

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Diseño, implementación y calibración de un
medidor de salinidad para agua.

Curso 2014/2015

Alumno/a:

Justo Hernández Romera

Director/es:

José Antonio Gázquez Parra
Rosa María García Salvador



Universidad de Almería

Escuela Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial



**Diseño, implementación y calibración de un medidor de salinidad
para agua.**

Alumno:

Justo Hernández Romera

Directores:

José Antonio Gázquez Parra

Rosa María García Salvador

Septiembre 2015

Gracias a Prometeo, por robarle el fuego a los dioses.

Agradecimientos

Dar las gracias a los directores de este trabajo por su ayuda en la elaboración y desarrollo del mismo. Y también al Departamento de Ingeniería de la Universidad de Almería por su labor realizada durante toda la carrera.

Resumen

Este trabajo fin de grado consistirá en el diseño, implementación y calibración de un medidor de salinidad para agua. Se enmarca dentro del campo de la instrumentación electrónica y más concretamente en el de las mediciones por detección síncrona. La salinidad representa un parámetro de gran importancia en numerosas ciencias, al dar una valoración numérica a la cantidad de sales disueltas en el agua, descompuestas en iones positivos y negativos.

Palabras clave: microsiemens, conductividad, instrumentos, sensores.

Abstract

This final project will consist in the design, implementation and calibration of a water salinity sensor. It belongs to the electronic instrumentation field, more accurate, to the lock-in applications. Salinity is an important parameter in a large number of sciences, since it gives a numerical value to the quantity of salts that are dissolved in water, in anions and cations.

Keywords: microsiemens, conductivity, instruments, sensors.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área	m^2
a	Distancia entre el centro de un cilindro y el eje Z	m
a_i	Constantes	-
b_i	Constantes	-
R_t	Ratio de conductividad	-
S	Salinidad	‰
C	Conductividad	$\mu S/cm$
t	Temperatura	$^{\circ}C$
V	Voltaje	V
I	Intensidad	A
R	Resistencia	Ω
G	Conductancia	Ω^{-1}
R_x	Resistencia a través del agua	Ω
R_s	Resistencia de calibración	Ω
k	Parámetro geométrico	m^{-1}
k'	Parámetro característico de la sonda	$\Omega^{-1}m^{-1}$
r_0	Radio de un cilindro	m
L	Altura de un cilindro	m
E	Campo eléctrico	$N \cdot C^{-1}$
Q	Carga eléctrica	C
<i>Letras griegas</i>		
ω	Frecuencia	rad/s
ϕ	Ángulo de desfase	rad
σ	Conductividad específica del material	S/m
ϵ_0	Permitividad del vacío	F/m
λ	Campo eléctrico cargado por unidad de longitud	Q/k
ρ_s	Resistividad de la superficie	Ωm

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y motivación	2
1.2. Objetivos	5
1.3. Estructura del documento	5
1.4. Planificación temporal	6
2. Revisión bibliográfica	7
2.1. Valoración por clorinidad	8
2.2. Conductividad eléctrica	10
2.3. Métodos de medida	12
2.3.1. Puente de medida equilibrado	12
2.3.2. Detección síncrona	14
3. Diseño e implementación del sistema	17
3.1. Especificaciones necesarias	17
3.2. Dispositivos	18
3.2.1. Multiplicadores analógicos	19

3.2.2. Demoduladores síncronos	21
3.3. Desarrollo teórico de la sonda de medida	23
3.4. Implementación del sistema	27
3.4.1. Esquema y simulación	27
4. Desarrollo del sistema	41
4.1. Proceso de fabricación	42
5. Resultados	45
5.1. Pruebas	46
5.2. Calibración de la sonda	50
5.3. Calibración de la salida	51
6. Conclusiones	53
6.1. Líneas futuras de trabajo	54
7. Glosario y acrónimos	56

Índice de figuras

1.1. Porcentaje de iones comunes en agua.	4
1.2. Diagrama de Gantt	6
2.1. Pipeta de Knudsen [Eni15].	8
2.2. Circuito dependiente de la conductividad.	10
2.3. Oscilador por puente de Wien.	13
2.4. Puente de medida AC.	13
2.5. Diodo ideal.	14
2.6. Ejemplo de módulo sensor para el circuito de medida.	15
2.7. Multiplicación analógica.	16
2.8. Ejemplo de filtro para eliminar la componente omega.	16
3.1. Circuito básico	18
3.2. Diagrama I/O del dispositivo MC1495.	19
3.3. Diagrama I/O del dispositivo AD633.	20
3.4. Diagrama interno del circuito integrado ADA2200 [Dev14b].	21
3.5. Diagrama de procesos para el ADA2200.	22
3.6. Esquema de la geometría de la sonda de medida.	24

3.7. Esquema recomendado para aplicaciones Lock-in.	28
3.8. Esquema implementado.	29
3.9. Esquema recomendado para operación a estable del NE555.	30
3.10. Salida para una configuración en modo a estable del NE555.	31
3.11. Esquema implementado correspondiente al AD633.	32
3.12. Relación entre resistencia y conductividad del agua calculada.	33
3.13. Salida para una resistencia equivalente de 1395500 ohmios.	35
3.14. Salida para una resistencia equivalente de 1019600 ohmios.	36
3.15. Salida para una resistencia equivalente de 407840 ohmios.	36
3.16. Salida para una resistencia equivalente de 271890 ohmios.	37
3.17. Salida para una resistencia equivalente de 20392 ohmios.	37
3.18. Salida para una resistencia equivalente de 10196 ohmios.	38
3.19. Salida para una resistencia equivalente de 4078 ohmios.	38
3.20. Salida para una resistencia equivalente de 407 ohmios.	39
3.21. Salida para una resistencia equivalente de 204 ohmios.	39
3.22. Correspondencia de la tensión de salida y la conductividad a medir en el primer rango.	40
3.23. Correspondencia de la tensión de salida y la conductividad a medir en el segundo rango.	40
4.1. Prototipo de fotolito.	43
4.2. Cara superior de la placa.	44
4.3. Cara posterior de la placa.	44
5.1. Salida para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 578k\Omega$	47

5.2. Salida para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$	47
5.3. Señal de entrada para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$.	48
5.4. Señal de entrada para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$.	48
5.5. Diagrama de implementación para la sonda de electrodos.	50
5.6. Sonda fabricada.	51
5.7. Medición de laboratorio para conductividad equivalente, ADA2200.	52

Índice de tablas

1.1. Rangos de conductividad para cada tipo de agua.	2
1.2. Métodos y precisión para medir la salinidad.	3
3.1. Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el primer rango de medida con el AD633.	35
3.2. Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el segundo rango de medida con el AD633.	35
5.1. Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el ADA2200.	46
5.2. Relación entre salida en voltaje y resistencia de la sonda de prueba para el ADA2200.	49
5.3. Relación entre salida en voltaje, resistencia de la sonda de prueba y conductividad medida para el ADA2200.	49
6.1. Distribución temporal de las tareas realizadas.	53

1

Introducción

La salinidad representa un parámetro de gran importancia en numerosas ciencias, al dar una valoración numérica a la cantidad de sales disueltas en el agua, descompuestas en iones positivos y negativos.

La medición de la salinidad en agua adquiere gran importancia a la hora de determinar la potabilidad del agua para el consumo humano, el animal o uso para riegos. La cantidad de sales disueltas en agua resulta un parámetro crítico para cualquier forma de vida, ya que determina la capacidad biológica de su utilización en el ciclo vital de cada ser vivo. Por ejemplo, los seres humanos sólo son capaces de digerir correctamente agua con conductividades de entre 0.005 hasta 0.05 S/m (Siemens por metro), fuera de ese rango por el límite superior provocaría que en nuestra sangre aumentase la salinidad y por tanto la deshidratación del cuerpo. Mientras que fuera del rango del límite inferior, produciría un efecto osmótico que provocará una entrada masiva de líquido en las células para igualar la concentración salina, dando como resultado una explosión de las mismas y su muerte (plasmólisis). Dados estos argumentos resulta comprensible y lógica la necesidad de conocer el nivel de conductividad o la salinidad en medios acuosos de los que pueda favorecerse el cuerpo humano o cualquier actividad relacionada con el desarrollo de la vida [Gov12].

La salinidad está directamente relacionada con la conductividad, que representa la facilidad de un material particular para conducir una corriente a través de una dimensión longitudinal. Así como la resistividad, que representará exactamente lo contrario, la oposición característica de un material a conducir una corriente a través de la misma dimensión longitudinal. Para este proyecto tendrá interés el rango de salinidad comprendido entre el agua pura y el agua de mar, teniendo fuera de este rango el agua caracterizada como salmuera. En la tabla 1.1 se distingue cada uno de los rangos, siendo el primero el de agua pura, aquel con una conductividad menor, siguiéndole el de agua potable en una escala

logarítmica, así como del agua de mar con las mayores conductividades.

Conductividad del agua	Tipo de agua
$5,5\mu S/m - 5mS/m$	Agua pura
$5mS/m - 50mS/m$	Agua potable
$50mS/m - 3S/m$	Agua salina
$3S/m - 5S/m$	Agua de mar

Tabla 1.1: Rangos de conductividad para cada tipo de agua.

Este trabajo se centrará en obtener una medida fiable y precisa dentro del rango mencionado anteriormente.

1.1. Antecedentes y motivación

El agua es el mayor fluido constituyente en los seres vivos, por lo tanto es vital para todas las formas de vida. Supone el 71 % de la superficie terrestre, y se puede encontrar mayormente en estado líquido, aunque también coexiste en la Tierra con su estado sólido y gaseoso. Para los seres humanos, desde nuestros orígenes como especie, hasta nuestra última experiencia evolutiva en el clado homínido, el agua ha sido y sigue siendo el principal bien necesario para originar la vida y continuarla. Ahora, el homo sapiens sapiens necesita de entre uno y siete litros de agua diarios para evitar la deshidratación dependiendo de la actividad, temperatura y humedad entre otros factores. Aunque la mayoría de este líquido se adquiere mediante los alimentos y bebidas, la comunidad científica establece la necesidad de dos litros diarios aproximadamente, para mantener una hidratación adecuada en el cuerpo humano.

Derivado de lo anterior, se entiende que el control, el almacenamiento y el suministro de agua resultan de las mayores prioridades de nuestra especie, así como de cualquier ser vivo. La calidad del agua hace referencia a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. La salinidad entraría dentro del campo físico y químico, ya que se define como un parámetro indicativo de la cantidad de sales disueltas en el agua y por ende la conductividad de la misma.

Además los efectos de una gran salinidad pueden ser muy perjudiciales para el entorno, la agricultura y la actividad industrial, y por tanto ejerce un gran efecto en la economía global. Por otra parte, un aumento de la salinidad en el suelo puede provocar que la vegetación deje de estar sana y por tanto afecte directamente a la biodiversidad del entorno. Uno de los parámetros directamente relacionados con la salinidad en agua es la conducti-

vidad, que se define como la capacidad física del medio acuoso de conducir una corriente a través de una dimensión longitudinal y espacial.

Para la determinación de la salinidad existen varios métodos conocidos, que se indican en la tabla 1.2 así como de la precisión que puede obtenerse con cada uno de ellos. Se puede emplear un refractómetro de mano o una valoración por clorinidad en el laboratorio, aunque el más preciso de todos ellos es el basado en la conductividad. Un refractómetro de mano es un artefacto a través del cual se aprecia el nivel de turbidez de una muestra de agua, y mediante esa indicación estimar posteriormente la salinidad. Y una valoración por clorinidad se basa en principios de análisis volumétricos realizados en un laboratorio para obtener la medida másica de la cantidad de sales disueltas en el agua.

Método de medición de la salinidad	Precisión
Refractómetro de mano	1 parte de 70
Valoración de laboratorio	1 parte de 350
Salinómetro moderno (por conductividad)	1 parte de 40000

Tabla 1.2: Métodos y precisión para medir la salinidad.

La medición mediante la conductividad se realiza de manera indirecta, es decir, se hace una estimación de la salinidad en base a otro parámetro, la conductividad medida en siemens. Mientras que con una valoración por clorinidad se mide directamente la masa de sales de una disolución, por lo que la salinidad se calcular de forma directa al igual que mediante un refractómetro.

La conductividad [Chr15] se define como la habilidad para dejar pasar una corriente eléctrica, directamente relacionada con la cantidad de iones disueltos en el agua. Estos iones provienen de sales disueltas y materiales inorgánicos. Los compuestos que son capaces de disolverse en forma de iones se denominan electrolitos, como por ejemplo; los iones positivos de sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}), y los iones negativos de cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato y bicarbonato. A mayor presencia de estos elementos mayor conductividad existe en el medio [Bha05]. En la figura 1.1 se observa la proporción de sales más comunes en agua de mar. Siendo el elemento más abundante el cloro, por lo que se entiende que las valoraciones químicas para determinar la salinidad se realicen en función de la clorinidad.

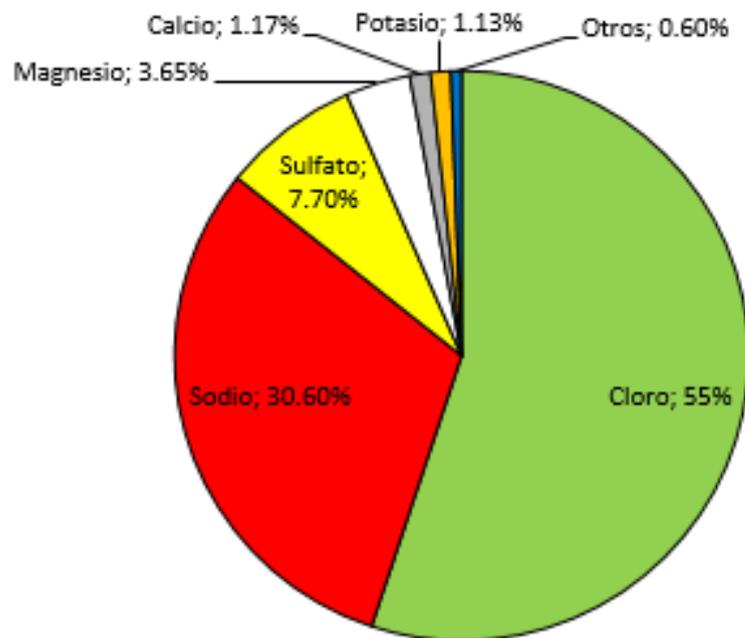


Figura 1.1: Porcentaje de iones comunes en agua.

Los iones conducen la electricidad debido a sus cargas positivas y negativas. Cuando estos electrolitos se disuelven en el agua se dividen entre partículas cargadas negativamente (aniones) y partículas cargadas positivamente (cationes). Cabe mencionar que en el proceso de disolución de las sales, las cargas positivas y negativas quedan en idénticas proporciones, es decir, que aunque aumente la conductividad eléctrica del agua con la disolución de dichas sales, el agua seguirá siendo neutra.

La unidad para la medida de la conductividad es el S/m , aunque usualmente se usarán $\mu S/cm$ o los mS/cm . También es posible encontrar esta unidad expresada en $\mu\Omega^{-1}/cm$. Siendo $S = \Omega^{-1}$. Pero este último término es ya algo arcaico en el uso.

Tras comentar brevemente la importancia de la medida de la salinidad en el agua, en posteriores apartados se irá desarrollando y especificando cada fase del diseño, implementación y calibración del aparato de medida.

1.2. Objetivos

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo el diseño, implementación y calibración de un medidor de salinidad para agua. Se enmarca dentro del campo de la instrumentación electrónica y más concretamente en el de las mediciones por detección síncrona.

También se tendrá como objetivo la fabricación del aparato de modo que pueda ser usado de forma móvil sin necesidad de conexión a la red o cualquier tipo de suministro de energía fijo. Para ello se estudiarán diferentes opciones teniendo en cuenta el consumo energético y especificaciones que tengan relación directa con la movilidad del aparato.

Además se enfocará el diseño a un uso en proyectos que promuevan el desarrollo de las comunidades, es decir, un aparato capaz de funcionar con poca energía y ofrezca medidas útiles. Aunque, según los resultados obtenidos podría emplearse para realizar estudios oceanográficos, debido al rango de operación que se consiga al final del proceso.

1.3. Estructura del documento

Este documento estará estructurado en 6 capítulos y un apéndice. El primer capítulo tratará los temas introductorios referentes a los antecedentes, la motivación, los objetivos y la planificación realizada. El segundo tratará la revisión bibliográfica, de cómo se ha venido enfrentando la ciencia a este problema hasta hoy en día. El tercer capítulo corresponderá al diseño y la implementación realizados en función de las decisiones tomadas al acabar el segundo capítulo. En este capítulo también se presentarán distintas alternativas a los caminos elegidos. En el cuarto capítulo se centrará en los materiales que han sido necesarios y el algoritmo de fabricación seguido para poder llevar a cabo la construcción del dispositivo. A continuación, el quinto capítulo englobará todos los resultados obtenidos, las calibraciones que han sido necesarias para obtener una medida real. En el capítulo sexto se presentarán las conclusiones y futuras líneas de trabajo propuestas. El séptimo capítulo corresponderá al glosario y acrónimos que han aparecido durante el documento. Por último, se incluirá un apartado para listar la bibliografía mencionada en el trabajo seguido de los apéndices.

1.4. Planificación temporal

El tiempo empleado en el desarrollo y elaboración de este trabajo fin de grado se planificó de modo que pudiesen realizarse pruebas de laboratorio cuando fuese necesario. Para ello se dispuso de la colaboración de los directores del trabajo, sobretodo durante los meses de verano. La relación temporal se aprecia en la figura 1.2.

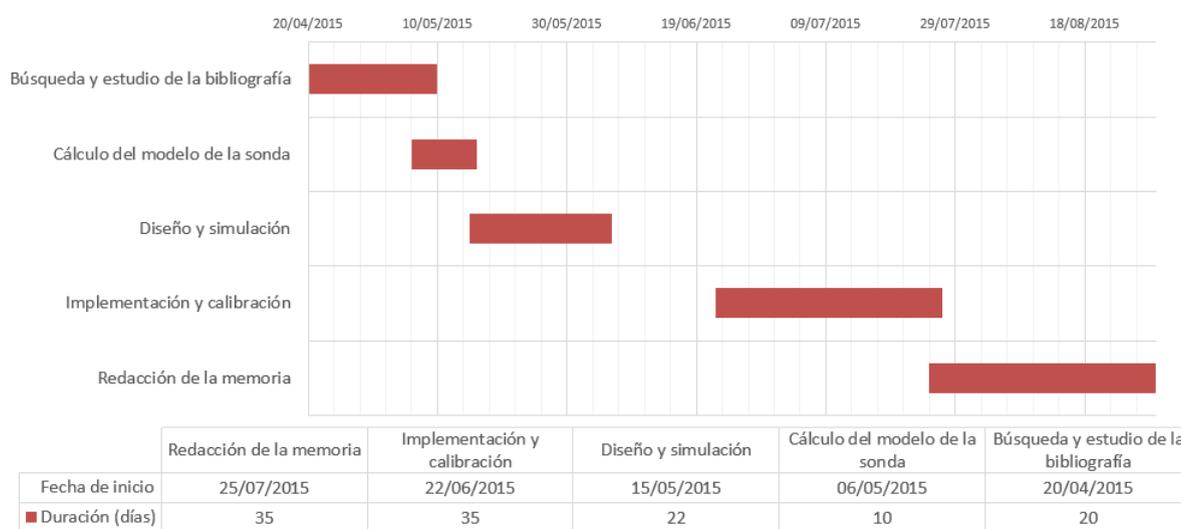


Figura 1.2: Diagrama de Gantt

A principios de Junio se realizó un parón para el periodo de exámenes, se retomó el trabajo el día 22 del mismo mes tras su conclusión. Para cada día de trabajo se han estimado 3 horas empleadas de media. El cómputo final es de 366 horas.

