872
58.770	21.38	375.001	2.6667
66.642	21.26	347.417	2.8784
73.654	21.32	356.336	2.8063

Tabla 4-5: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 4.



Gráfica 4-12: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 4.

Geometría 5

La quinta geometría es igual que la cuarta, a excepción de que las sondas esta vez están separadas 45 mm.

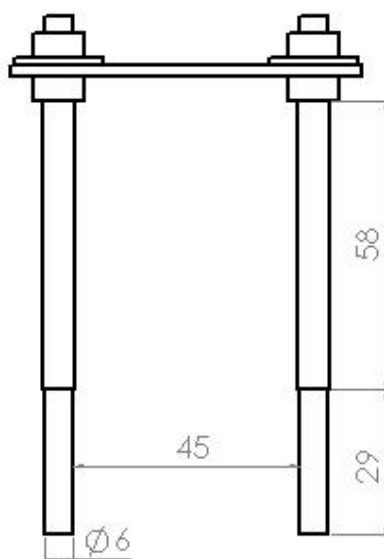
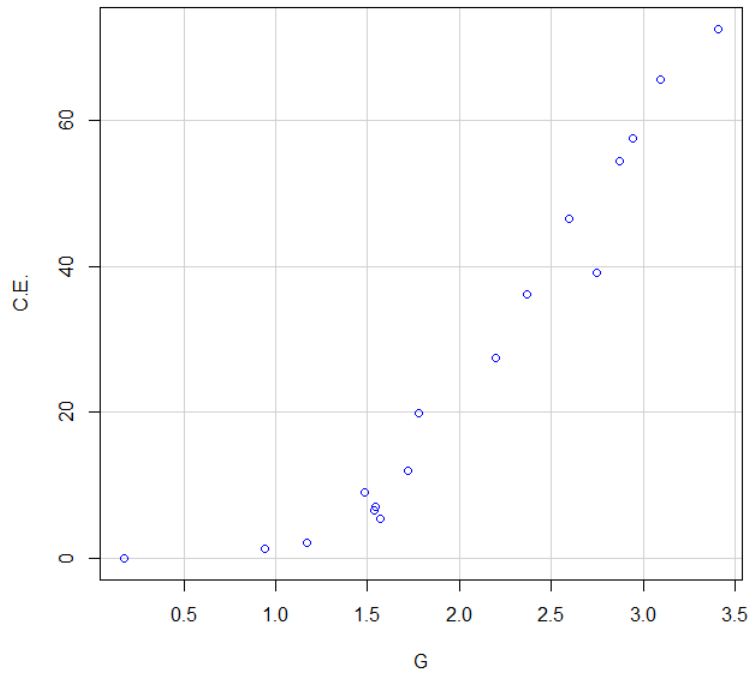


Figura 4-9: Geometría de sondas número 5.

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.01124	21.34	5708.049	0.1752
1.310	21.20	1066.002	0.9381
11.958	21.20	582.258	1.7175
2.212	21.06	854.653	1.1701
5.477	21.00	638.302	1.5667
6.573	21.00	651.504	1.5349
7.084	21.00	647.486	1.5444
8.991	21.10	674.521	1.4825
19.952	20.98	563.090	1.7762
27.414	20.90	454.546	2.2000
36.084	20.90	422.821	2.3651
39.082	20.90	363.953	2.7476
46.510	20.96	385.323	2.5952
54.374	21.00	348.067	2.8730
57.602	21.00	339.806	2.9429
65.584	21.00	323.078	3.0952
72.506	20.98	293.160	3.4111

Tabla 4-6: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 5.



Gráfica 4-13: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 5.

Geometría 6

Esta última geometría posee la misma longitud de material retráctil que la geometría cuarta y quinta (58 mm) y sus sondas están separadas una distancia de 55 mm.

