



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Medida de la conductividad en líquidos con procesamiento en
microcontrolador

Autor:

Laura García Blanes

Tutores:

Manuel Fernández Ros

José Antonio Gázquez Parra

Dedicatoria

A mis padres Andrés y Sabina,

a mi hermano Andrés.

A José Manuel.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis tutores Manuel Fernández Ros y José Antonio Gázquez Parra por darme la oportunidad de realizar este proyecto, por su inestimable ayuda. Gracias por la confianza depositada en mí.

A todos y cada uno de los profesores que me han acompañado en estos años, instruyéndome en el aprendizaje y sabiduría.

A mi familia por todo lo que hacen por mí, y ayudar a realizarme en todos los aspectos para poder seguir creciendo. A ti, José Manuel, por todo. A los compañeros de clase que han hecho que el camino sea menos duro.

A todas las personas que de alguna manera me han ayudado en todo este tiempo, haciendo posible que todo este proyecto salga adelante.

A todos vosotros infinitas gracias.

Índice general

Agradecimientos	V
Resumen.....	XI
Abstract	XIII
Lista de acrónimos.....	XIII
Lista de símbolos	XV
Índice de figuras	XVII
Índice de tablas	XIX
Introducción	1
1.1. Motivación del trabajo fin de grado.....	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Contexto	4
1.4. Planificación temporal.....	4
1.5. Competencias utilizadas en el TFG.....	5
1.6. Estructura de la memoria del TFG.....	8
Materiales y métodos.....	9
2.1 Materiales.....	9
2.1.1. XR2206.....	9
2.1.2. MC1458	10
2.1.3. TL082	11
2.1.4. LT1431	12
2.1.5. MSP430FR6989	12
2.1.6 Regulador de conmutación R-78-0.5.....	13
2.1.7 MAX232	14
2.1.8. Conector RS-232.....	14
2.1.9. Componentes pasivos y otros componentes	15
2.2 Métodos	15
2.2.1. OrCAD	15
2.2.2. Code Composer Studio	16
2.2.3. Matlab	17
2.2.4. AutoCAD	17
Cálculos y diseño	19
3.1. Cálculo y diseño del sensor	19

3.2. Programación del microcontrolador MSP430.....	32
Resultados	35
Conclusiones.....	39
Anexo.....	43

Resumen

Son diversos los ámbitos en los cuales la conductividad de los líquidos es de gran importancia, por ejemplo, en el ámbito de la salud, beber agua en unas condiciones inadecuadas puede derivar a enfermedades de diversos tipos. Otro ejemplo, puede ser en el sector agrícola, debido a que el agua de riego no puede sobrepasar un cierto valor de conductividad. En la industria un valor inadecuado de conductividad puede provocar depósitos indeseables en partes cromadas causando problemas significativos en la fabricación de semiconductores y componentes de turbinas utilizadas en la industria de la energía.

En este trabajo fin de grado se propone desarrollar un conductímetro para la obtención de la medida de la conductividad de líquidos. Se trabaja en corriente alterna debido a que, en este tipo de medidas, si la corriente es continua aparecen deposiciones en los electrodos y por tanto errores en las medidas. Para ello se ha diseñado un generador de funciones senoidales trabajando a una frecuencia de 1000Hz.

Se ha trabajado con una plataforma basada en el microcontrolador de Texas Instruments en este caso es un LaunchPad MSP430FR6989, a partir de él obtendremos el valor de la conductividad del líquido, leyendo la tensión de salida del conductímetro y pasando por el ADC, mostrando el dato tomado mediante un display LCD, además con la funcionalidad de poder enviar los datos obtenidos mediante un protocolo de comunicaciones por puerto serie tipo UART.

La programación del microcontrolador se ha realizado en un entorno de desarrollo como es Code Composer Studio de Texas Instruments.

Palabras claves: conductímetro, microcontrolador, generador funciones y UART.

Abstract

It is well-known that liquid conductivity has great importance in all areas. For instance, in the health sector, drinking water in bad conditions can lead to serious illnesses. Regarding the agricultural field, the irrigation water cannot exceed a certain conductivity level. In the industrial areas, an inadequate conductivity value may provoke undesirable sediments in chromed parts, causing significant problems in energy industry when making semiconductors and turbine components.