2

Revisión bibliográfica

En este segundo capítulo se estudiará el estado del arte, así como los conceptos necesarios para llevar a cabo la medición de la salinidad del agua. Se considerarán diferentes métodos, alternativas, especificaciones y dispositivos para realizar dicho análisis.

Las primeras mediciones de salinidad se realizaron mediante pruebas de laboratorio, generalmente para el estudio de la salinidad del agua de mar, o salinometría [KTD78]. Aunque en este trabajo se trate también del agua ultra-pura y potable, los procedimientos de medición son similares para ambos rangos. El método primigenio para la medición de la salinidad es el análisis químico en un laboratorio, ya que originalmente el parámetro de la salinidad se concibió como la cantidad de sales totales disueltas en un volumen determinado de agua.

Para el análisis químico basado en la determinación de la salinidad con la medida total de materia inorgánica disuelta, ha de realizarse un proceso de evaporación del agua y medición de la masa restante del residuo. Este método consume mucho tiempo y resulta difícil, porque durante el proceso de evaporación es posible que escapen partículas de dióxido de carbono y cloruro de hidrógeno. Tanta es la materia que puede escapar, importante para determinar la salinidad, que en los métodos que implican el pesaje de materia residual para muestras de agua marina no puede usarse la evaporación. Por lo que para realizar las mediciones de salinidad para agua marina, en ese rango, han de utilizarse métodos indirectos de estimación de la salinidad, tales como el uso de un refractómetro de mano comentado en el apartado anterior. A lo largo del siglo pasado se han venido utilizando dos métodos mayoritarios para la medición de salinidad; la valoración por clorinidad y la conductometría [Ser28].

2.1. Valoración por clorinidad

Durante muchos años, el cálculo de la salinidad se realizó mediante la valoración de haluro, de forma que la identificación resultaba totalmente química [Uni08]. Fue una rutina empleada originalmente para determinar los contenidos en muestras de agua marina. Este método también es conocido como el método de Mohr, que consiste en la valoración de una muestra de agua marina con una disolución de concentración conocida de nitrato de plata hasta el punto donde todos los haluros se precipitan en forma de haluros de plata, punto el cual ha sido indicado pertinentemente o por sistemas de electrodos. Un ejemplo de dispositivo empleado para dicha media es una pipeta de 15 ml de Knudsen, que puede utilizarse para medir la muestra de agua marina dentro del recipiente de valoración. La pipeta de Knudsen difiere con la pipeta estándar usada en los laboratorios en que, después de llenarse, el volumen de la muestra es definido mediante la rotación de una llave de paso de 3 vías situada en la parte superior del aparato. Dicho elemento se muestra en la figura 2.1 donde la parte C permite establecer un flujo entre el cuerpo de la pipeta y una de las vías. Aspirando por B la pipeta se llena con el líquido, y se cierra con un giro de la válvula en C, luego el líquido es liberado rotando a favor de la vía A de modo que el aire a nivel atmosférico puede entrar en la pipeta.



Figura 2.1: Pipeta de Knudsen [Eni15].

Posteriormente a éste método surgieron otros como el de Grasshoff y Wensk en 1972 [Shk15]. Donde usan en lugar de una pipeta de Knudsen, una bureta con el objetivo de aumentar la precisión del análisis. Después, el cálculo potenciométrico se ha utilizado para aumentar la precisión de la valoración con el nitrato de plata.

Reedburgh y Carpenter, en 1964, utilizaron un sistema electroquímico diferencial para

la detección final. Este método requiere de una gran habilidad en el laboratorio así como la disposición de enormes cantidades de tiempo para realizar la medición. En 1970, Jarner y Aren inventan un método semi-automático para la valoración de clorinidad, reduciendo el tiempo necesario por muestra a 5 min[Shk15]. De este método hay que mencionar la conversión que se realiza entre la clorinidad y la salinidad, que se realiza mediante la ecuación 2.1.

$$S(\text{‰}) = 1,80655 \cdot Cl(\text{‰}) \quad (2.1)$$

Donde S será la salinidad y Cl la clorinidad. Aunque tras la aparición de la escala práctica de la salinidad en 1978 gracias a Dauphinee [KTD78], se puede determinar por la ecuación compensada con la temperatura [Tho+80], según la expresión 2.2. Siendo S la salinidad, R_t el ratio de clorinidad dependiente de la temperatura, a_i constantes, y ΔS el incremento de salinidad, que es dado por la ecuación 2.3, b_i también son constantes.

$$S = a_0 + a_1 R_t^{1/2} + a_2 R_t + a_3 R_t^{3/2} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{5/2} + \Delta S \quad (2.2)$$

$$\Delta S = \left(\frac{t - 15}{1 + 0,0162(t - 15)} \right) (b_0 + b_1 R_t^{1/2} + b_2 R_t + b_3 R_t^{3/2} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{5/2}) \quad (2.3)$$

$$a_0 = 0,0080, a_1 = -0,1692, a_2 = 25,3851$$

$$a_3 = 14,0941, a_4 = -7,0261, a_5 = 2,7081$$

$$b_0 = 0,0005, b_1 = -0,0056, b_2 = -0,0066$$

$$b_3 = -0,0375, b_4 = 0,0636, b_5 = -0,0144$$

Válido para $2 < S < 42$, donde R_t se expresa según la ecuación 2.4:

$$R_t = \frac{C(\text{de la muestra a temperatura } t)}{C(\text{disolución de KCl a temperatura } t)} \quad (2.4)$$

S determina la salinidad en la escala práctica (PSU), R_t la relación de conductividad y t la temperatura de la disolución en grados Celsius (C). Todos los valores desde a_0 hasta

a_5 y b_0 a b_5 son constantes. A la hora de calcular el ratio de conductividad ha de usarse la escala de $\mu S/cm$, mientras que la conductividad de la disolución de KCl puede medirse de la ecuación 2.5

$$C(\text{KCl a } t) = -0,0267243t^3 + 4,6636947t^2 + 861,3027640t + 29035,1640851 \quad (2.5)$$

2.2. Conductividad eléctrica

Como se ha indicado anteriormente, la valoración por clorinidad resulta tediosa, y muy lenta, por lo que a lo largo de los últimos años ha venido a sustituirle la medida de la conductividad eléctrica como una estimación relativamente certera de la salinidad[Wil14]. Se trata de un método para determinar la salinidad, bastante más rápido en utilización, pero ha de realizarse mediante una medida de forma indirecta.

Este método, en la forma básica, consiste en aplicar una corriente eléctrica a una sonda sumergida en la muestra objetivo, para posteriormente evaluar la respuesta en base a unos cálculos previos de calibración. El hecho de que la muestra tenga o no sales disueltas en forma de iones provocará que la medición varíe en función de dicha concentración, ya que aumentará la conductividad a más sales disueltas haya en la muestra, y disminuirá cuando menos haya. De este modo la salida en voltaje será una determinación indirecta de la cantidad total de sólidos disueltos en el agua.

Se puede establecer como ejemplo de la circuitería básica un modelo como el indicado en la figura 2.2, donde una tensión alterna excitará una resistencia equivalente igual a la suma del valor del agua y una resistencia de calibración, más un condensador de desacoplo.

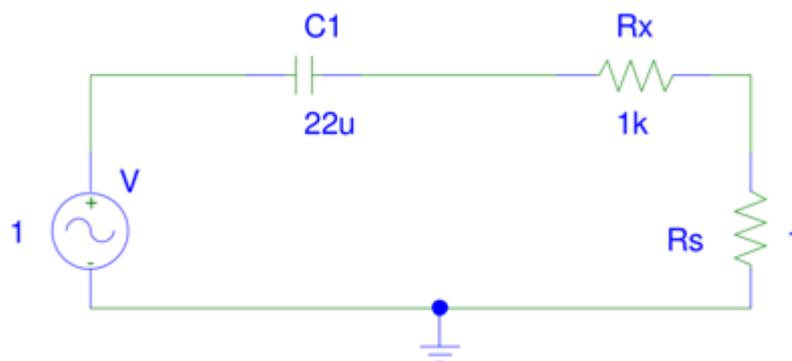


Figura 2.2: Circuito dependiente de la conductividad.

Se aplica una tensión alterna V (utilizando corriente alterna en lugar de corriente directa para evitar los efectos de electrólisis en los bornes iniciales) filtrando posibles efectos de suma en continua mediante un condensador. Esto provocará que en los bornes de R_s aparezca una tensión, también alterna, en función de la variación de R_x , que será la resistencia que presente la muestra entre dos sondas metálicas. Por lo que será necesario partir de la relación óhmica de los materiales que vendrá a ser la formulación en formato de ley, de datos empíricos para cierto rango [Web+12]. En su forma global, la ley de Ohm define la corriente total que atraviesa un conductor de acuerdo con su diferencia de potencial, según la expresión 2.6 [RB17].

$$I = GV \rightarrow I = \frac{V}{R} \rightarrow V = IR \quad (2.6)$$

Donde G será la conductancia, también expresada como la inversa de la resistencia que presenta el propio conductor ($1/R$), y V el voltaje. Esta expresión es válida para cualquier conductor cuando se trata de pequeños voltajes (diferencias de potencial). Aunque su forma local ofrece aún más información, como la densidad de corriente y el gradiente de tensión [Yul15], tal y como se muestra mediante la ecuación 2.7, que aunque no sea necesario ahondar en su forma primigenia, cabe mencionar su derivación de las ecuaciones de Maxwell[Bor82].

$$j^\alpha(x) = -\sigma(x) \frac{\delta}{\delta x^\alpha} V(x) \quad (2.7)$$

Se considera la intensidad circulante aplicando la ley de Ohm en el circuito presentado anteriormente como ($R_s \ll R_x$), ecuación 2.8, se obtendrá una tensión de salida en los bornes de R_s en consecuencia de la intensidad circulante, V_s , ecuación 2.9.

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{R_s + R_x} \rightarrow R_x \gg R_s \rightarrow \bar{I} \sim \frac{\bar{V}}{R_x} \quad (2.8)$$

$$V_s \sim \frac{V}{R_x} R_s \rightarrow R_x \sim \frac{V}{V_s} R_s \quad (2.9)$$

Aparece la resistencia, por lo que se aprecia la conductancia como su inversa en la ecuación 2.10. Y la conductividad como una proporción geométrica de la misma conductancia en función del parámetro característico de la sonda (que se calculará en posteriores

apartados) en la ecuación 2.11.

$$\frac{1}{R} = \frac{V_s}{VR_s} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{kV_s}{R_sV} \rightarrow k' = \frac{k}{R_sV} \rightarrow C = k'\overline{V_s} \quad (2.11)$$

Este método es el que se utilizará en este proyecto, por lo que se explicará con todo detalle en los siguientes apartados, a medida que se vayan calculando parámetros y dimensiones.

2.3. Métodos de medida

Como se mencionó anteriormente, la salinidad se estimará mediante la medida de la conductividad eléctrica de la muestra. Para realizar esto pueden establecerse distintas opciones de circuitería a la hora de obtener una medida variable en función de la cantidad total de sólidos disueltos en el agua. Una de esas opciones es la de presentar un puente de medida equilibrado para corriente alterna excitando la entrada en AC, y otra sería la utilización de un método por detección síncrona, que será el método que finalmente se escogerá, para comparar ambos se explicará a continuación cada uno de ellos.

2.3.1. Puente de medida equilibrado

Esta opción podría emplearse si el rango a medir no es muy amplio debido a sus características respecto al modo de medición. Para comenzar podría utilizarse un oscilador mediante un puente de Wien para la señal de excitación del circuito de medida [Jac04], siendo su estructura la mostrada en la figura 2.3.

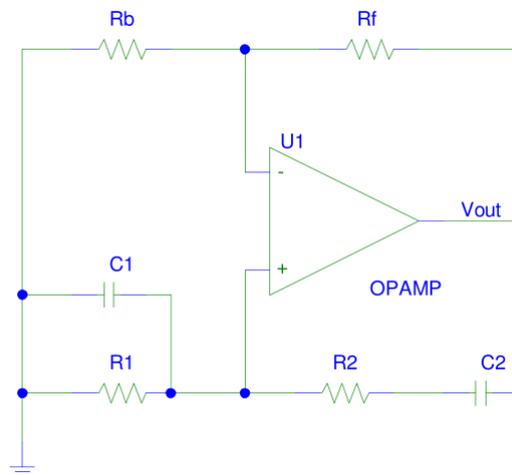


Figura 2.3: Oscilador por puente de Wien.

Está compuesto por un filtro paso-banda para la realimentación positiva, y permite la salida de un rango de frecuencias elevado para la onda de excitación. Fue el primer producto desarrollado por los socios Hewlett y Packard, un oscilador de precisión por puente de Wien.

A continuación de la onda de excitación, habría que incluir un puente de medida equilibrado como el de la imagen 2.4:

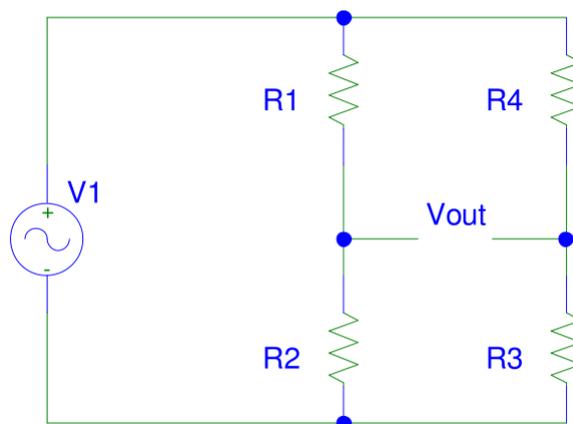


Figura 2.4: Puente de medida AC.

Donde se obtendrá un voltaje de salida en función de una de las impedancias que

resultase variable (podría ser R1, R2, R3 o R4), es decir, como la sonda de medida que será dos electrodos sumergidos que actuarán como una resistencia variable en función de la conductividad. Dicho voltaje, será previsiblemente muy bajo, por lo que sería oportuno amplificar la señal mediante un amplificador de instrumentación, además de que carecerá de rango suficiente para mediciones situadas en escalas logarítmicas como es el caso de este trabajo. Una vez amplificada, y mediante la inclusión de un diodo ideal en serie con un filtro paso bajo se obtendría una salida en DC que resultará de la medida indirecta de la salinidad.

El diodo ideal que permitiría el paso de corrientes de pico se constituiría con el esquema eléctrico 2.5.

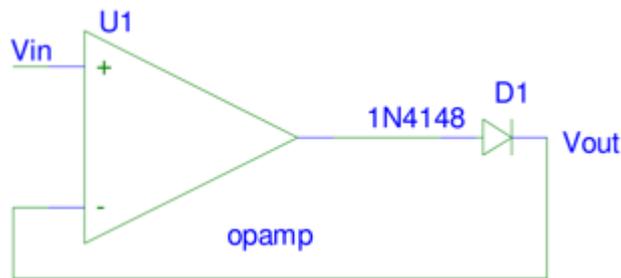


Figura 2.5: Diodo ideal.

Un filtro paso bajo a su salida estabilizaría la señal para realizar la medida en DC. Pero como se ha indicado, este método serviría únicamente para rangos de medida pequeños y además con cierta amplitud a la salida del propio sensor. Por lo que mediciones de salinidad donde las salidas sean muy pequeñas en rangos muy grandes no sería apropiado usar el puente de medida.

2.3.2. Detección síncrona

Este será el método que finalmente se utilizará para el diseño e implementación del aparato de medida a desarrollar en este trabajo. Con la detección síncrona [Sys15] es posible realizar mediciones de hasta nanovoltios en cuanto a corriente alterna se refiere, dado a que el propio método filtra la señal de salida de acuerdo con la frecuencia de oscilación de la señal excitadora, es decir, es sensible a la fase. De hecho, con el método de detección síncrona es posible medir señales que estén tapadas por el ruido.

Para conocer los motivos del uso de la detección síncrona se pone como ejemplo una

medida objetivo de $10nV$ con una frecuencia de $10kHz$ en forma senoidal [Joh94]. Hará falta amplificar la señal por encima del ruido, y un buen amplificador de bajo ruido tendrá alrededor de $5nV/\sqrt{Hz}$ de ruido a la entrada. Eso quiere decir que si el ancho de banda del amplificador fuesen $100kHz$ y una ganancia de 1000 se podría esperar una salida de $10\mu V$ sobre un ruido de $1,6mV$. No se tendrá una salida apropiada a no ser que se filtre la señal para una frecuencia concreta de interés, es decir, la propia frecuencia a la que el circuito es excitado. Esto se conocerá como la frecuencia de referencia. Para obtenerla habrá que generarla de algún modo, ya sea mediante un oscilador, un resonador o un generador. Una vez se consigue cierta señal de excitación con una frecuencia de referencia, se pasa a excitar el circuito de medida, figura 2.6.

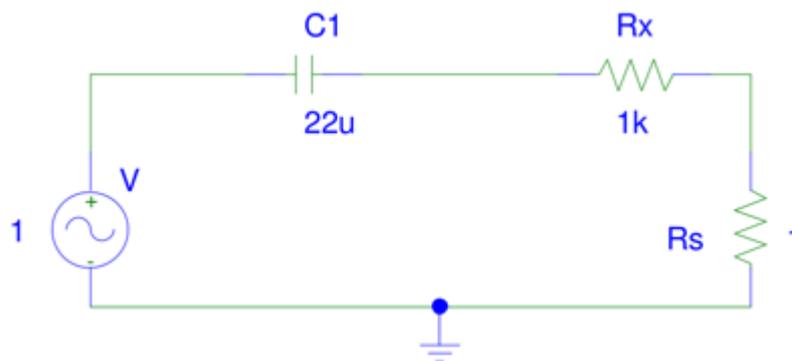


Figura 2.6: Ejemplo de módulo sensor para el circuito de medida.

Siendo la sonda de medida R_x , se obtendrá un voltaje en alterna en los bornes de R_s . Suponiendo que nuestra excitación tiene la forma senoidal de la ecuación 2.12.

$$V = \bar{V}_0 \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

Tras el paso por C1 se eliminará cualquier componente en continua y por tanto caerá potencial en función de R_x que se verá reflejado en los bornes de R_s con cierto retraso en la fase (puede darse el caso o no), el voltaje de salida del circuito de medida vendrá dado por la expresión 2.13

$$V_{R_s} = A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.13)$$

Una vez se tiene el voltaje de salida, para realizar la detección síncrona, se multiplica esa medida con la señal de excitación que tendrá nuestra frecuencia de referencia. Se

multiplicará de manera analógica con el esquema conceptual 2.7. Teniendo como salida la expresión 2.14, de acuerdo con las identidades trigonométricas.