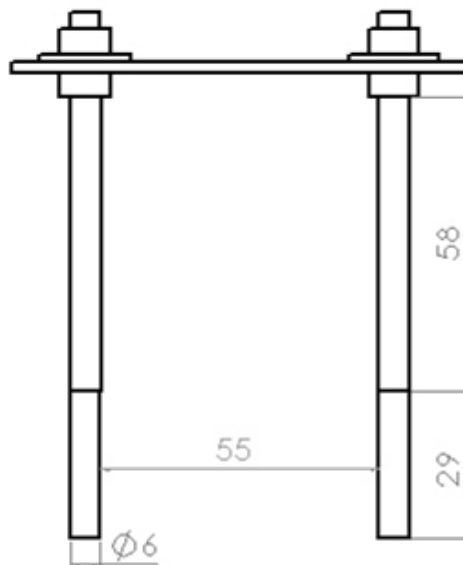
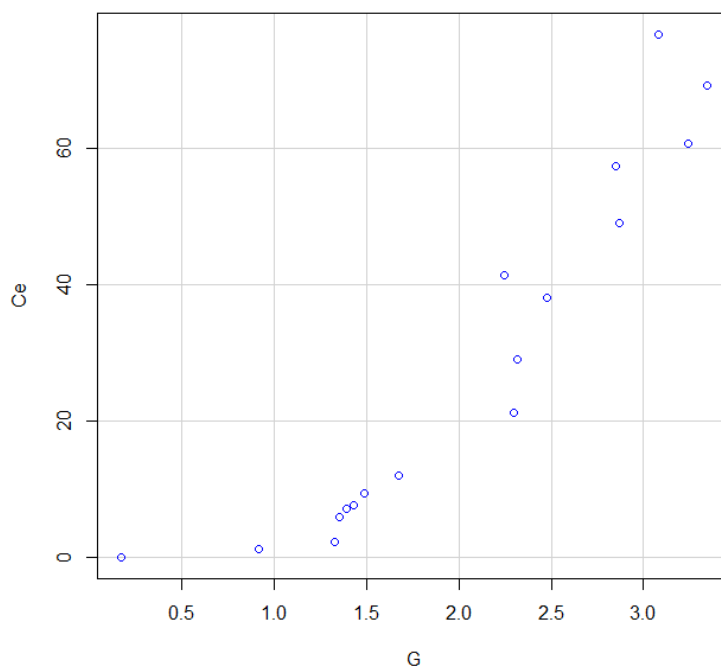


Figura 4-10: Geometría de sondas número 6.

Conductividad eléctrica (mS/cm)	Temperatura (°C)	Resistencia (ohm)	Conductancia (mS)
0.0627	21.50	5722.610	0.1748
1.324	21.70	1086.957	0.9200
12.078	21.70	597.725	1.6730
2.324	21.30	752.695	1.3286
5.880	21.36	737.034	1.3568
7.113	21.40	716.749	1.3952
7.650	21.30	699.893	1.4288
9.475	21.50	672.043	1.4880
21.160	21.40	435.084	2.2984
29.022	21.40	431.803	2.3159
38.116	21.40	403.846	2.4762
41.318	21.40	445.158	2.2464
49.048	21.30	348.645	2.8683
57.322	21.30	350.585	2.8524
60.712	21.30	308.370	3.2429
69.228	21.30	298.862	3.3460
76.654	21.38	324.675	3.0800

Tabla 4-7: Datos obtenidos de conductancias con geometría número 6.



Gráfica 4-14: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 6.

Como podemos observar en las gráficas obtenidas los puntos forman una curva, por lo que no podemos relacionar las dos variables linealmente para todo el intervalo. Si dividimos el intervalo total en otros más pequeños podemos aproximarlos a rectas, de manera que podremos relacionar la conductividad eléctrica y la conductancia de manera lineal.

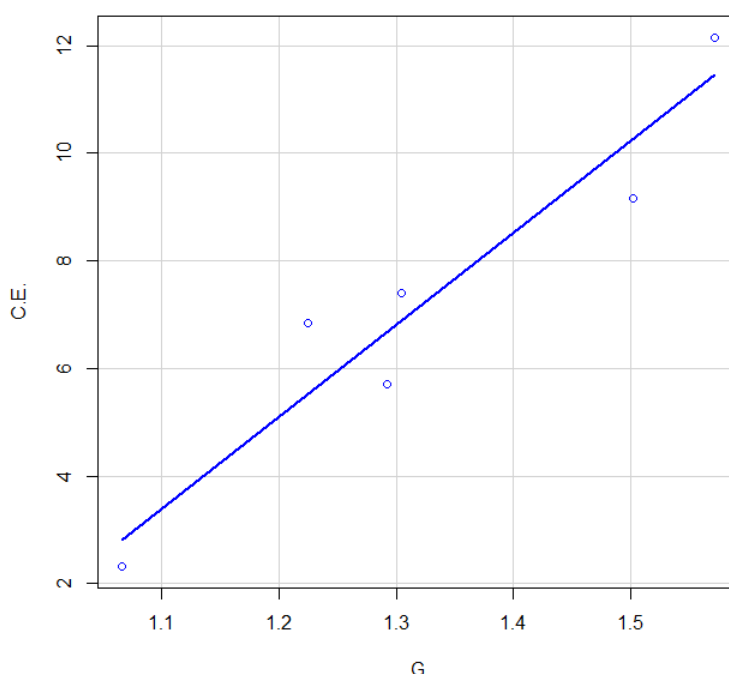
Los intervalos en los que vamos a dividir las muestras serán dos, el primero contendrá las muestras con conductividades eléctricas comprendidas entre los 2 y los 13 mS/cm, y el segundo contendrá las muestras de 18 a 70 mS/cm.