This TFG attempts to develop a conductivity meter to measure liquid conductivity. It works in alternating current because, in this type of measurements, if the current is continuous, depositions appear in the electrodes and therefore errors in the measurements. In order to fulfil this task, a sinusoidal functions generator that operates in 1000Hz frequency has been designed.

Furthermore, this project works with a platform based in Texas Instruments microcontroller, more specifically a LaunchPad MSP430FR6989. From this device, liquid conductivity value will be obtained, reading the output voltage of the conductivity meter, going through the ADC to finally show the data through a LCD display. It also deals with the functionality to send the obtained data through a communications protocol via a serial port UART type.

The microcontroller programming has been carried out in a development environment like Code Composer Studio created by Texas Instruments.

Keywords: conductivity meter, microcontroller, functions generator and UART.

Lista de acrónimos

ADC	Analog-to-digital converter
BIT	Binary digit
CA	Corriente Alterna
CAD	Computer-aided design
CC	Corriente Continua
CCS	Code Composer Studio
CPU	Central Processing Unit
DIP	Dual In-line Package
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
IDE	Integrated Development Environment
LCD	Liquid Crystal Display
PCB	Printed Circuit Board
RS-232	Recommended Standard 232
SI	Sistema Internacional
SO	Small Outline
TFG	Trabajo Fin de Grado
TI	Texas Instruments
TTL	Transistor-transistor logic
UAL	Universidad de Almería
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

Lista de símbolos

A	Amperio.
a	Desplazamiento del acondicionador.
b	Ganancia del acondicionador.
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$	Condensadores configuración del XR2206.
C_9	Condensador para evitar entrada de corriente continua.
C_{10}	Condensador de desacoplo a la salida de Vout.
$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$	Condensadores configuración protocolo comunicación UART.
D_1	Diodo configuración diodo ideal.
$D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9$	Diodos Zener configuración protocolo comunicación UART.
F	Faradio.
f_0	Frecuencia de operación.
G	Ganancia del TL082.
Hz	Herzio.
L	Altura de las barras de los electrodos.
L_{sep}	Separación entre las barras de los electrodos.
m	Metro.
$^{\circ}C$	Grados centígrados.
r	Radio de los electrodos.
$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$	Resistencias configuración del XR2206.
R_7, R_8	Resistencias variables de ajuste a la frecuencia del XR2206.
R_9	Resistencia de configuración del seguidor de tensión MC1458.
R_{11}, R_{12}	Resistencias de configuración ganancia del TL082.
R_{13}	Resistencia variable de ajuste a la ganancia del TL082.
R_{14}	Resistencia de desacoplo a la salida de Vout.

R_{15}, R_{16}	Resistencias configuración acondicionador.
R_{17}	Resistencia variable para ajustar el acondicionador.
R_{18}, R_{19}	Resistencias configuración acondicionador.
R_{21}	Resistencia variable para ajustar el acondicionador.
$R_{22}, R_{23}, R_{24}, R_{25}$	Resistencias configuración protocolo comunicación UART.
R_L	Resistencia configuración referencia de tensión LT1431.
R_{RX}	Resistencia recepción de datos protocolo comunicación UART.
R_{TX}	Resistencia transmisión de datos protocolo comunicación UART.
R_s	Resistencia en el punto de equilibrio.
R_x	Resistencia equivalente al líquido.
S	Siemens.
s	Segundos.
S_{ef}	Superficie efectiva de los electrodos.
t	Tiempo.
V	Voltio.
V_+, V_-	Entradas de alimentación del circuito.
V_I	Tensión de salida del XR2206.
V_{ADC}	Tensión de salida del acondicionador.
V_{OUT}	Tensión de salida de la etapa de ganancia del TL082.
V_{ref}	Tensión de cátodo de LT1431.
Ω	Ohmio.