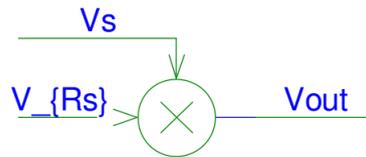


Figura 2.7: Multiplicación analógica.

$$V \cdot V_{R_s} = \frac{A \cos(2\omega t + \phi) + A \cos(\phi)}{2} \quad (2.14)$$

Una vez se tiene dicha señal, y suponiendo que el desfase es nulo, se puede filtrar la salida para eliminar la componente ω y obtener una señal final del tipo $A/2$ que resultará directamente proporcional a la amplitud de la señal a través de R_s . Con dicha señal, ya se podrá trabajar y operar conforme sea necesario para obtener la salida deseada, ya que se tiene una señal DC final dependiente de la conductividad que presente la sonda en forma de R_x . Luego, para realizar la detección síncrona habrá que idear un sistema de multiplicación analógico, aunque en realidad se puede encontrar ya integrado y fabricado dentro de una misma pastilla el multiplicador.

En la figura 2.8 se observa una respuesta característica en frecuencia del filtro que habrá de implementarse. La detección síncrona también se puede encontrar en la bibliografía con el término “lock-in” [Joh94], que hace referencia a la fijación de fase de referencia que se tomará con la señal. La fase entre las dos señales que se multiplicarán analógicamente no puede cambiar nunca ya que podría interferir de manera significativa en el proceso.

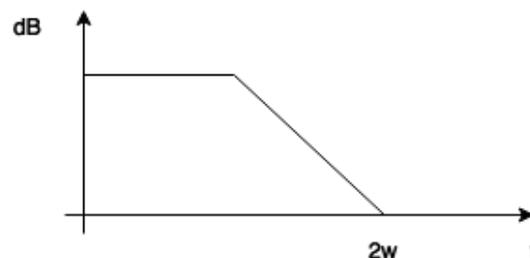


Figura 2.8: Ejemplo de filtro para eliminar la componente omega.

3

Diseño e implementación del sistema

En este capítulo se tratará todo lo referente al diseño del dispositivo, así como de la implementación virtual y física realizada en cualquier caso. Para llevar a cabo el diseño e implementación del sistema, se desarrollarán en este capítulo; las especificaciones necesarias a cumplir en el diseño, revisar las distintas alternativas de las que podrían disponerse, la elección justificada de cada una de ellas y el desarrollo teórico de la sonda de medida.

En el caso de una implementación virtual, se desarrollará el apartado de simulación correspondiente para contrastar los resultados con la alternativa que, en otro caso, haya sido implementada físicamente.

La elección de los dispositivos responderá a motivos que se verán a continuación en el apartado de especificaciones. Donde se conocerán los requerimientos básicos del sistema de medida, tales como el consumo energético, la movilidad, la funcionalidad y el costo de fabricación.

3.1. Especificaciones necesarias

Para implementar el diseño, primero hay que realizarlo, y por tanto conocer las especificaciones que se quieren cumplir una vez finalizada la fase de implementación. En este caso, se tendrán requerimientos en cuanto a energía, rango de medida, portabilidad del instrumento de medida, su coste final de fabricación y la facilidad en el manejo y la construcción. La primera especificación que se presenta, la más importante, es el rango de medida. Debido a las características paramétricas que ofrecerá el agua en cuanto a conductividad, será necesario trabajar en una escala logarítmica. Por lo que el fondo de

escala será muy amplio y habrá que tenerlo presente a la hora de diseñar.

El rango de medida que inicialmente se pretende es el que comprende la salinidad de aguas ultra-puras y las de mar, sin llegar a la salmuera. Es decir, un rango de entre los $5,5\mu S/m$ y los $5S/m$. Conforme más rango se pueda medir con el aparato mejor, pero el mínimo se establecerá entre el agua pura y la potable, entorno a los $20\mu S/m$ y $50mS/m$.

Respecto a la energía, se debe tener en consideración que el aparato debe ser portátil y capaz de medir con cierta autonomía, que por ejemplo puede conseguirse mediante el uso de baterías o pilas químicas. Y finalmente, en lo que se refiere a fabricación y facilidad de manejo, se deberá intentar compenetrar ambas necesidades. El circuito integrado podrá ser de muy sencillo manejo, mientras que la fabricación será ardua según el formato de empaquetado de la pastilla. Habrá que buscar un equilibrio entre ambas especificaciones.

3.2. Dispositivos

Una vez elegido el método, por detección síncrona, queda implementar a este caso particular todos los conceptos necesarios para que pueda realizarse la medida. En primer lugar, se parte de un circuito básico que se puede apreciar en la figura 3.1, que consiste en una fuente de excitación en alterna, un elemento de desacoplo, y un divisor resistivo del que se obtendrá la medida de forma indirecta.

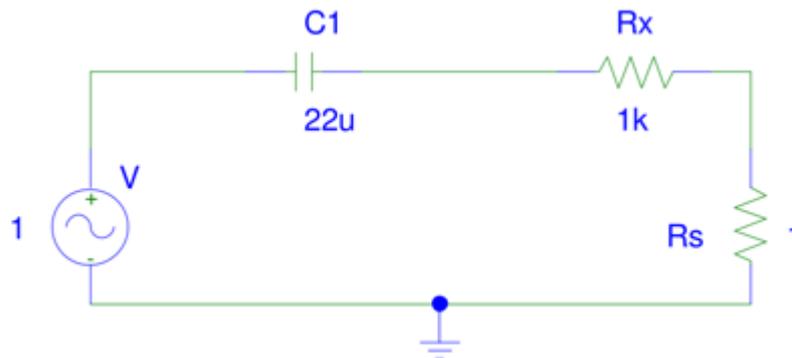


Figura 3.1: Circuito básico

Este circuito no se encuentra implementado en un circuito integrado. Se conocen los elementos necesarios, por ejemplo; la fuente de excitación, y el multiplicador analógico. Partiendo de estos elementos necesarios se realizará una búsqueda de dispositivos que puedan ser de utilidad a la hora de implementar físicamente el diseño.

3.2.1. Multiplicadores analógicos

Este tipo de dispositivos se caracterizan en electrónica por tener la capacidad de tomar dos señales, y posteriormente producir una salida que resultará el producto de las señales tomadas. Estos circuitos se pueden emplear para realizar operaciones como raíces y cuadrados.

El primer multiplicador analógico que se encontró fue el **MC1495**. Es un multiplicador monolítico de cuatro cuadrantes que operará, según la ficha técnica [Sem01], en el principio de transconductancia variable (OTA, unos circuitos integrados clásicos que siguen ese principio son el CA3080 y el LM13600). Un amplificador de transconductancia variable, opera de manera análoga a un amplificador operacional común, sin embargo, en vez de tener una salida en tensión dependiente de las tensiones de entrada, será una salida en corriente dependiente de las tensiones de entrada. La salida tendrá la forma de la expresión 3.1:

$$I_A - I_B = \Delta I = \frac{2V_X V_Y}{R_X R_Y I_3} \quad (3.1)$$

Donde I_A e I_B serán las corrientes en los pines 14 y 2 de la figura 3.2, y V_X y V_Y serán los voltajes de entrada al multiplicador en el dispositivo. Este circuito integrado se usa comúnmente para multiplicar, dividir, hacer la raíz cuadrada, detección de fase, doblador de frecuencia, modulador o demodulador equilibrado y control electrónico de ganancia. Sin embargo presenta un error del 4% de forma máxima para la entrada, y respecto a la temperatura. Por ello que al usarse en la escala logarítmica con la que se trabaja podría no funcionar muy adecuadamente.

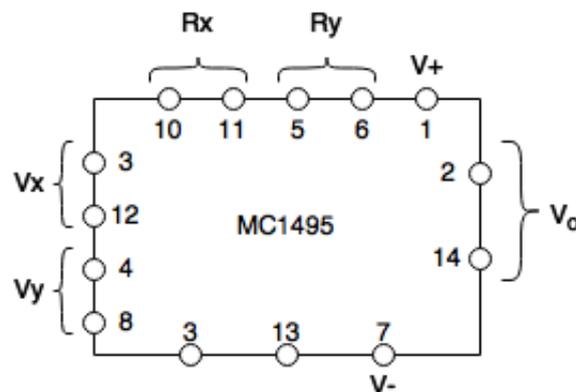


Figura 3.2: Diagrama I/O del dispositivo MC1495.

A continuación, el segundo dispositivo que se encontró y cumplía la función de multiplicador analógico es de la empresa Analog Devices, el **AD633** [Dev15] del que se puede ver el diagrama I/O en la figura 3.3. Según sus especificaciones, presentará un error del 2% máximo en toda la escala, por lo que en ese aspecto ya sería más conveniente que el anterior dispositivo de ON Semiconductor. El AD633 también es un multiplicador en 4 cuadrantes, sin componentes externos requeridos, a diferencia del MC1495. Tiene una alta impedancia de las entradas X e Y. Está calibrado con técnicas láser, de ahí que pueda permitirse menos error en toda la escala que el MC1495. Este dispositivo requiere una alimentación simétrica de entre $\pm 8V$ a $\pm 18V$, por lo que ya incluiría una exigencia adicional respecto al MC1495, que sólo requería una alimentación positiva de entorno a los (5-10)V.

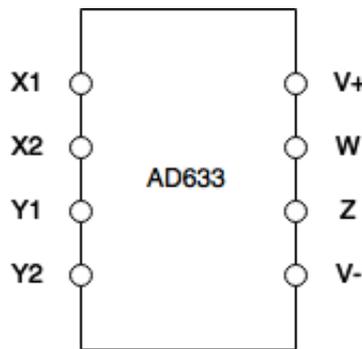


Figura 3.3: Diagrama I/O del dispositivo AD633.

En este circuito, se obtendrá una salida que no será propia del principio de transconductancia variable, y tendrá la forma de la ecuación 3.2.

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} + Z \quad (3.2)$$

Se suele emplear para usos similares al anterior, ya que realizan prácticamente la misma función. Aunque después de todo, la funcionalidad de los dos circuitos integrados resulta la misma, un multiplicador analógico, sin embargo convendría encontrar un circuito integrado que fuese capaz de generar la propia corriente de excitación en AC, tomar medida de la resistencia R_s del circuito básico, realizar el proceso de detección síncrona y ofrecer una salida con impedancia determinada.

Un circuito que incluye los elementos mencionados, que se encontró en el catálogo del fabricante Analog Devices, fue el ADA2200 [Dev14b].

3.2.2. Demoduladores síncronos

La demodulación síncrona es una técnica de demodulación de señal modulada en amplitud que se basa en la multiplicación de una señal obtenida por otra portadora de frecuencia y fase.

Dentro de este tipo de dispositivos se encontró el **ADA2200**, también de la empresa Analog Devices. Se trata de un demodulador síncrono con filtro analógico configurable. Este circuito integrado ya no constituye únicamente un multiplicador analógico, sino que implementa un generador de onda AC a una frecuencia determinada de manera externa, un filtro paso bajo, un filtro programable, y el propio multiplicador analógico así como de un módulo de programación interno. El diagrama interno de este dispositivo es el que se muestra en la imagen 3.4.

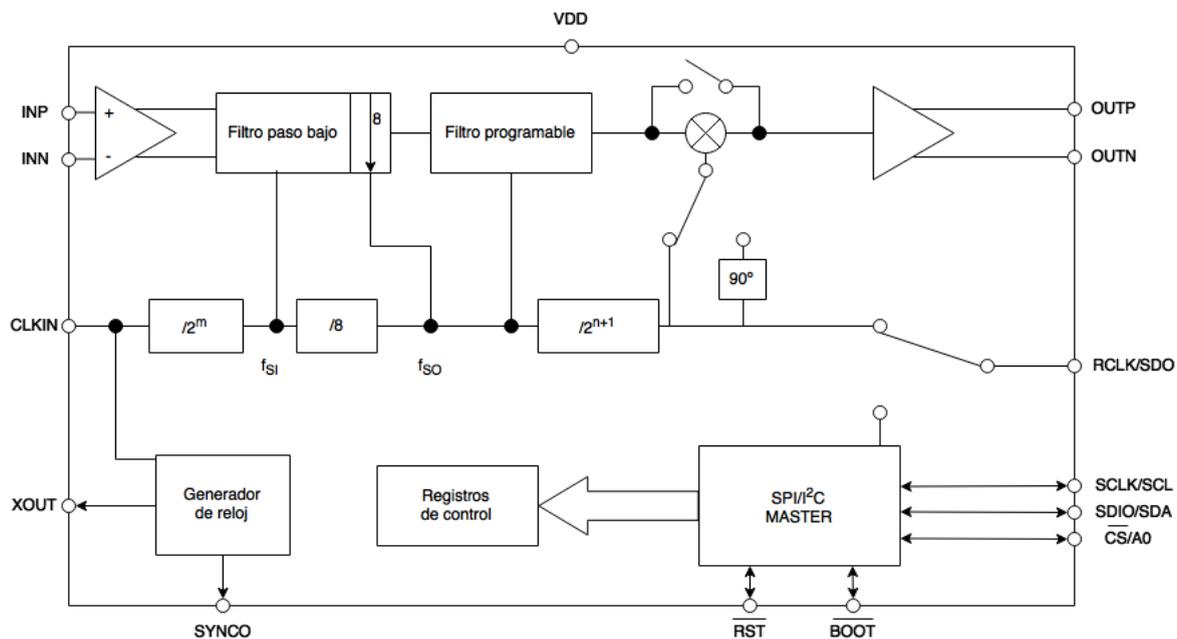


Figura 3.4: Diagrama interno del circuito integrado ADA2200 [Dev14b].

Se observa que las dos primeras patillas en la parte izquierda, que corresponden a la entrada diferencial del elemento de medida, en nuestro caso V_s . La patilla CLKIN será la que defina el régimen de operación frecuencial del dispositivo, ya que en función de la frecuencia de reloj que se introduzca, se filtrará a otros rangos de frecuencia y la señal de excitación también cambiará en frecuencia, no en amplitud. Por ejemplo, dada una frecuencia de entrada en CLKIN de 80kHz , se obtiene una f_{S0} de 10kHz y, en la configuración por defecto, una salida en RCLK de $1,25\text{kHz}$. El filtro programable se

configurará con las patillas SCLK, SDIO, CS, RST y BOOT, aunque en este trabajo no será necesario utilizarlo. Se puede apreciar el diagrama de procesos que se realiza internamente en la configuración lock-in del ADA2200 en la figura 3.5.

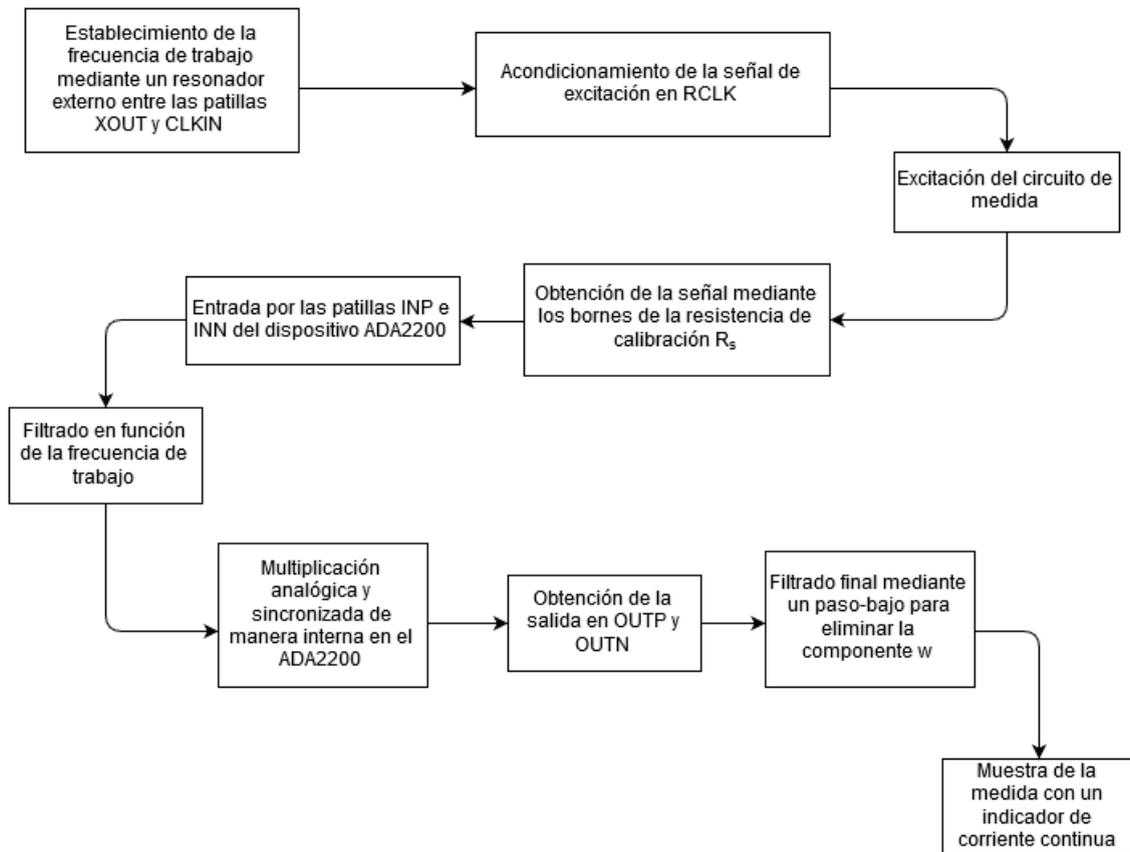


Figura 3.5: Diagrama de procesos para el ADA2200.

Después de haber filtrado la señal, se encuentra el multiplicador analógico, que multiplicará dicha señal filtrada por una señal que tendrá la frecuencia de referencia igual a la de excitación, es decir, aplicará el método de detección síncrona internamente.

Para introducir la frecuencia al dispositivo, existen dos opciones, utilizar un dispositivo aparte que la genere, ya sea bien un NE555 (dispositivo clásico para generar pulsos de reloj), o un VCO (oscilador controlado por tensión). Cualquiera de ellos resulta más complejo que la tercera opción, utilizar un resonador. Un resonador facilitaría el diseño, ya que únicamente se tendría que conectar entre las patillas XOUT y CLKIN, con resistencias determinadas en serie y paralelo para mejorar el comportamiento, y no haría falta utilizar ningún otro dispositivo aparte del ADA2200. Esta última opción será la elegida debido a su facilidad de implementación.

Una vez que se la frecuencia se establece, se utiliza la ficha técnica del fabricante, donde aconseja un esquema para aplicaciones de detección síncrona. En él, establece a frecuencia en CLKIN con un reloj externo, aunque ya se ha decidido usar el resonador, por lo que ese elemento se obvia. Posteriormente, aconseja colocar condensadores a la entrada de la alimentación, conectados a tierra, para evitar las componentes en AC en VDD. Luego, obtenida la señal de excitación RCLK, incluye un elemento de acondicionamiento antes de entrar al circuito. Este elemento de acondicionamiento puede ser útil según la aplicación concreta que se le vaya a dar al circuito, pero en este caso no se utilizará.