Primer intervalo: [2mS/cm, 13mS/cm]

<i>Geometría</i>	<i>Relación conductividad eléctrica (C.E.) y conductancia (G)</i>	<i>R²</i>
1	C.E.= -3.685+4.818*G	0.676
2	C.E.= -2.8329+4.5474*G	0.9095
3	C.E.= -16.652+11.03*G	0.854
4	C.E.= -15.419+17.094*G	0.9115
5	C.E.= -15.941+15.3*G	0.7115
6	C.E.= -27.654+24.272	0.8437

Tabla 4-8: Regresiones lineales obtenidas para muestras con valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 2 y 13 mS/cm.

Para este intervalo seleccionamos la geometría número 4, ya que es la que mejor ajuste ofrece de las rectas obtenidas.



Gráfica 4-15: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 4 para el primer intervalo.

Calculamos el error que tendrán las medidas de conductividad obtenidas con esta regresión según lo explicado en el apartado 3.2.2.3, el resultado de la regresión con su

error para la geometría número 4 se muestra a continuación. El valor de conductancia ha de ser introducido en milisiemens, y el valor de conductividad eléctrica vendrá dado en mS/cm.

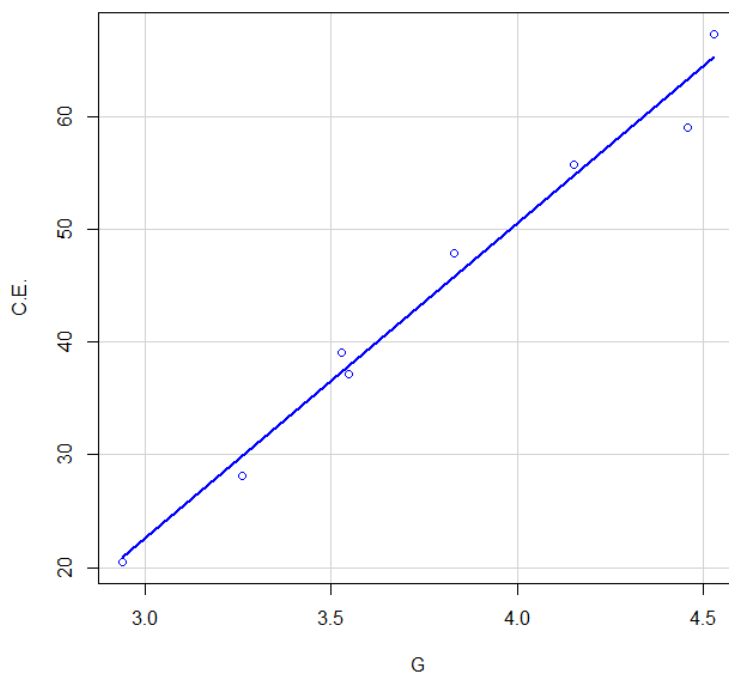
$$C. E. = (-15.419 \pm 3.563) + (17.094 \pm 2.663) \cdot G \quad (4.10)$$

Segundo intervalo: [18mS/cm, 70mS/cm]

<i>Geometría</i>	<i>Relación conductividad eléctrica (C.E.) y conductancia (G)</i>	<i>R²</i>
1	C.E.= -59.320+25.924*G	0.7261
2	C.E.= -102.469+36.994*G	0.9752
3	C.E.= -61.116+27.904*G	0.9811
4	C.E.= -42.365+37.62*G	0.9481
5	C.E.= -43.803+33.844*G	0.9073
6	C.E.= -47.228+34.359*G	0.8329

Tabla 4-9: Regresiones lineales obtenidas para muestras con valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 18 y 70 mS/cm.

Para este segundo intervalo seleccionamos la geometría número 3, ya que en este caso es la que mejor ajuste nos proporciona.



Gráfica 4-16: Conductividad eléctrica (mS/cm) relacionada con la conductancia (mS) obtenidas con la geometría número 3 para el segundo intervalo.