Después, se aplica dicha señal al sensor, que vendrá a ser nuestro circuito de medida básico (el elemento de desacoplo en serie con un divisor resistivo compuesto por la sonda y una resistencia implementada en el circuito). Y una vez se obtiene la medida, se amplificará si es necesario con un amplificador de instrumentación antes de introducirla en el ADA2200. Al ser una entrada diferencial, se debe establecer la referencia correctamente mediante un adaptador de impedancia si también fuese oportuno. Una vez el circuito integrado recibe la señal, tan sólo hay que preocuparse de los pasos que permiten los filtros, y modificarlos si fuese necesario. Dado que no se utilizará el filtro programable, es posible que se añada un filtro paso bajo justo a la salida en las patillas OUP y OUTN, que son las patillas que ofrecerán la tensión de salida diferencial respecto a la referencia establecida a la entrada en INP e INN. El circuito integrado, según sus especificaciones, debe alimentarse de una tensión DC de entre 2,6V y 3,3V.

Y por último, quedaría acoplar un elemento que sirva para visualizar el voltaje a la salida, como podría ser un osciloscopio o un voltímetro.

3.3. Desarrollo teórico de la sonda de medida

En este apartado se especificarán los cálculos necesarios en la fase de diseño, teniendo como primer cálculo el de la sonda de medida o electrodos. Para ello se requerirá del uso del software de Matlab.

El circuito que se ha venido representando varias veces hasta ahora, que comprende a la circuitería básica del aparato de medida, tiene como elemento clave R_x , la sonda sumergible en el líquido. Consistirá en dos electrodos cilíndricos situados a cierta distancia y en paralelo, de un material que sea capaz de conducir fácilmente la corriente. Dicha sonda actuará de resistencia variable, y su resistencia vendrá dada por la cantidad de sales disueltas en el agua, que podrán favorecer la conductividad en caso de que abunden o no permitirla del todo en caso de que aparezcan en una concentración muy pequeña. La sonda se fabricará de modo que pueda realizarse un cálculo integral fiable, y su diseño se

precisará para que no constituya un engorro a la hora de fabricarla. Debe tener ciertos parámetros característicos, como la longitud de los cilindros, su diámetro, la distancia a la que estarán situados y el material que la forme. Todos ellos influirán a la hora de hacer de la sonda una resistencia variable en función de la conductividad del agua. Y para conocer a priori una respuesta matemática que sirva de base en la fase de diseño, se calculará en base a estos parámetros su comportamiento esperado de la sonda.

Para determinar el valor esperado de R_x se habrá de estudiar previamente el diseño de los electrodos en cuanto a forma geométrica, es decir, caracterizar la sonda [Ind15]. En la figura 3.6 se muestra un esquema de la su geometría. Para realizar la caracterización de la sonda de prueba se comenzará con la relación matemática y dimensional existente entre la conductividad y la conductancia en función de una constante (k), expresada en m^{-1} , que depende de la geometría de la sonda, según la ecuación 3.3

$$\sigma = kG \quad (3.3)$$

Siendo σ la conductividad específica del material, expresada en S/m, y G la conductancia como la inversa de la resistencia, $1/R$, expresada en S.

A partir de aquí, para conocer k tan sólo se ha de despejar de la relación anterior y calcular simbólicamente la conductividad y la conductancia. Dado que la conductividad se quedará expresada en su propia unidad, se pasa a calcular la conductancia particular de este caso como la inversa de la resistencia, es decir, I/V .

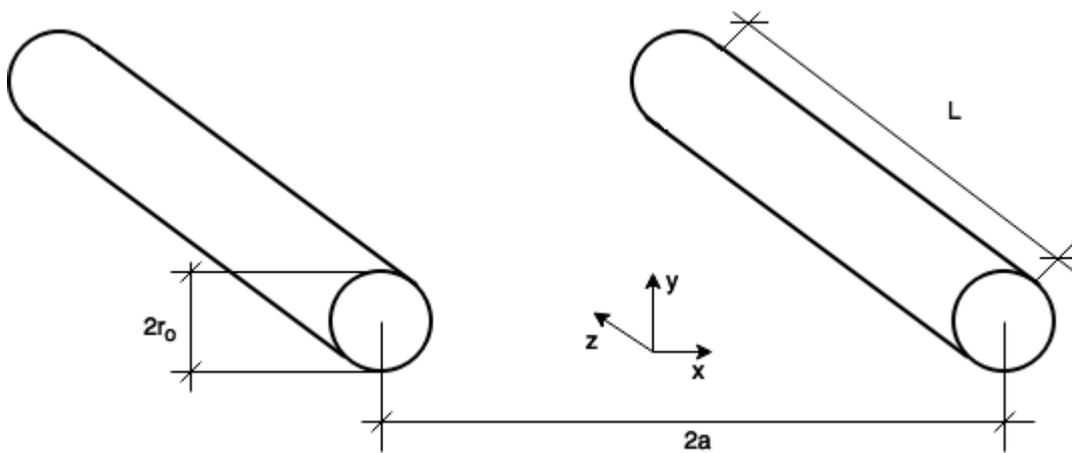


Figura 3.6: Esquema de la geometría de la sonda de medida.

Para el cálculo del voltaje, se aplica aplicar la ley de Gauss en la ecuación 3.4. En el

mismo instante en el que se aplica un voltaje entre los electrodos se crea un campo eléctrico cargado por unidad de longitud, λ . Siendo ϵ_0 la permitividad del vacío. Y la superficie el producto del perímetro de la base por la altura L (dz), que deriva a la expresión 3.5.

$$\oint_V \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q}{k\epsilon_0} \quad (3.4)$$

$$E_r 2\pi r dz = \frac{\lambda}{\epsilon_0} dz \rightarrow E_r = \frac{\lambda}{2\pi k\epsilon_0 r} \quad (3.5)$$

Donde $r > r_0$ es la distancia desde el eje de los cilindros y r_0 el radio de los mismos. El campo eléctrico total en cada punto será la sumatoria de todos los campos radiales de cada uno de los cilindros. Esa sumatoria tendrá la dirección del eje x y donde cruza con el plano y - z .

El campo a lo largo del eje x entre los dos electrodos calculado mediante la suma de los componentes de cada uno de ellos. Se expresa según la ecuación 3.6.

$$E_{x|y=0} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 k} \left(\frac{1}{a+x} + \frac{1}{a-x} \right) = \frac{a\lambda}{\pi k\epsilon_0 (a^2 - x^2)} \quad (3.6)$$

Y de forma análoga con el campo normal al eje y , de nuevo en la dirección de x cuando $y=0$, queda dado por la expresión 3.7.

$$E_{x|x=0} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 k} \left(\frac{1}{a+x} + \frac{1}{a-x} \right) = \frac{a\lambda}{\pi k\epsilon_0 (a^2 + y^2)} \quad (3.7)$$

Dado que el campo eléctrico es conservativo, el voltaje entre los electrodos es la línea integral del campo a lo largo del camino entre un electrodo y el otro. En este caso, a lo largo del eje x , el camino más corto.

Integrando la expresión anterior, resulta la ecuación 3.8.

$$\begin{aligned} \int_{-a+r_0}^{a-r_0} E_x dx &= \frac{\lambda}{\pi k\epsilon_0} \int_0^{a-r_0} \frac{2adx}{(a^2 - x^2)} = \\ &= \frac{\lambda}{\pi k\epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{a+x}{a-x} \right) \right)_0^{a-r_0} = \frac{\lambda}{\pi k\epsilon_0} \ln \left(\frac{2a}{r_0} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Una vez conocido el voltaje, falta conocer la intensidad para poder determinar la constante geométrica. Siendo un plano que divide completamente ambos electrodos, en nuestro caso el plano y-z, expresada según 3.9.

$$I = \int_{z=0}^L \int_{y=-\infty}^{\infty} \frac{\sigma \lambda}{2\pi k \epsilon_0} \frac{2ady}{(a^2 + y^2)} dz = \frac{2\sigma}{\pi k \epsilon_0} \arctan\left(\frac{y}{a}\right)_0^{\infty} = \frac{\sigma \lambda L}{k \epsilon_0} \quad (3.9)$$

Ahora que se conoce la expresión del voltaje y la intensidad, se puede determinar k mediante la ecuación 3.10.

$$G = \frac{I}{V} \rightarrow k = \frac{\sigma}{G} = \frac{1}{\pi L} \ln\left(\frac{2a}{r_0} - 1\right) \quad (3.10)$$

Para terminar la caracterización hay que calcular la constante geométrica de la parte inferior de los cilindros, la base. Se identifica entonces la resistividad, ρ_s , como la ecuación 3.11.

$$\rho_s = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{1}{\sigma L} \quad (3.11)$$

Combinando con las ecuaciones de voltaje e intensidad anteriores, se obtiene también la resistencia que ofrece la superficie, ecuación 3.12.

$$R = \frac{\rho_s}{\pi} \ln\left(\frac{2a}{r_0} - 1\right) \quad (3.12)$$

La constante geométrica, que multiplicando por la resistencia produce la resistividad queda según la ecuación 3.13.

$$\rho_s = k' R \rightarrow k' = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{2a}{r_0} - 1\right)} \quad (3.13)$$

Finalmente, la suma de ambas constantes geométricas resultará en el parámetro característico de la sonda, expresado según la ecuación 3.14.

$$K = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{2a}{r_0} - 1\right)} + \frac{1}{\pi L} \ln\left(\frac{2a}{r_0} - 1\right) \quad (3.14)$$

3.4. Implementación del sistema

De acuerdo con el apartado de diseño se implementará el método de la detección síncrona. Para realizarlo se utilizarán dos de los circuitos integrados explicados en apartados anteriores, el AD633 y el ADA2200, ofreciendo dos alternativas para solucionar el problema de medición de salinidad. Por los siguientes motivos:

- Particularmente conviene implementar el diseño con el ADA2200 debido a que integra varios de los elementos necesarios. Pero dicho circuito integrado no ha sido posible de simular en el entorno de simulación de OrCAD. Por tanto se implementará un diseño de forma directa y basado únicamente en las indicaciones que el fabricante da en la ficha técnica.
- Debido a que no se dispone del modelo de simulación del ADA2200 se implementará un diseño realizado con el AD633 como alternativa. Este último sí está disponible en las librerías del software y se puede realizar el diseño e implementación del artefacto por completo en el computador, antes de pasar a la fabricación física.

En primer lugar se darán los diseños y esquemas referentes al ADA2200 y a continuación de los mismos los del AD633, con sus simulaciones.

3.4.1. Esquema y simulación

Los dos diseños (el del ADA2200 y AD633) se configurarán de tal forma que sean capaces de medir los mismos valores de conductividad y salinidad. Se implementará físicamente el diseño del ADA2200 por llevar incorporados los módulos de excitación y multiplicación, pero por lo explicado en el apartado anterior también se dará una alternativa completamente documentada y sólida, la del AD633.

Comenzando con el **ADA2200**, teniendo en cuenta que no se dispone de un modelo de simulación, se seguirán las indicaciones de la ficha técnica para aplicaciones de detección síncrona. En el documento técnico del dispositivo [Dev14b] se encuentra el apartado titulado 'Lock-in amplifier application' en el que se explica el tipo de configuración, apreciable en la figura 3.7, necesaria para realizar este tipo de operaciones. Dicha configuración será la adecuada para realizar medidas en amplitud, con sincronismo de fases, tal como se explica en el apartado correspondiente el método de la detección síncrona.

Para establecer la frecuencia de trabajo, el esquema sugiere un reloj externo conectado a la patilla CLKIN. Sin embargo, se usará un resonador para disminuir la necesidad de

dispositivos externos alimentados. Para conectar el resonador se seguirá la referencia de una nota de aplicación para el ADA2200 [Dev14a]. La frecuencia más baja disponible para esta implementación es de 384kHz, lo cual establece la frecuencia de salida para la señal en RCLK/SDO en 6kHz según el diagrama interno que se muestra en la figura 3.7.

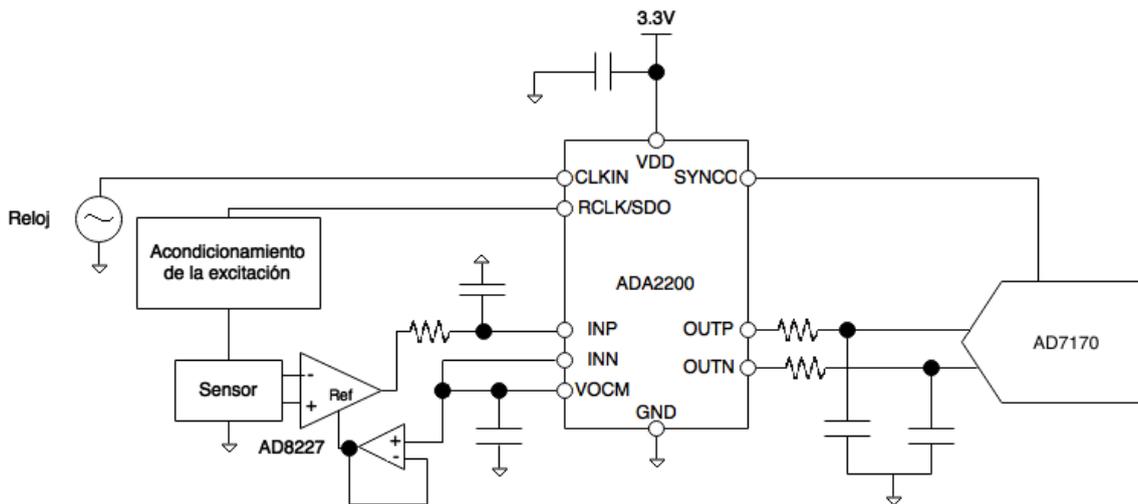


Figura 3.7: Esquema recomendado para aplicaciones Lock-in.

A continuación de esa señal, Analog Devices recomienda un acondicionamiento de la señal de excitación, que en nuestro caso corresponderá a un comparador utilizando el dispositivo LT1490 para evitar faltas en el suministro de corriente y a un condensador de desacoplo de $22\mu F$. El condensador de desacoplo evitará cualquier que cualquier corriente continua excite el sensor, se requiere así debido a que lo que se excitará es un circuito con agua como una de sus resistencias. En el caso de que una corriente continua excite un electrodo sumergido, con el paso del tiempo acabaría apareciendo el fenómeno de electrólisis, por culpa del cual los electrodos podrían perder su funcionalidad debido a la reacción química.

Después del módulo de acondicionamiento de la señal de excitación, se presenta el módulo del sensor, que corresponderá únicamente a dos resistencias en serie, siendo la primera el agua en la cual se sumergirá la sonda (actuando como resistencia en función de la conductividad), y la segunda a una resistencia de 100Ω (denominada de calibración, ya que determinará el fondo de escala medible) de la cual se obtendrá la señal en sus bornes.

Con la señal obtenida, teniendo una tensión bastante débil para realizar la medida, se amplificará con un amplificador de instrumentación. Dicho amplificador deberá tener una referencia de tensión correspondiente a la señal que el ADA2200 tendrá en la patilla

VOCM, de forma que al pasar la señal, ésta esté montada sobre una tensión continua de $V_{cc}/2$. El amplificador de instrumentación que se utilizará será el INA128 por su disponibilidad de prácticas anteriores durante el curso.

Por último, después de todos los procesos internos que sufrirá la señal dentro del componente (filtro paso bajo, multiplicador,...) se obtiene una señal en las patillas de salida, que al filtrarse, corresponderá a la señal final. Esta señal tendrá la particularidad de ser sacada de forma diferencial, considerando como se indicó en el párrafo anterior, que debía montarse sobre VOCM la señal de entrada, por lo que habrá que transformarla a una referencia de tierra. Para ello, se empleará un amplificador de instrumentación como el anterior, el INA128, pero en este caso la referencia estará puesta a tierra, así a la salida se obtendrá un voltaje continuo y filtrado capaz de sacarse a través de casi cualquier instrumento de medida.

Cabe mencionar también que en caso de que el rango de salida sea pequeño, este último INA128, que originalmente tiene una resistencia de ganancia infinita y por tanto una ganancia unitaria, podrá configurarse para amplificar dicha señal en la medida que sea necesario y posible (a la hora de implantarlo sí se necesitará una amplificación en la salida) según la siguiente relación de ganancia (3.15) para el dispositivo INA128:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_g} \quad (3.15)$$

Después de todo lo anterior, la configuración del circuito queda como se indica en el esquema de la figura 3.8.

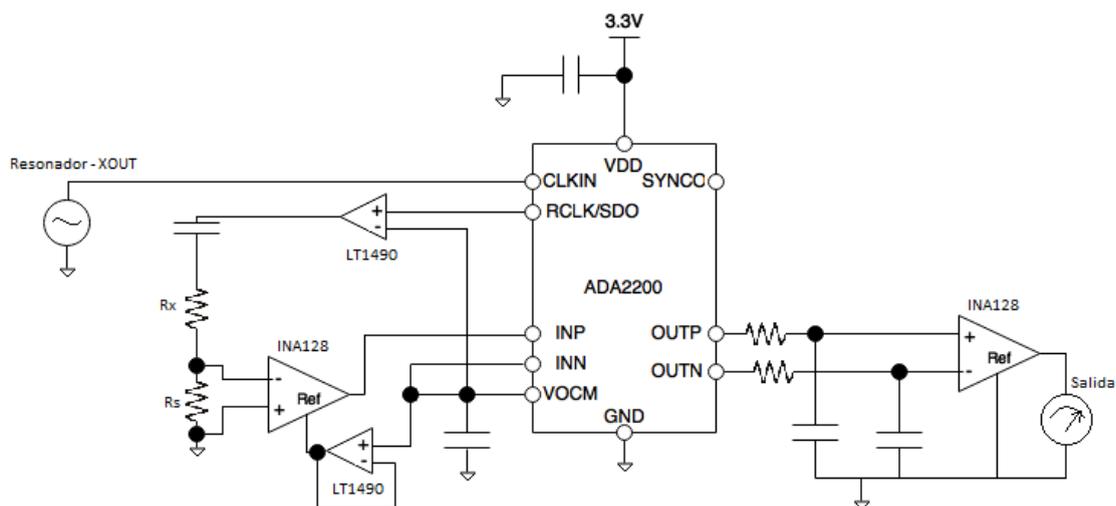


Figura 3.8: Esquema implementado.

Con dicho esquema, como se menciona anteriormente, no se podrán realizar simulaciones en el entorno de OrCAD debido a que no se dispone de la librería necesaria. Por lo que se comentarán los resultados directamente en el capítulo de calibración.

Ahora se continuará con el **AD633**. Con este componente se podrá simular y por tanto comprobar el funcionamiento de la implementación de una forma virtual. Dado que este dispositivo sólo incluye el multiplicador, hará falta una fuente de excitación externa. Para ello se ha elegido el componente NE555 por disponibilidad y conveniencia. El NE555 es un generador de onda cuadrada capaz de suministrar hasta 200mA, por lo que será útil. Se seguirá el mismo concepto que para el ADA2200, una señal de excitación que llegará al sensor compuesto por un divisor resistivo y al final un multiplicador que operará con la señal de la resistencia de calibración y la señal de excitación para ofrecer la salida. La salida finalmente será filtrada para poder observar la componente continua.

Para obtener la señal de excitación del componente NE555 se emplearán a las indicaciones del fabricante [Ins10] que aparecen en la ficha técnica. Según la configuración para una operación del dispositivo en modo estable se debe disponer el esquema de la figura 3.9.

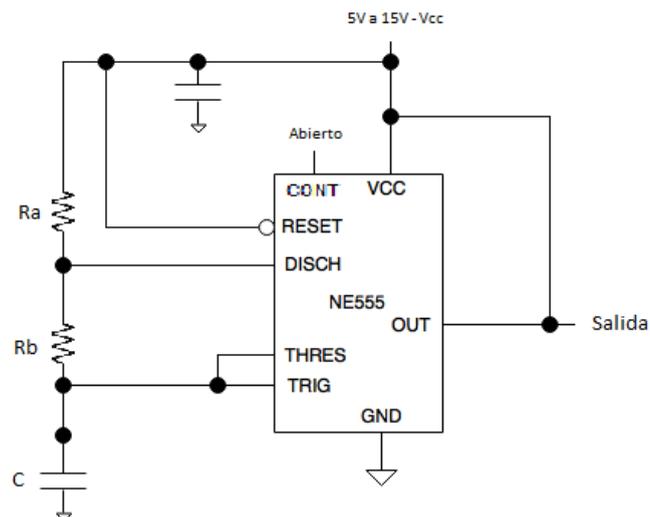


Figura 3.9: Esquema recomendado para operación a estable del NE555.

La tensión de salida en alto corresponderá a la tensión de alimentación, y la de salida en bajo a GND. Para determinar la frecuencia se emplearán las resistencias A y B, así

como del condensador C, según la expresión 3.16.

$$Frecuencia = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (3.16)$$

Estableciendo los valores de resistencias y condensador en los normalizados para que sea sencilla su implementación física, se alcanza una señal de excitación de frecuencia apropiada [FCD96], mediante la ecuación 3.17.

$$Frecuencia = \frac{1,44}{(100\Omega + 2 \cdot 1k\Omega)1\mu F} = 685,71Hz \quad (3.17)$$

Cuya respuesta se comprueba en la simulación y se muestra mediante la gráfica indicada en la figura 3.10. Donde se comprueba el periodo de transición hasta que el circuito alcanza el modo de oscilación entorno a los 0.5ms. El voltaje de salida en alto corresponde a la tensión de alimentación mientras que la salida en bajo corresponde a voltaje de referencia.

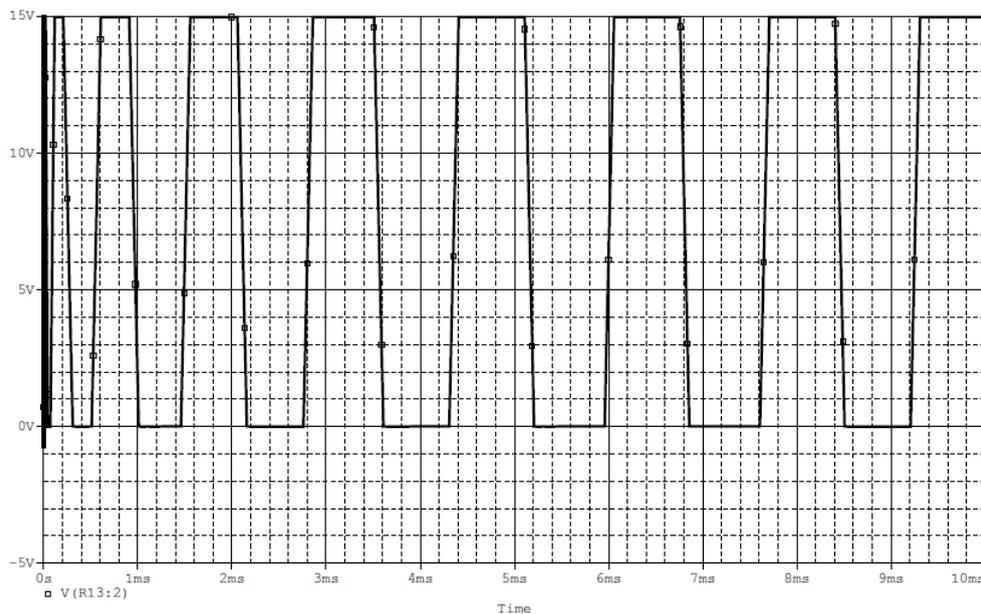


Figura 3.10: Salida para una configuración en modo aestado del NE555.

Posterior a obtener la señal de excitación de la frecuencia calculada, tan sólo queda acoplar correctamente las patillas para obtener la amplificación de la tensión en R_s según la necesidad y la multiplicación en el AD633. Quedando un esquema como el de la figura 3.11.

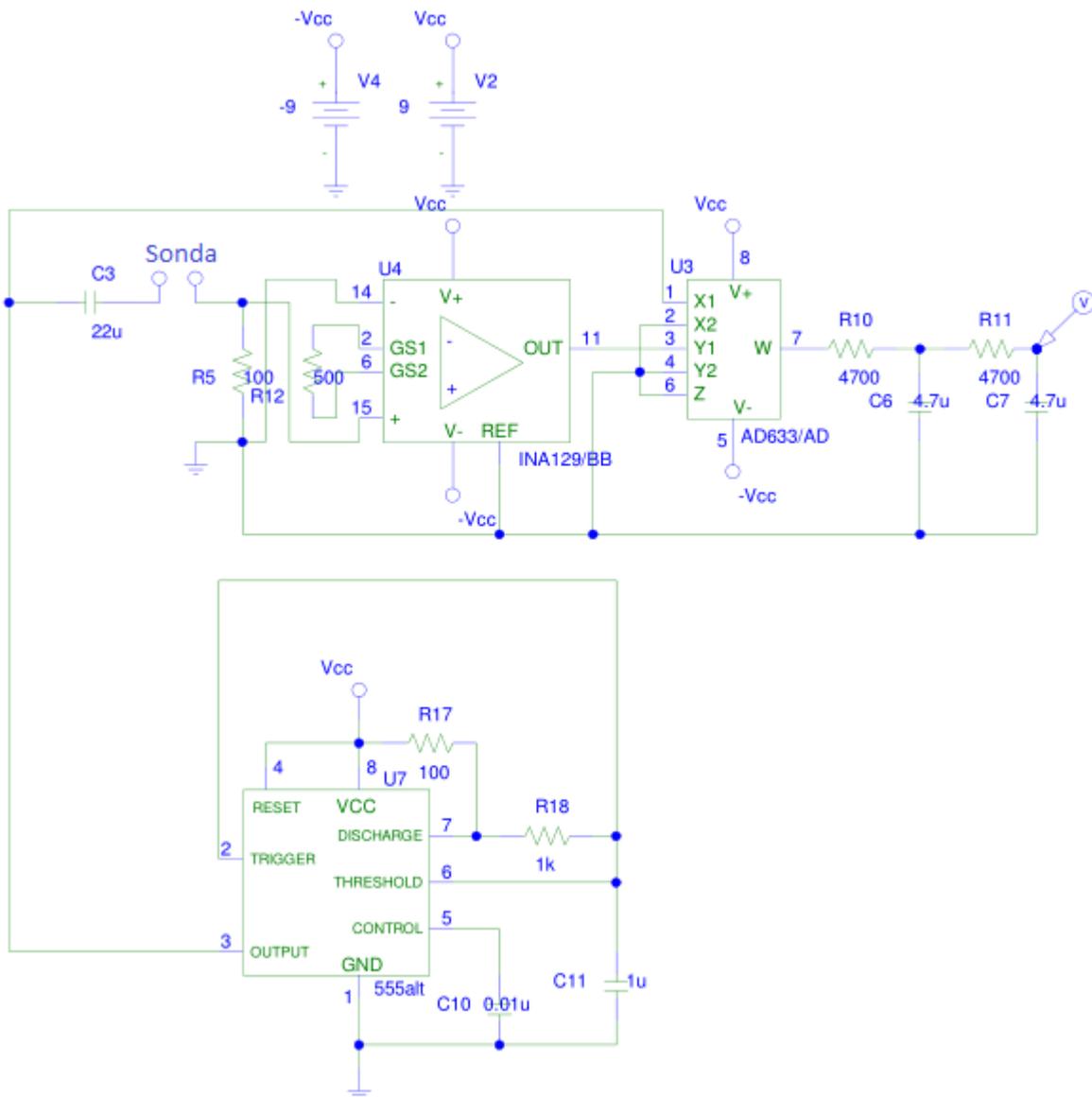


Figura 3.11: Esquema implementado correspondiente al AD633.

Se puede observar a continuación la excitación como la señal atraviesa el condensador de desacoplo C3. Y luego a través del divisor resistivo formado por R_x y R_s se obtiene la señal a amplificar en el INA128. Después de realizar algunas pruebas se determinó una ganancia apropiada para el primer rango de medición de 101. Por lo que de acuerdo con la fórmula que da el fabricante en la ficha técnica [Tex05] corresponde a una resistencia

de ganancia de 500Ω , según la expresión 3.18.

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}; R_G = 500 \rightarrow G = 101 \quad (3.18)$$

Con el diseño implementado, se simulará a ordenador la respuesta frente a diferentes resistencias de medida R_x , que estarán estimadas en función de los cálculos realizados con Matlab (3.12) para el caso en el que la sonda de medida compuesta por los dos electrodos tenga las siguientes características geométricas; **4 centímetros de altura, 4mm de diámetro de los cilindros y separación de 2cm entre ambos.**

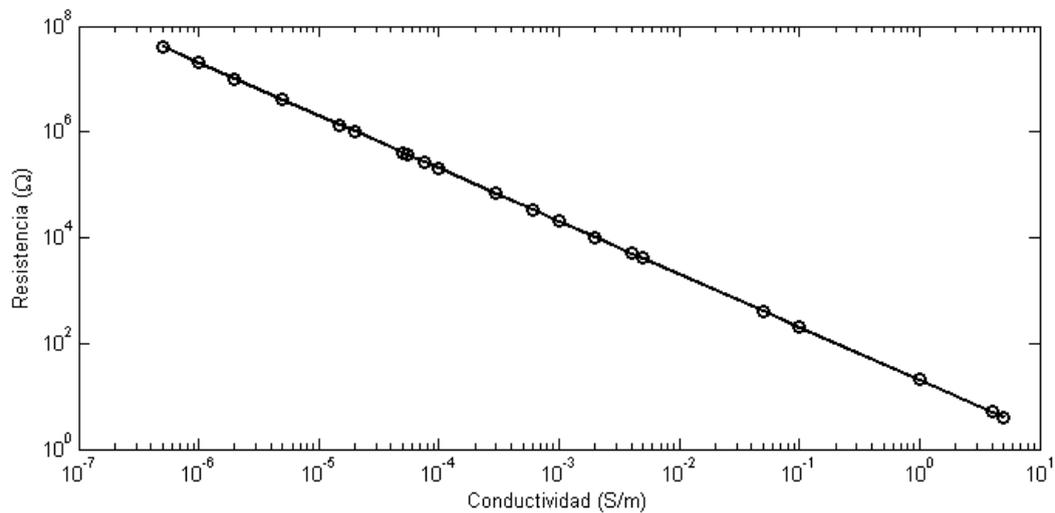


Figura 3.12: Relación entre resistencia y conductividad del agua calculada.

El código que ha operado dichos resultados es el siguiente:

```

h=0.04; %(m) altura del cilindro en contacto con el liquido
d=0.004; %(m) diametro del cilindro
L=0.02; %(m) distancia entre sondas
sigma=[0.5e-6 1e-6 2e-6 5e-6 15e-6 20e-6 50e-6
55e-6 75e-6 100e-6 300e-6 600e-6 0.001 0.002
0.004 0.005 0.01 0.03 0.05 0.1 0.2 0.4 0.5 0.7
1 4 4.00005 4.99999 4.99995 5]; %(S/m) conductividad del agua

k_lados=(1/(pi*h))*log(((d+L)/(d/2))-1);
k_base=pi/(log(((d+L)/(d/2))-1));
    
```

```
K=k_lados+k_base;  
  
for n=1:1:30  
  
    R(n)=K/sigma(n);  
    % (ohmios) resistencia del liquido entre sondas, R(sigma).  
  
end  
  
figure(1)  
clf  
loglog(sigma,R,'-bo','LineWidth',1.5)  
xlabel('Conductividad_(S/m)')  
ylabel('Resistencia_(\Omega)')
```

Las cuatro primeras líneas corresponden a la definición de variables, que en este caso son la altura del cilindro en contacto con el líquido, el diámetro de dicho cilindro, la distancia que le separa del otro electrodo y un vector de muestras de conductividad para realizar los cálculos. A continuación opera según el resultado obtenido en el apartado 'Desarrollo teórico de la sonda de medida', con el que se consigue el parámetro geométrico correspondiente a la supuesta sonda. Finalmente realiza el cálculo de la resistencia según la expresión 3.3 y grafica los resultados.

Para realizar correctamente las mediciones, y en función de numerosas pruebas, se han determinado dos fondos de escala que se conseguirán mediante el cambio en la resistencia de calibración. Para el primer rango, de $15\mu S/m$ a $1mS/m$ se realizará con una R_s de valor 100Ω , y en el segundo rango de $2mS/m$ a $1S/m$ con una de valor 1Ω . En la tabla 3.1 se establece la correspondencia entre valores dentro del primer rango de conductividad y su resistencia de sonda equivalente. Y en la tabla 3.2 se establecerá la misma relación pero para el segundo rango de medida.

Utilizando las resistencias establecidas en las tablas anteriores y sus correspondientes resistencias de calibración se simuló cada una de las opciones, obteniendo los resultados de las figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21.

Conductividad (S/m)	Resistencia (Ω)
15μ	1395500
20μ	1019600
50μ	407840
75μ	271890
$1m$	20392

Tabla 3.1: Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el primer rango de medida con el AD633.

Conductividad (S/m)	Resistencia (Ω)
$2m$	10196
$5m$	4078
$50m$	407
$100m$	204

Tabla 3.2: Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el segundo rango de medida con el AD633.

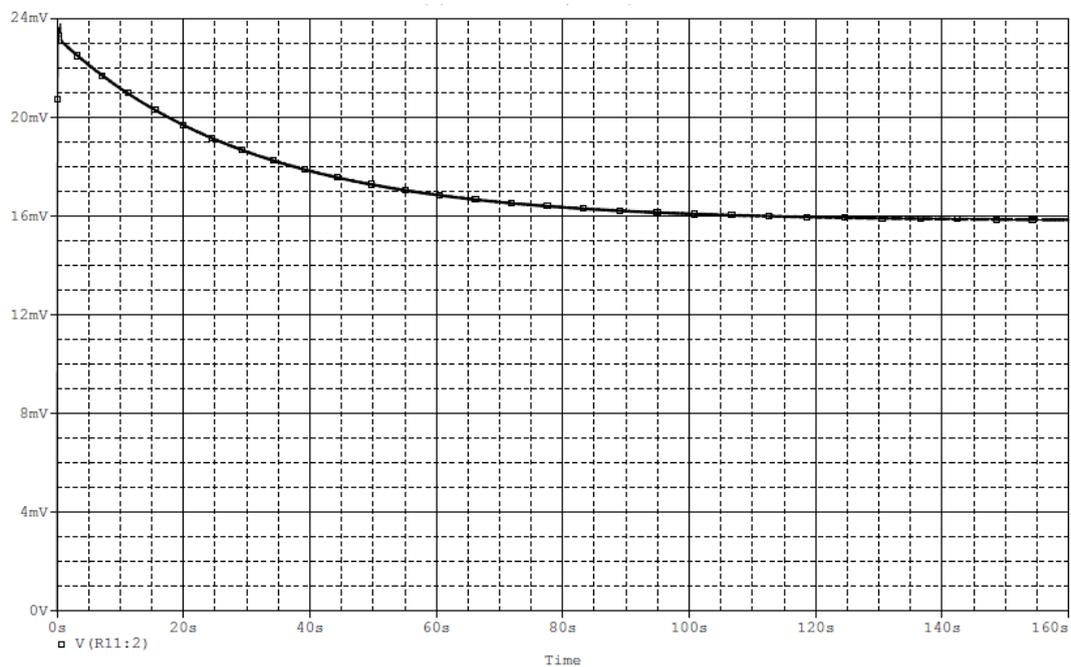


Figura 3.13: Salida para una resistencia equivalente de 1395500 ohmios.

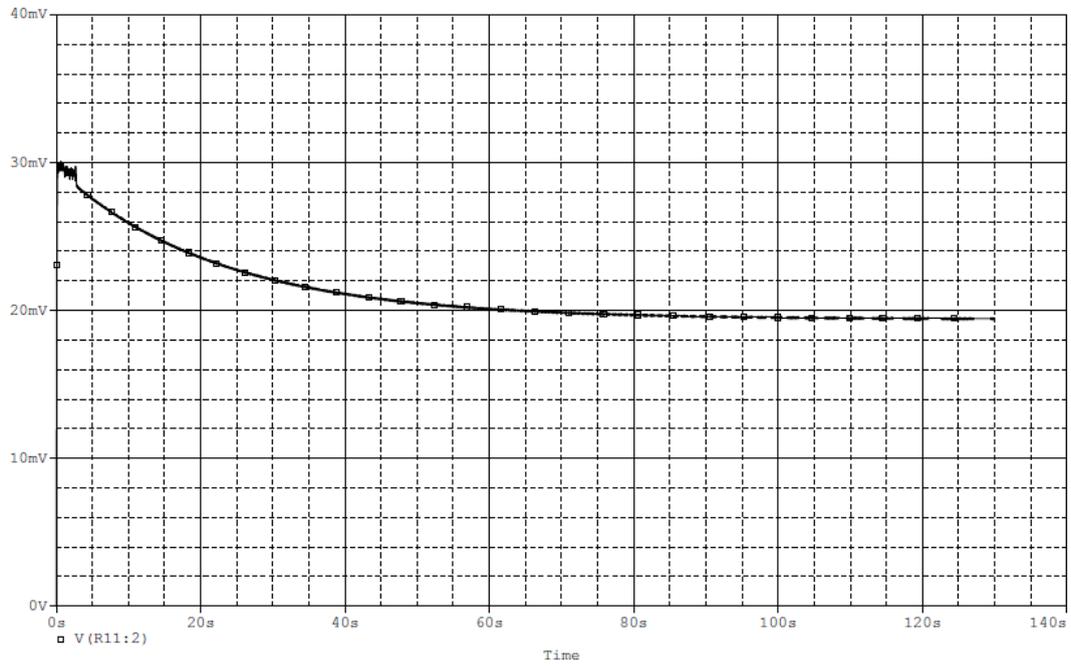


Figura 3.14: Salida para una resistencia equivalente de 1019600 ohmios.