Calculamos el error de la regresión y mostramos a continuación el valor final de esta. El valor de conductancia ha de ser introducido en milisiemens, y el valor de conductividad eléctrica vendrá dado en mS/cm.

$$C. E. = (-61.116 \pm 6.042) + (27.904 \pm 1.583) \cdot G \quad (4.11)$$

5. DISEÑO DEL SENSOR.

El sensor de conductividad eléctrica que queremos contruir estará compuesto por el circuito que se muestra a continuación, dicho circuito estará controlado por un microprocesador Arduino de 5V. La construcción de este sensor se realiza con el fin de emular el trabajo que realiza el potenciostato. El sensor estará programado con las rectas obtenidas anteriormente para un rango determinado, ya que como obtuvimos en el apartado anterior, dependiendo del rango, la geometría de las sondas será diferente. Esto significa que necesitaremos un sensor diferente para cada rango de conductividad eléctrica.

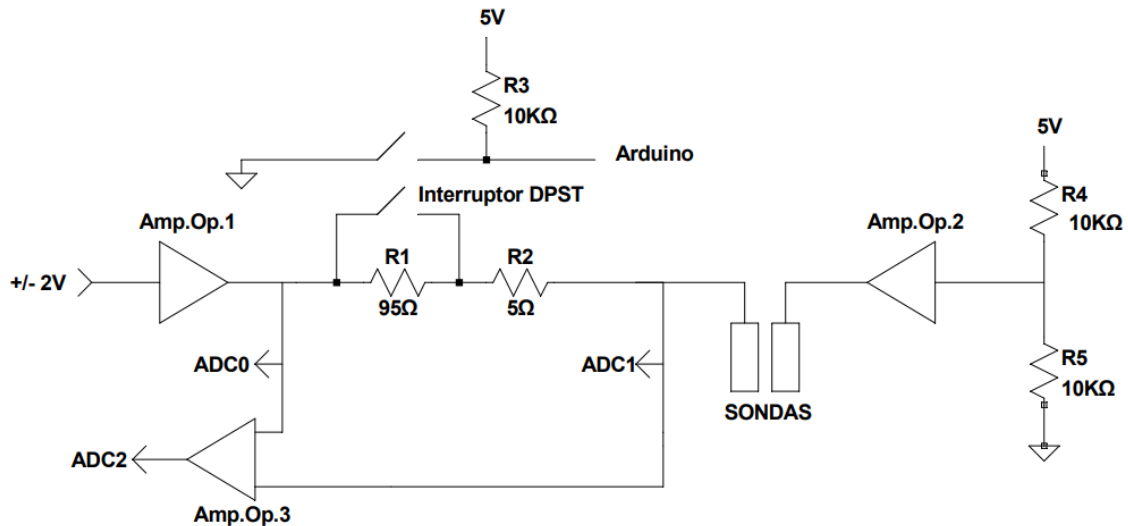


Figura 5-1: Circuito del sensor controlado por Arduino.

Este circuito posee dos amplificadores operacionales duales de alta corriente L272M, estos son los amplificadores operacionales 1 y 2, ambos están en modo de ganancia unitaria, y actuarán como seguidores de tensión. El amplificador operacional 2 tiene una entrada fija de +2.5 voltios. La entrada al amplificador operacional 1 es una señal analógica que va desde los +0.5 V a los +4.5 V (es decir, la señal que conseguimos será de +/-2 V con una compensación de +2.5 V de corriente continua). Esta señal procede de un DAC, que ofrece máxima flexibilidad en cuanto a la forma de onda, y permite una rápida interrupción de la potencia si sucede que el flujo de corriente a través de las resistencias y las sondas es elevado, se produciría entonces un ajuste de la salida DAC a +2.5 V para que coincida con la salida del amplificador 2.

El objetivo del circuito es conocer la corriente que circula por las sondas, para ello se calculará la corriente que circula por las resistencias R1 y R2, midiendo el voltaje que circula por ellas. Para obtener un circuito que nos ofrezca buena resolución para distintos valores de resistencia de las muestras, colocaremos un relé DPST controlado por el Arduino, que nos permitirá modificar las resistencias que nos proporcionan el voltaje, pudiendo así seleccionar una resistencia de 5 ohm o de 100 ohm.

El voltaje que circula por estas resistencias se mide con dos entradas ADC y un amplificador en bornes de las resistencias, el amplificador operacional 3 tiene como salida una tercera entrada ADC. Aunque la corriente podría calcularse estimándola con las dos

primeras salidas ADC, pero de esta manera se obtiene una mejor resolución. El amplificador 3 posee una configuración de amplificador de instrumentación, con el objetivo de que la impedancia de entrada sea elevada y no se pierda corriente. La ganancia de este amplificador podrá ser modificada con otro relé DPST, y podrá tener valores de 5 o 25, con el fin de obtener una mejor resolución dependiendo del valor de la resistencia medida.