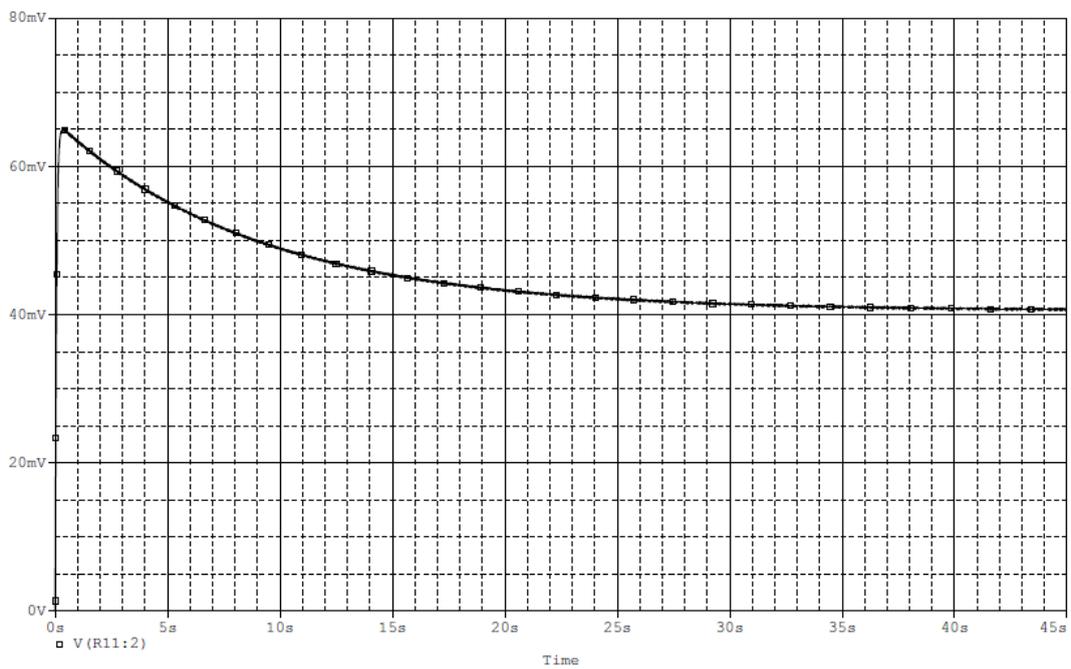


Figura 3.15: Salida para una resistencia equivalente de 407840 ohmios.

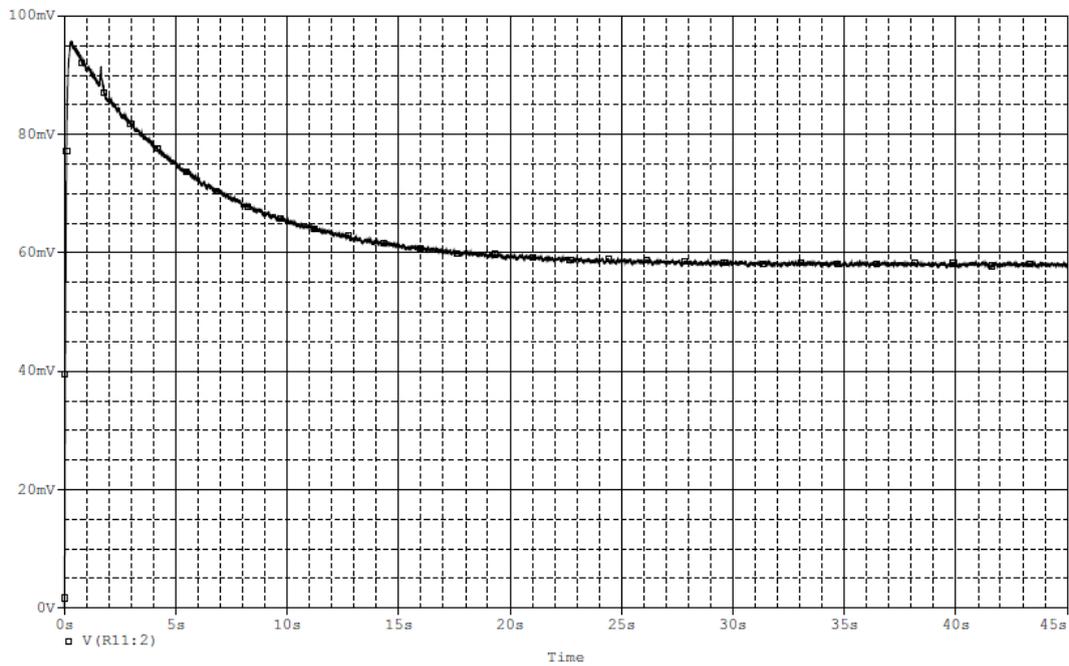


Figura 3.16: Salida para una resistencia equivalente de 271890 ohmios.

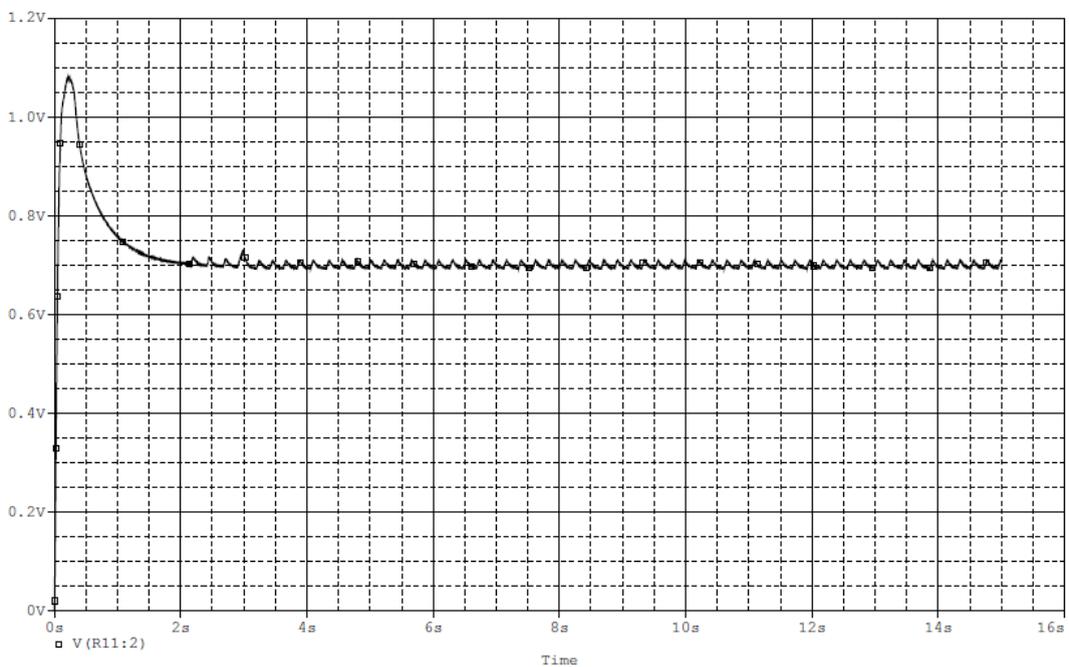


Figura 3.17: Salida para una resistencia equivalente de 20392 ohmios.

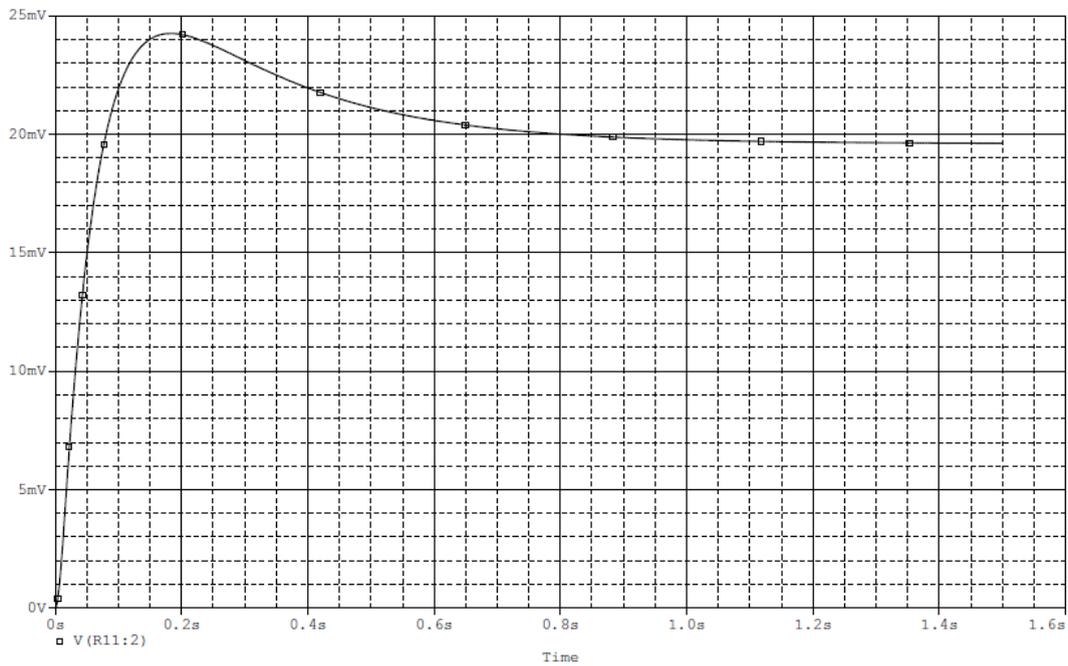


Figura 3.18: Salida para una resistencia equivalente de 10196 ohmios.

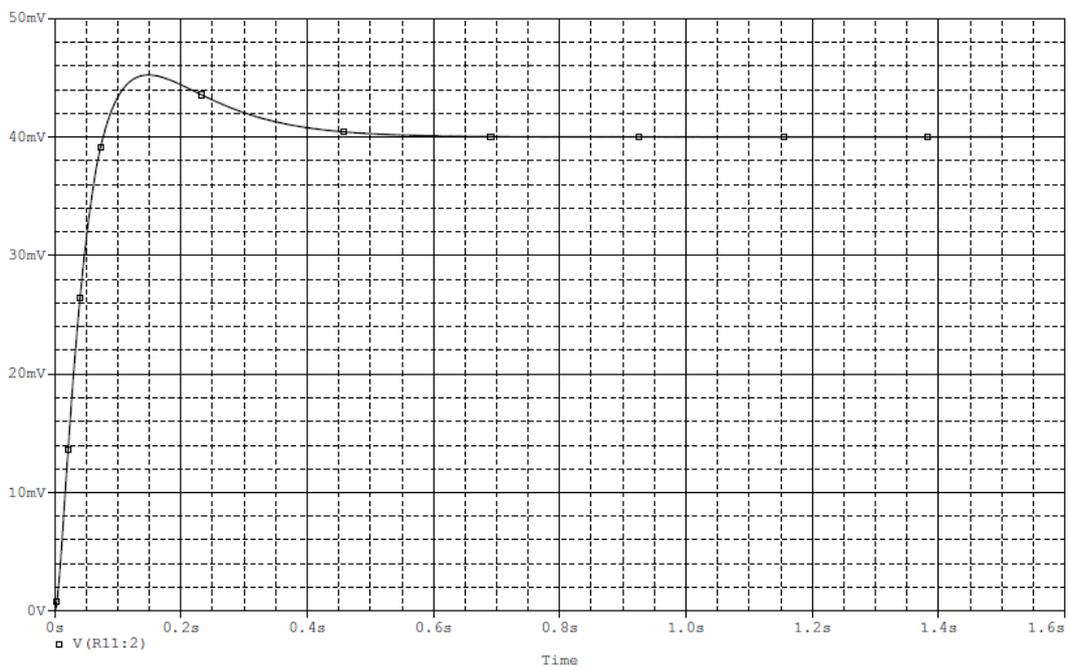


Figura 3.19: Salida para una resistencia equivalente de 4078 ohmios.

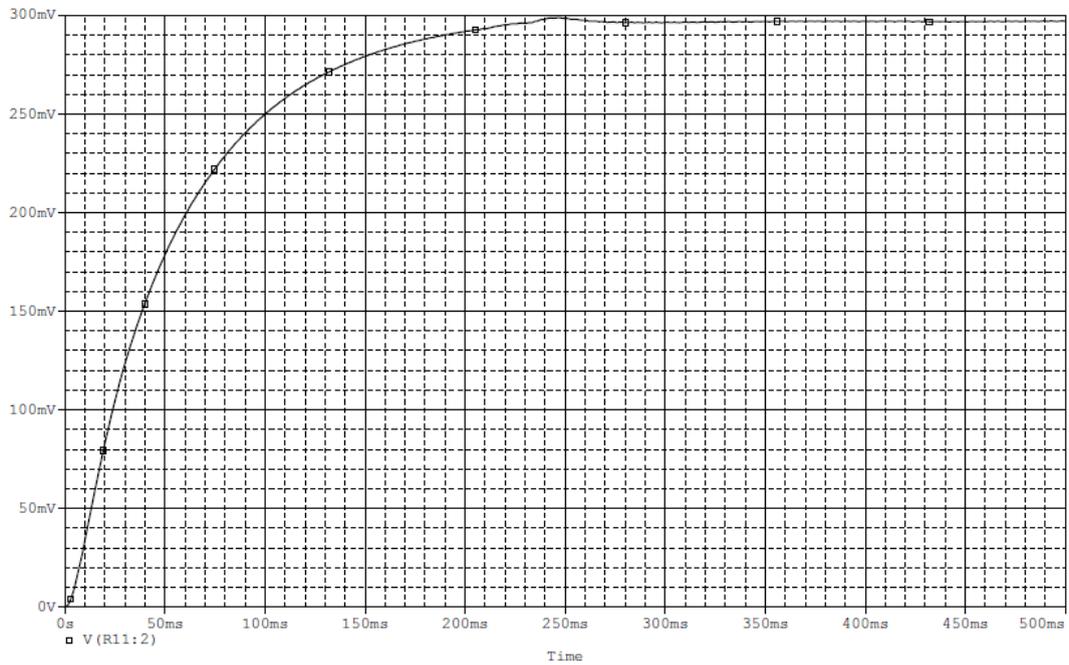


Figura 3.20: Salida para una resistencia equivalente de 407 ohmios.

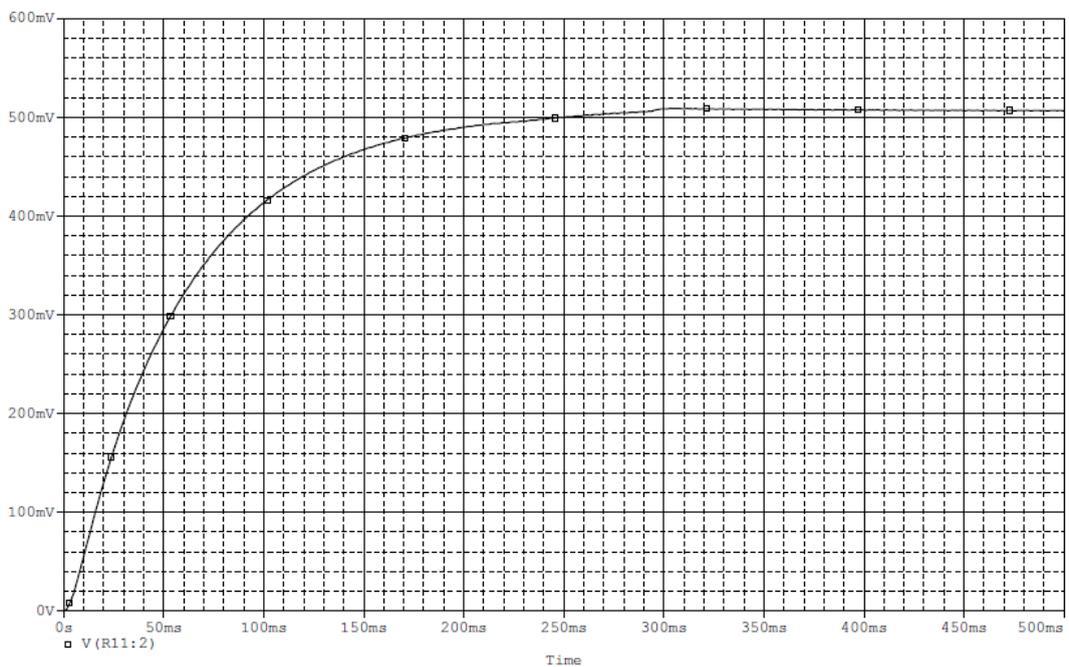


Figura 3.21: Salida para una resistencia equivalente de 204 ohmios.

Lo primero que llama la atención en las gráficas anteriores es el tiempo de establecimiento necesario, sobretodo a valores altos de resistencia y por tanto menor conductividad de medida. También se observa que, en estado estacionario, las variaciones en el voltaje son bastante apreciables a la hora de determinar el grado de salinidad de la muestra medida mediante la resistencia equivalente.

Tomando cada uno de los valores en estado estacionario, que se consideran los valores indicativos finales de la conductividad se han realizado las gráficas correspondientes a cada uno de los rangos, la figura 3.22 para el primer rango y 3.23 para el segundo. En ambos casos se aprecia la linealidad en la medida.

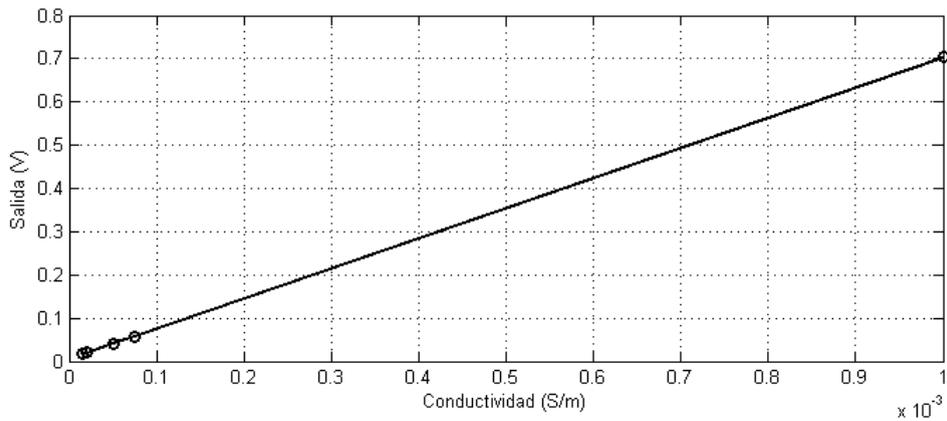


Figura 3.22: Correspondencia de la tensión de salida y la conductividad a medir en el primer rango.

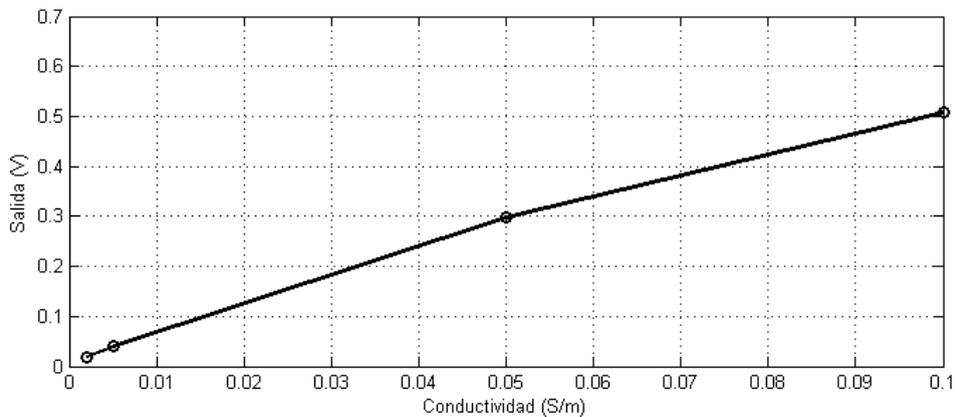


Figura 3.23: Correspondencia de la tensión de salida y la conductividad a medir en el segundo rango.

4

Desarrollo del sistema

En este capítulo se especificarán los materiales que fueron necesarios durante el proceso de implementación física del diseño correspondiente al demodulador síncrono ADA2200. También se explicará el algoritmo de fabricación elaborado y el resultado final después de haberlo llevado a cabo.