6. CONCLUSIONES.

Con la realización de este trabajo se ha conseguido analizar la medida de conductividad eléctrica en profundidad. Así como, observar la influencia de otros factores que afectan en gran magnitud a su valor.

En primer lugar, se ha podido observar cómo se cumple la linealidad entre la cantidad de sales disueltas en una muestra y su conductividad eléctrica. Además, se ha visto cómo se ve modificada la pendiente de estas rectas con el cambio de temperatura de las muestras. Esto significa que, como se había anticipado en el marco teórico, se ha constatado que la temperatura es un factor importante en la medida de la conductividad eléctrica, por eso esta medida siempre ha de venir referenciada a su temperatura. Por lo tanto, el sensor que mida la conductividad eléctrica es necesario que lleve incorporado un termómetro. Cabe destacar que con el estudio hecho de conductividad eléctrica relacionado con concentración salina se han obtenido resultados bastante positivos, pues la regresión calculada se adapta considerablemente a los datos obtenidos.

Seguidamente, las medidas tomadas con el potencióstato nos han hecho corroborar la importancia de la geometría de la celda de medición, ya que se ha observado que para una misma muestra se obtienen diferentes valores de resistencia dependiendo de la geometría de la sonda utilizada. Por otra parte, se ha probado que para la medida de estas muestras con las sondas es necesario el uso de corriente alterna, pues la corriente continua nos provoca la polarización de las sondas. También, se ha constatado que el material de las sondas es importante, y una característica destacable que debe cumplir es que no debe de reaccionar químicamente con las muestras.

Por último, es preciso señalar que la hipótesis nombrada en el marco teórico que relacionaba la conductividad eléctrica y la resistencia con una recta, no se ha cumplido en la parte experimental. Pues, según los datos obtenidos se ha visto que estos dos parámetros se relacionan mediante una curva. Por lo que el rango de medida tomado ha sido dividido en dos tramos para garantizar la linealidad, estos tramos son [2 mS/cm, 13 mS/cm] y [18 mS/cm, 70 mS/cm]. Adicionalmente, se ha comprobado que cada rango posee una geometría idónea de las sondas para la medida de su resistencia, por lo que será necesario el uso de un sensor diferente para cada rango, que además será programado con una ecuación específica.

En conclusión, se han alcanzado los objetivos propuestos al inicio del trabajo. Y con todo esto, se ha conseguido obtener un modelo que, a partir de una medida de resistencia y temperatura, proporcione la concentración de sal. Además, se ha obtenido el diseño del sensor capaz de medir dicha resistencia. Por lo que podría usarse en líneas futuras para la construcción de este sensor con el objetivo de obtener un instrumento capaz de estimar la concentración de sal.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] ACOSTA, Carlos. El suelo agrícola, un ser vivo. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 2007, vol. 3, no 5, p. 55-60.
- [2] NARVÁEZ-ORTIZ, Willian Alfredo, et al. Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2015, vol. 6, no SPE12, p. 2383-2397.
- [3] *Universidad de Murcia*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020] Disponible en: https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-may25-45/tema_6.pdf
- [4] *GIS Ibérica: Equipos de Precisión*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020]. Disponible en: http://www.gisiberica.com/conduct%EDmetros/conductividad_el%E9ctrica.htm
- [5] VISCONTI, Fernando; DE PAZ, José Miguel. Electrical conductivity measurements in agriculture: The assessment of soil salinity. *New Trends and Developments in Metrology*, 2016, vol. 1, p. 99-126.
- [6] *InfoAgro*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020] Disponible en: https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53
- [7] Guía para la medición de la conductividad. Teoría y práctica de la conductividad. METTLER TOLEDO (2016)
- [8] *METTLER TOLEDO*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/electrode/probe-InPro-7100.html#documents>
- [9] *METTLER TOLEDO*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/conductivity-meter-inductive/probe-InPro-7250-ST.html>
- [10] *METTLER TOLEDO*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/portable-pH-meter/seven2go/S3-Meter.html
- [11] *METTLER TOLEDO*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/sensor/conductivity-sensor/InLab-731-ISM.html
- [12] López Rodríguez, J. Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica. (2017).
- [13] Technical Manual Potentiostat Model PS-605.
- [14] *Universidad de Valencia*. [en línea] [consulta: 29 noviembre 2020] Disponible en: https://www.uv.es/zuniga/08_Ajuste_de_una_recta_por_minimos_cuadrados.pdf