Para la implementación física del diseño del ADA2200 se emplearon los siguientes materiales, algunos de ellos mencionados en el apartado anterior:

- Alcohol.
- Agua corriente.
- Agua oxigenada de 110 volúmenes.
- Salfumant.
- Placa de baquelita con una cara de cobre, de 7x10cm.
- Rotulador indeleble.
- Soldador.
- Recipiente de plástico.
- Componentes:
 - ADA2200
 - INA128 (x2)

- LT1490
 - Condensador no polarizado de $22\mu F$
 - Clemas (x4)
 - Condensadores electrolíticos de $4,7\mu F$ (x2) y $3,3\mu F$ con tolerancias de 25V y 50V respectivamente.
 - Zócalos de 8 patillas (x3)
 - Cable conductor de 1mm de diámetro (110cm aprox.)
 - Resonador de 384kHz
 - Condensadores cerámicos de 150pF (x2)
 - Resistencias de tolerancia del 5 % ($1x470\Omega$, $1x1M\Omega$, $3x1k\Omega$, $1x100\Omega$ y $1x1500\Omega$)
- Software:
- OrCAD
 - Matlab
 - LaTeX

4.1. Proceso de fabricación

La implementación física se realizó únicamente con el diseño correspondiente al ADA2200. Se fabricó de forma manual. Para comenzar se diseñó un prototipo de fotolito a mano, luego se trasladó el diseño que se observa en la figura 4.1 a la placa de baquelita con el uso de un rotulador indeleble para proteger las pistas de cobre deseadas de la disolución de sulfamant y agua oxigenada de 110 volúmenes.

Para fabricar la placa se siguió el siguiente algoritmo de fabricación obtenido a partir de todas las prácticas realizadas durante la carrera (en las que se tuvo que fabricar circuitos impresos):

- En primer lugar se señalaron los puntos de inserción de cada uno de los componentes para su posterior taladrado con una broca de 1mm de diámetro.
- Una vez se tuvieron situadas cada una de las inserciones se copió con un rotulador indeleble el diseño del fotolito realizado sobre la cara de la placa que disponía el cobre. Ésta era de un tamaño de 7x10cm.

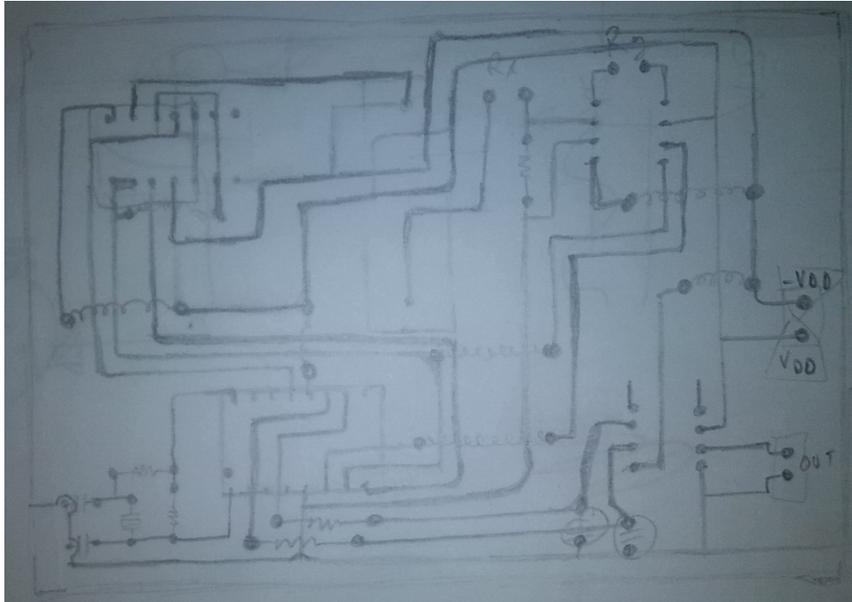


Figura 4.1: Prototipo de fotolito.

- A continuación se preparó una disolución a partes iguales de agua del grifo, sulfamant y agua oxigenada de 110 volúmenes sobre un recipiente de plástico. Esta disolución actuaría de disolvente sobre el cobre sobrante de la placa.
- Una vez se dispuso de la disolución se sumergió en ella la placa, removiendo continuamente hasta que el cobre que quedó sin pintar se disolvió por completo. Se sacó, se lavó con agua corriente y se secó.
- Para eliminar la pintura realizada con el rotulador de las pistas se empleó alcohol.
- Tras obtener la impresión de la placa se procede a soldar cada uno de los componentes.

El resultado de realizar el anterior algoritmo fue el que se aprecia en las figuras 4.2 y 4.3.

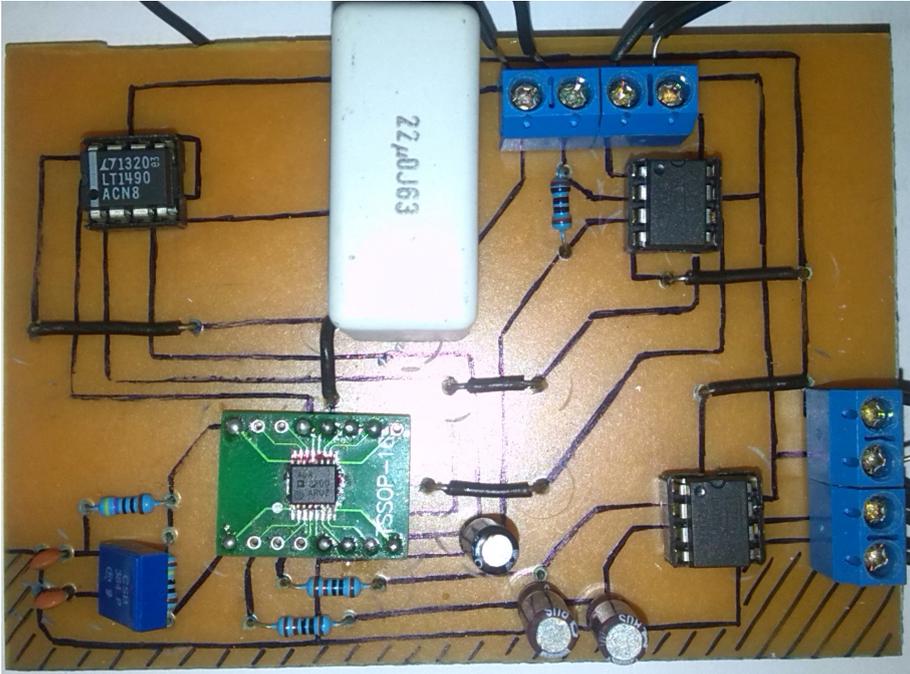


Figura 4.2: Cara superior de la placa.

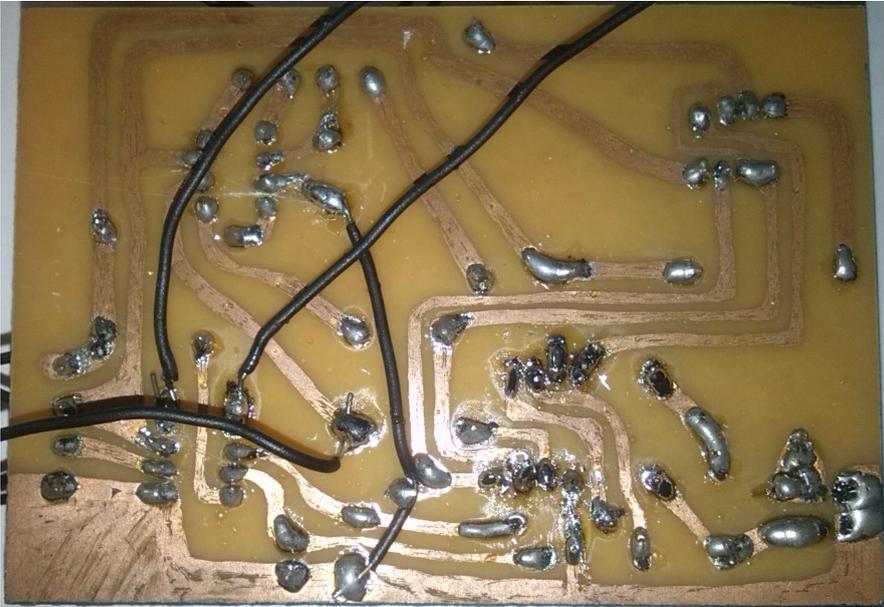


Figura 4.3: Cara posterior de la placa.

5

Resultados

Tras el proceso de diseño y el de implementación, en este capítulo se describirán y explicarán los resultados obtenidos de haber realizado las pruebas pertinentes en el laboratorio con la implementación física del ADA2200.

Posteriormente, se calibrará la salida obtenida de forma que la indicación resultante pueda convertirse a una medida real. La importancia de una calibración reside en el entendimiento global de la medida, ya que se trabaja con un único sistema de referencia para cada tipo. El calibrar un aparato permitirá conocer la medida real en función de su indicación, que en el caso de este trabajo será en tensión continua. El proceso de calibración tiene como objetivo esencial asociar una medida con sus incertidumbres a un valor de referencia. De forma que a partir de una indicación obtenida se pueda obtener una medición. Aplicado a este trabajo, se tratará de asociar la salida obtenida de cada uno de los diseños a un valor de referencia y por tanto a un resultado de medida. Para conocer la salinidad del agua en base a las indicaciones que los instrumentos aquí desarrollados habrá de calibrarse la salida que se obtiene en voltios en referencia a los siemens por metro por los cuales se estimará dicha salinidad.

Para finalizar se presentará la síntesis de resultados obtenidos junto con una conclusión final para el trabajo.

5.1. Pruebas

La implementación física se llevó a cabo con el ADA2200, se probó el diseño presentado en el apartado relacionado con los esquemas en el laboratorio, utilizando un osciloscopio para realizar la medida y una fuente de tensión continua para alimentar el circuito.

Para justificar el rango de medida probado en el laboratorio han de verse las limitaciones a la entrada de señal en el componente. Según la ficha técnica, la tensión en las patillas INN e INP no puede exceder la tensión de alimentación ni la de referencia, por lo que para calibrar la amplificación del INA128 situado a la entrada se tuvo en cuenta el límite a partir del cual se sobrepasarían esas tensiones en las patillas de entrada del ADA2200. Dicho rango de medida se puede ver en la tabla 5.1.

Conductividad (S/m)	Resistencia (Ω)
20μ	1019600
$0,3m$	67973

Tabla 5.1: Relación entre conductividad y resistencia de la sonda de prueba para el ADA2200.

Los diferentes valores de resistencia fueron implementados con la ayuda de una resistencia variable en lugar de la sonda para facilitar y agilizar las medidas.

Para comprobar los resultados que aparecen en la tabla 5.2 se presentan las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4. Dichas figuras son capturas realizadas con el osciloscopio del laboratorio durante las pruebas. Las figuras 5.1 y 5.2 corresponden a las salidas de los límites superior e inferior de la medida, que puede apreciarse en el módulo Prom-FS de las capturas. Y las figuras 5.3 y 5.4 corresponden a las señales de entrada para la patilla INP en referencia a VOVM que comparte nodo con INN.

Se aprecia como a más conductividad, es decir menos resistencia equivalente de la sonda supuesta, la amplitud de la señal de entrada aumenta, mientras que cuando la resistencia equivalente de la medida es mayor dicha salida disminuye debido al divisor resistivo que compone el circuito básico de la medida.

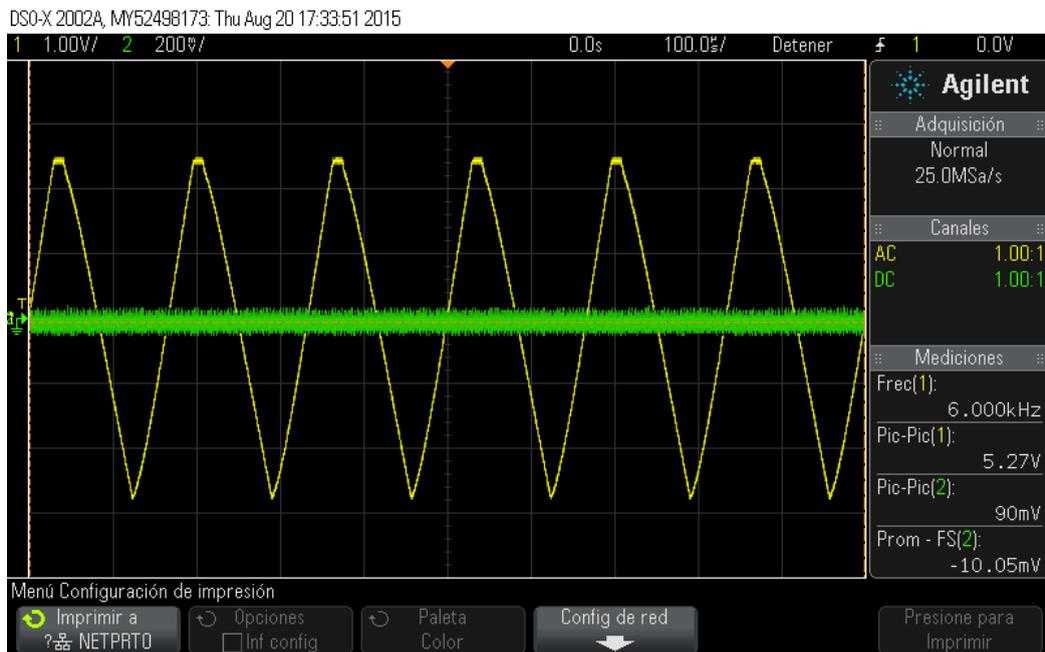


Figura 5.1: Salida para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 578k\Omega$.

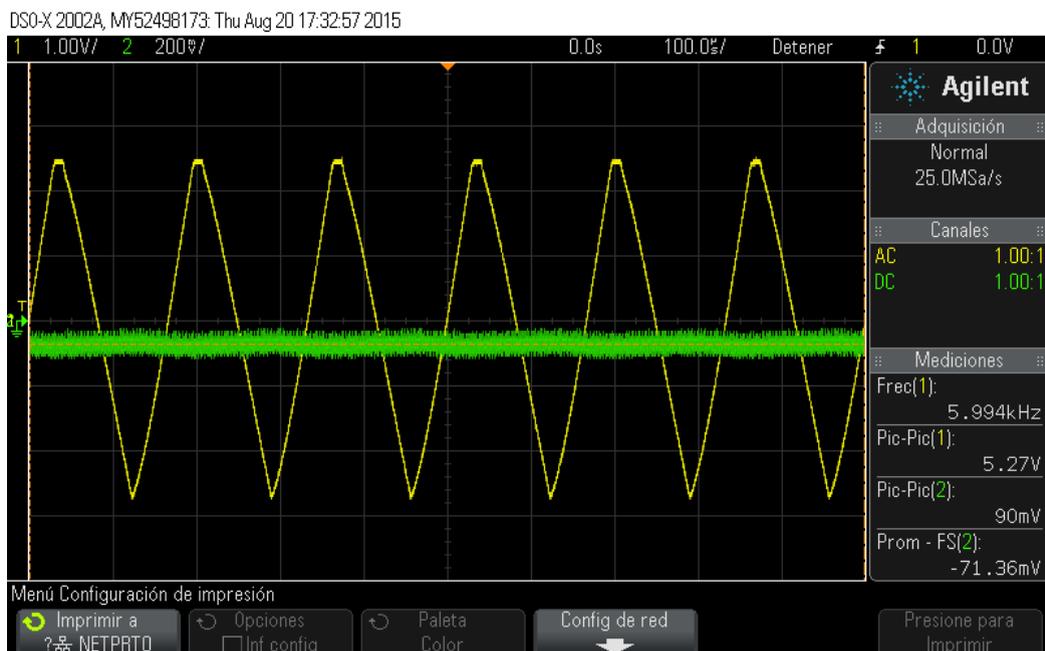


Figura 5.2: Salida para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$.

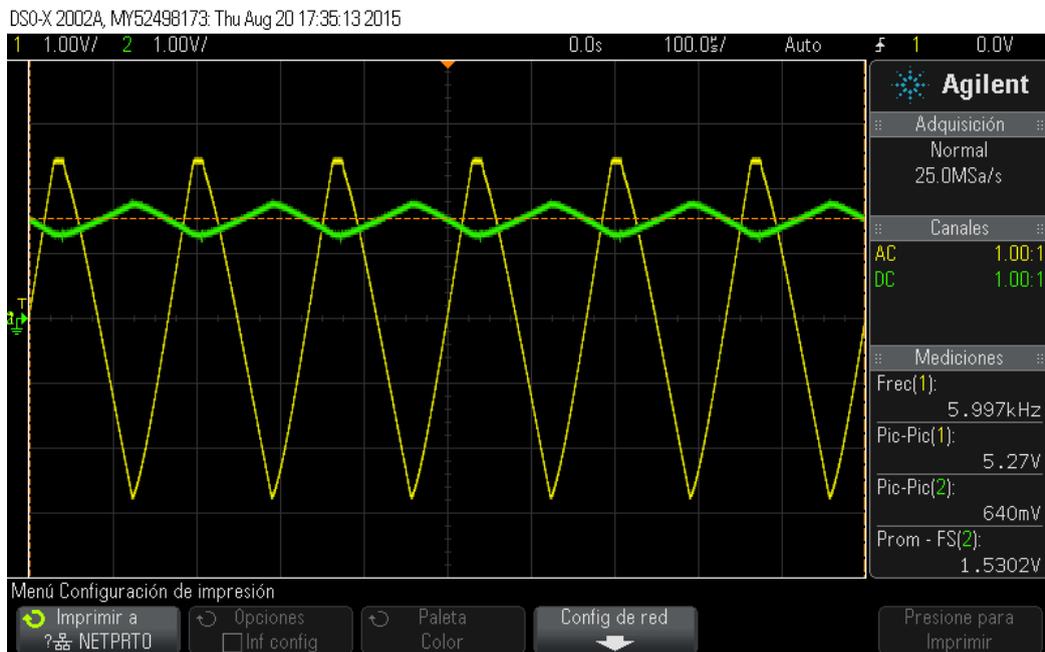


Figura 5.3: Señal de entrada para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$.

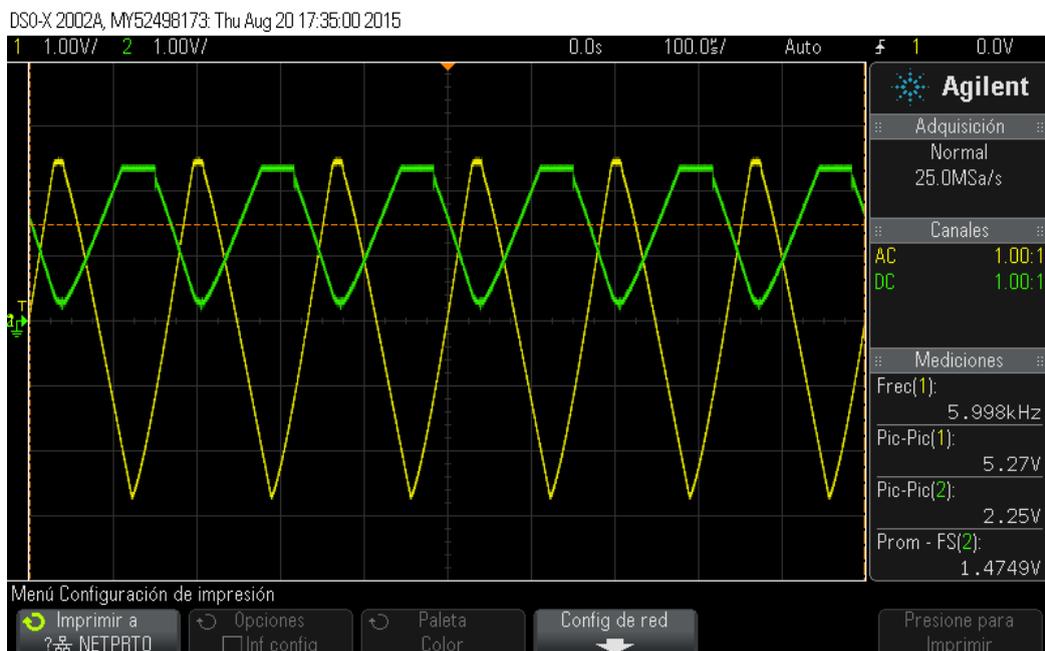


Figura 5.4: Señal de entrada para prueba de laboratorio con el ADA2200, $R_x = 146,5k\Omega$.

Salida (V)	Resistencia (Ω)
$-71,36m$	146500
$-10,05m$	578000

Tabla 5.2: Relación entre salida en voltaje y resistencia de la sonda de prueba para el ADA2200.

Una vez obtenido el rango de medida y sus límites, habiéndose comprobado la respuesta lineal en el laboratorio, se puede elaborar una recta de calibración que sirva como apoyo para transformar la indicación de tensión obtenida en una medida de salinidad estimada mediante la conductividad. Se consideran los resultados obtenidos en el apartado correspondiente al desarrollo teórico de la sonda de medida y electrodos, en los que se especificaba una constante geométrica para la sonda de la expresión obtenida en la ecuación 3.14, donde el valor de r_0 es de 4mm se obtiene un parámetro geométrico de la expresión 5.1

$$2a = d + L = 0,024m \rightarrow r_0 = 0,004m \rightarrow K = 20,392 \quad (5.1)$$

Conociendo el parámetro geométrico se elaboró la gráfica mediante código de Matlab que anteriormente se ha usado para elaborar las tablas de resistencias de prueba (3.12). Utilizando dicho parámetro se calculará la conductividad que ha sido medida (5.3) teniendo en cuenta su relación con la conductividad y la resistencia, según la ecuación 5.2.

$$Conductividad(S/m) = \frac{K}{R(\Omega)} \quad (5.2)$$

Ahora en la tabla 5.3 se presenta la correspondencia entre la salida obtenida, la resistencia equivalente de medida para la sonda y la conductividad estimada según la expresión 5.2.

Salida (V)	Resistencia (Ω)	Conductividad (S/m)
$-71,36m$	146500	$0,139m$
$-10,05m$	578000	$35,28\mu$

Tabla 5.3: Relación entre salida en voltaje, resistencia de la sonda de prueba y conductividad medida para el ADA2200.

En función de este resultado, de escala lineal, se determina que el diseño implementado del ADA2200 (con una resistencia de calibración de 100Ω y una de ganancia para

acondicionar la señal de entrada de $1k\Omega$) es capaz de realizar medidas en el rango de agua pura, entre los $0,139mS/m$ y los $35,28\mu S/m$.

5.2. Calibración de la sonda

Para realizar la calibración de la sonda, únicamente se ha construido dicho elemento según los parámetros geométricos utilizados en el cálculo de Matlab. Dichos parámetros se determinaron para ofrecer una serie de resistencias en el rango de medida adecuadas para realizar las mediciones, es decir, que la escala de variación fuese lo más apreciable posible en función de las resistencias de calibración.

El diseño implementado se puede ver en la imagen (5.5).

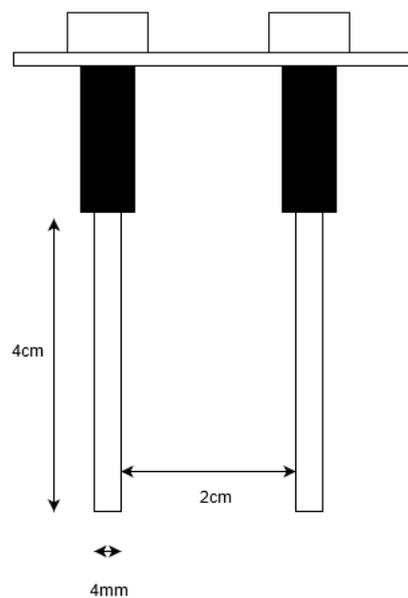


Figura 5.5: Diagrama de implementación para la sonda de electrodos.

El material de implementación para la sonda es el acero marítimo de la categoría A4 en forma de tornillo, al cual se ha limado correspondientemente la parte inferior de 4 cm para ofrecer una superficie lisa donde no pudiesen intervenir restos ni residuos. La parte superior a los 4cm de altura se ha cubierto con una funda termoretractil para que no se comportase como conductor más superficie de la calculada previamente. Se sujeta en la parte superior con una placa de baquelita mediante la cual se conectan los cables sobre la

cabecera del tornillo hacia la placa. El resultado del proceso de fabricación se puede ver en la figura 5.6.



Figura 5.6: Sonda fabricada.

5.3. Calibración de la salida

Para realizar la calibración de la salida, se tiene en cuenta la indicación obtenida en forma de voltaje, va de forma lineal desde los -10.05mV hasta los -71.36mV . Con la forma en función de la conductividad que se muestra en la gráfica de la figura 5.7.

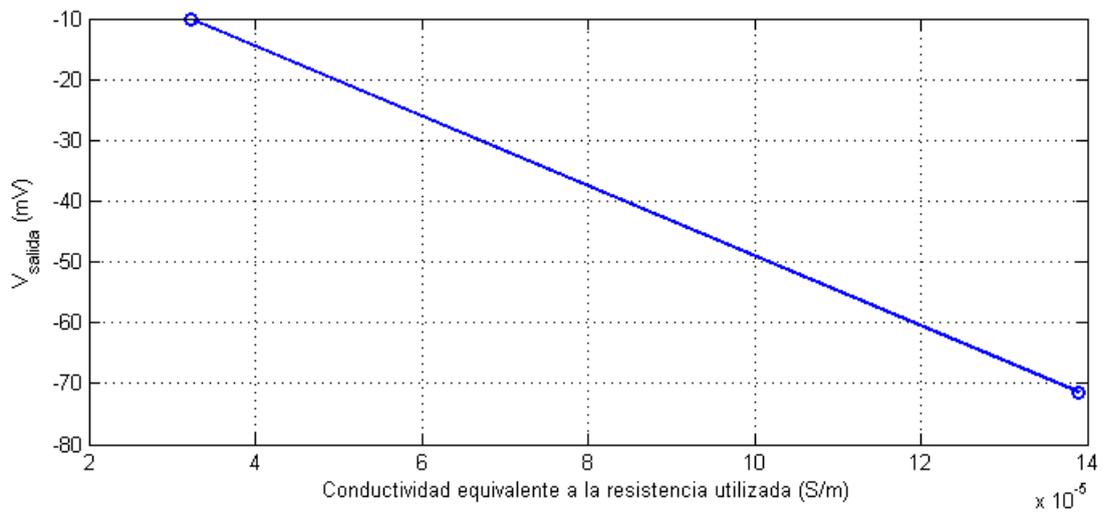


Figura 5.7: Medición de laboratorio para conductividad equivalente, ADA2200.

Identificando el modelo matemático de dicha salida, se puede elaborar una fórmula para la calibración de la salida, es decir para obtener la medida de conductividad en función de la indicación obtenida con el medidor en forma de tensión continua. Tendría la expresión 5.3.

$$Conductividad(S/m) = \frac{0,139 \cdot 10^{-3} - 32,28 \cdot 10^{-6}}{-71,36 \cdot 10^{-3} + 10,05 \cdot 10^{-3}} V(V) \quad (5.3)$$

Para obtener una medida fiable en base a una referencia de calibración específica se tendrían que realizar numerosas pruebas de laboratorio con disoluciones salinas de diferentes concentraciones.

6

Conclusiones

Al llevar a cabo este trabajo, se han obtenido una serie de conclusiones fruto de su desarrollo y elaboración. El objetivo de este trabajo era diseñar, implementar y calibrar un medidor de salinidad para agua. Se han diseñado dos alternativas, una de ellas implementada virtualmente con el componente AD633 y otra físicamente con el ADA2200. Con la virtual se han conseguido medir rangos de salinidad estimada en agua desde la pura hasta la potable ($15\mu S/m - 100mS/m$), superando incluso esta última, y con la implementada físicamente se ha conseguido medir un rango menor ($35,28\mu S/m - 0,139mS/m$), de agua pura pero con una gran resolución.

Las características de cada una de las alternativas se pueden resumir en la tabla 6.1.

Característica	Alternativa ADA2200	Alternativa AD633
Tipo de implementación	Física	Virtual
Requerimientos de alimentación	Fuente DC $\pm 3V$	Fuente DC $\pm 9V$
Costo	Entorno a los 20€	Entorno a los 20€
Rango de medida	$35,280\mu S/m - 0,139mS/m$	$15\mu S/m - 100mS/m$

Tabla 6.1: Distribución temporal de las tareas realizadas.

A la hora de llevar a cabo físicamente el diseño de un medidor de conductividad, se ha tenido en cuenta la necesidad que implicaba la elección de cualquiera de los dos dispositivos de la tabla. El componente AD633 constituye el módulo de multiplicación analógico, no incorpora ningún generador de señal para la excitación del sensor ni de otros módulos como el de filtrado, que el ADA2200 sí incluye. Este último componente, aparte de los módulos de filtrado, también incluye un generador para la señal de excitación, que se ha acondicionado mediante un comparador (LT1490) para aumentar la resolución de

la medida. Se ha precisado la configuración de la frecuencia de trabajo de forma externa mediante un resonador. En base a ello la elección del ADA2200 para la implementación física resultó más conveniente debido a su mayor simplicidad en el proceso de fabricación.

Sin embargo, la etapa de simulación característica de cualquier proceso de diseño no pudo realizarse con el ADA2200. Para completar el trabajo se ofrece una alternativa (AD633) que sí se puede comprobar de manera virtual en el simulador de OrCAD para los rangos de medida que aparecen en la tabla 6.1. Tanto la alternativa del AD633 como la del ADA2200 tienen costos de fabricación muy similares.

6.1. Líneas futuras de trabajo

La implementación física realizada para este trabajo ha servido para profundizar y establecer unas bases en las medidas de salinidad mediante la detección síncrona. El haber sido capaces de obtener una medida de salinidad en rangos de tensión tan pequeños ofrece un amplio margen de actuación. Conocer la salinidad de un medio acuoso resulta de gran importancia en cualquier ámbito, por lo que disponer de un dispositivo como el implementado físicamente, de dimensiones relativamente pequeñas, bajo consumo y coste reducido se convierte en algo prácticamente necesario. Cualquier sistema de adquisición de datos industrial valora un mayor número de medidas e información, por lo que los conceptos anteriores cobran mayor importancia si cabe.

Además, al realizar este tipo de medidas de salinidad se suele pretender un periodo de medición muy amplio (días, semanas,...). Por lo que las características del dispositivo implementado resultan óptimas en cuanto a la necesidad que crea una medición muy espaciada en el tiempo se refiere.

De las conclusiones obtenidas en este trabajo se pueden derivar distintas líneas de trabajo:

- Medición de salinidad mediante detección síncrona para todo el fondo de escala, desde agua pura hasta agua oceánica.
- Optimización dimensional del diseño para fabricación con componentes de montaje superficial.
- Caracterización de una sonda de medida variable para solucionar problemas relacionados con el fondo de escala.

Tiene especial interés el último punto de la lista, ya que durante el desarrollo de este trabajo ha sido uno de los mayores obstáculos a los que se ha enfrentado. El fondo de escala, al tener relación logarítmica, impedía realizar medidas en todo el rango de salinidad, por lo que ha sido necesaria la variación manual o virtual del circuito para adaptar dicho fondo de escala.

7

Glosario y acrónimos

AC: Del inglés, alternating current, o corriente alterna. Se caracteriza por tener un flujo de carga eléctrica que invierte periódicamente la dirección.

Acondicionamiento: En el contexto de este trabajo, se refiere a un elemento dentro del proceso electrónico que se encarga de adaptar una señal eléctrica a unas condiciones deseadas para su manejo.

Anión: Ión con carga eléctrica negativa.

Catión: Ión con carga eléctrica positiva.

CI: Circuito integrado.

Clado: Grupo de seres vivos que comparten ancestros y descendientes, representa una ramificación del "árbol de la vida".

Clorinidad: Peso de haluros, a excepción del flúor, expresado en gramos de cloro por kilogramo de agua de mar.

Conductancia: Propiedad de mover electrones a través de un cuerpo.

Conductividad: Propiedad de conducción eléctrica de un cuerpo.

DC: Del inglés, direct current, o corriente directa. Hace referencia al flujo unidireccional de la carga eléctrica.

Demodulador: Circuito usado en receptores de AM (modulación en amplitud) y FM (modulación en frecuencia) que tiene como objeto separar la señal portadora de la

moduladora.

Desacoplo: En el contexto electrónico, hace referencia a la función que elementos puntuales dentro del circuito (normalmente condensadores) realizan. Por ejemplo una onda alterna en corriente de la que se espera una componente en DC nula puede llevarla por diversos motivos, para asegurarse se emplea un condensador de desacoplo que impediría una posible componente en DC fluyendo por donde no debe.

Disolución: Mezcla homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias que no reaccionan entre sí.

Electrodo: Trozo de material conductor que tiene a finalidad de conectar una parte no conductora del circuito.

Electrólisis: Proceso electroquímico en el que dos compuestos de un material se separan por la acción de la electricidad.

Excitación: En el contexto eléctrico, se refiere a la señal que imbuye corriente al circuito sensor, esta señal no debe variar según se realicen las medidas.

Ión: Un átomo o una molécula que están cargados eléctricamente.

Mhos: Alternativa a la unidad siemens.

Modulador: Artefacto que modifica la señal de una onda portadora para ser enviada hasta un demodulador.

Oscilador: En el contexto electrónico, un dispositivo capaz de ofrecer una señal de corriente o tensión alterna de cierta frecuencia.

Ósmosis: Se entiende como el paso del agua de una disolución menos concentrada a otra más concentrada a través de una membrana hasta equilibrarse.

Permitividad: Constante dieléctrica.

Plasmólisis: Descomposición de la membrana celular, suceso irreversible.

PSS: Practical Salinity Scale o Escala Práctica de Salinidad.

PSU: Practical Scale Unit o Unidad de Escala Práctica.

Refractrómetro: Artefacto utilizado para medir el índice de refractividad de un líquido.

Resistividad: Resistencia característica de un material.

Resonador: Dispositivo capaz de tener un comportamiento resonante.

Salinidad: Cantidad de sales disueltas en un volumen de agua.

Siemens: Unidad de conductancia eléctrica.

Síncrono: Se entiende como un elemento coordinado con otro en el tiempo.

Sonda: Artefacto útil para realizar la medida en un medio objeto.

Valoración: Método de análisis químico cuantitativo.

VCO: Voltage controled oscillator u oscilador controlado por tensión.

Bibliografía

- [Bha05] S. Bhat. *Salinity (conductivity) sensor based on parallel plate capacitors*. University of South Florida Scholar Commons., 2005.
- [Bor82] Sanford P. Bordeau. *Volts to Hertz... the Rise of Electricity*. Burgess Intl Group, 1982.
- [Chr15] K. Christine. *Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids*. 2015. URL: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>.
- [Dev14a] Analog Devices. *ADA2200-EVALZ User Guide*. ADA2200, 2014.
- [Dev14b] Analog Devices. *Synchronous Demodulator and Configurable Analog Filter*. ADA2200, 2014.
- [Dev15] Analog Devices. *Low Cost Analog Multiplier*. AD633, 2015.
- [Eni15] G. Eni. *Knudsen's pipette*. 2015. URL: <http://glossary.periodni.com>.
- [FCD96] E. Ferrara, L. Callegaro y F. Durbiano. *Optimal Frequency Range for the Measurement of A.C. Conductivity in Aqueous Solutions*. Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, 1996.
- [Gov12] Australian Government. *Salinity and water quality*. Australian Government Bureau of Rural Sciences for Decision., 2012.
- [Ind15] Mosaic Industries. *Cell Constant of Parallel Wire Electrodes. Solving Gauss's Law electric field equations for a paraxial two-electrode conductivity cell*. 2015. URL: <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/instrumentation/conductivity-meter/two-electrode-cell-constant>.
- [Ins10] Texas Instruments. *PRECISION TIMERS*. NE555, 2010.
- [Jac04] F. Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, design and applications*. Springer, 2004.
- [Joh94] H. John. «A frequency-domain description of a lock-in amplifier.» En: *American Journal of Physics*. 62.2 (1994), págs. 129-133.

- [KTD78] D. Kenneth, M. Thomas y J. Donald. *The uniqueness of the practical salinity scale: Testing the scale with natural seawaters*. National Research Council of Canada, 1978.
- [RB17] A. Robert y E.S. Bishop. *Elements of electricity*. American Technical Society., 1917.
- [Sem01] ON Semiconductor. *Wideband Linear Four-Quadrant Multiplier. MC1495/D*. Semiconductor Components Industries, LLC., 2001.
- [Ser28] J. Service. *Measurement of salinity of sea water*. United States Government Printing Office, 1928.
- [Shk15] Igor Shkvorets. *Methods of Determination of Salinity*. 2015. URL: <http://salinometry.com/methods-of-determination-of-salinity/>.
- [Sys15] Stanford Research Systems. *About Lock-In Amplifiers. Application note no.3*. 2015.
- [Tex05] Burr-Brown Products from Texas Instruments. *Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. INA128,INA129*, 2005.
- [Tho+80] M. Thomas y col. «The electrical conductivity of weight diluted and concentrated standard seawater as a function of salinity and temperature.» En: *IEEE: Journal of oceanic engineering* 5.1 (1980), págs. 28-41.
- [Uni08] Aarhus University. *Compendium for Basal Practice in Biochemistry*. 2008.
- [Web+12] B. Weber y col. *Ohm's law survives to the atomic scale*. Purdue University: Birck y NCN Publications., 2012.
- [Wil14] Joshua P. Wilson. *Building and Calibrating an Affordable Salinity Sensor*. 2014.
- [Yul15] N. Yuli. *Generalized Ohm's law*. 2015. URL: <https://archive.org/details/arxiv-cond-mat9410011>.

Este trabajo fin de grado consistirá en el diseño, implementación y calibración de un medidor de salinidad para agua. Se enmarca dentro del campo de la instrumentación electrónica y más concretamente en el de las mediciones por detección síncrona. La salinidad representa un parámetro de gran importancia en numerosas ciencias, al dar una valoración numérica a la cantidad de sales disueltas en el agua, descompuestas en iones positivos y negativos.

Palabras clave: microsiemens, conductividad, instrumentos, sensores.

This final project will consist in the design, implementation and calibration of a water salinity sensor. It belongs to the electronic instrumentation field, more accurate, to the lock-in applications. Salinity is an important parameter in a large number of sciences, since it gives a numerical value to the quantity of salts that are dissolved in water, in anions and cations.

Keywords: microsiemens, conductivity, instruments, sensors.