Índice de figuras

Figura 1. Método de conducción líquidos.....	2
Figura 2. Rangos de conductividades en soluciones.....	2
Figura 3. Patillaje y esquema interno del XR2206.....	10
Figura 4. Patillaje de MC1458.....	11
Figura 5. Patillaje de TL082.....	11
Figura 6. Patillaje de TL1431.....	12
Figura 7. MSP430FR6989 LaunchPad Development Kit.....	12
Figura 8. Diseño de segmento LCD.....	13
Figura 9. Patillaje R-78-0.5.....	13
Figura 10. Patillaje MAX232.....	14
Figura 11. Conector RS-232.....	14
Figura 12. Esquema del dispositivo XR2206.....	20
Figura 13. Seguidor de tensión MC1458.....	21
Figura 14. Medidas de los electrodos.....	22
Figura 15. Aumento de la ganancia en capture.....	23
Figura 16. Evaluación de la función del acondicionador.....	24
Figura 17. Configuración de la referencia de tensión.....	25
Figura 18. Diseño acondicionador.....	26
Figura 19. Circuito protocolo comunicación UART.....	27
Figura 20. Conductividades frente a la entrada del convertidor.....	28
Figura 21. Diseño del conductímetro.....	29
Figura 22. Plano en Layout del circuito para su implementación física.....	30
Figura 23. PCB terminada cara A.....	31
Figura 24. PCB terminada cara B.....	31
Figura 25. Diagrama flujo programación microcontrolador.....	33
Figura 26. Procesamiento de interrupción [9].....	34
Figura 27. Regreso de la interrupción [9].....	34
Figura 28. Salida del XR2206.....	36
Figura 29. Resistencia frente al valor del VADC.....	37
Figura 31. Ensayo con agua bezoya.....	43
Figura 32. Ensayo con agua lanjarón.....	43
Figura 33. Ensayo con agua solan de cabra.....	44
Figura 34. Ensayo con agua aquabona.....	44
Figura 35. Ensayo con coca cola.....	45
Figura 36. Ensayo con agua del mar.....	45
Figura 37. Ensayo con agua destilada.....	46
Figura 38. Ensayo con agua destilada con 7 gramos de cloruro de sodio.....	46
Figura 39. Ensayo con agua destilada con 12 gramos de cloruro de sodio.....	47

Índice de tablas

Tabla 1. Planificación temporal	4
Tabla 2. Planificación temporal (continuación).....	5
Tabla 3. Conductividad y su salida en tensión.....	24
Tabla 4. Resultados reales.....	37
Tabla 5. Conductividades aguas embotelladas	38

Capítulo 1

Introducción

La conductividad electrolítica [1] es la medida de la capacidad que tiene una disolución para conducir una corriente eléctrica. La conductividad electrolítica viene definida por la inversa de resistencia eléctrica $[\Omega]$, donde la millonésima parte de mhos es igual a un microsiemens. La resistividad es la inversa a la conductividad definida como la medida de la capacidad de una solución para resistir el flujo de una corriente eléctrica.

El agua es un disolvente polar que distribuye sus moléculas de una manera desigual de los electrodos, obteniendo una parte de molécula positiva, y otra negativa. Ello provoca que las moléculas de agua no puedan cargarse eléctricamente. Con lo cual, el agua no es un conductor eficiente de la corriente eléctrica sino las impurezas o materia disuelta que están presentes en ella.

Las sustancias disueltas en el agua se llaman electrolitos. La conductividad del agua se ve aumentada por la disolución de sustancias específicas introduciendo impurezas en el agua, las moléculas de agua gravitarán hacia ambos electrodos en un campo eléctrico. Los electrolitos en el agua se disocian positivamente y en iones con carga negativa, que serán libres de moverse en la disolución. El flujo de corriente eléctrica es el movimiento de las partículas cargadas positivamente hacia el electrodo negativo denominado ánodo y partículas cargadas negativamente hacia el electrodo positivo denominado cátodo, este movimiento se puede observar en la Figura 1.

El valor de la conductividad se ve afectada por el número de iones disueltos en la solución aumentando conforme más cantidad y movilidad allá de estos. El valor de la conductividad es directamente proporcional a la capacidad de la solución en conducir electricidad. Por tanto, cuanto mayor sea el valor de la conductividad mayor será la conductividad eléctrica.

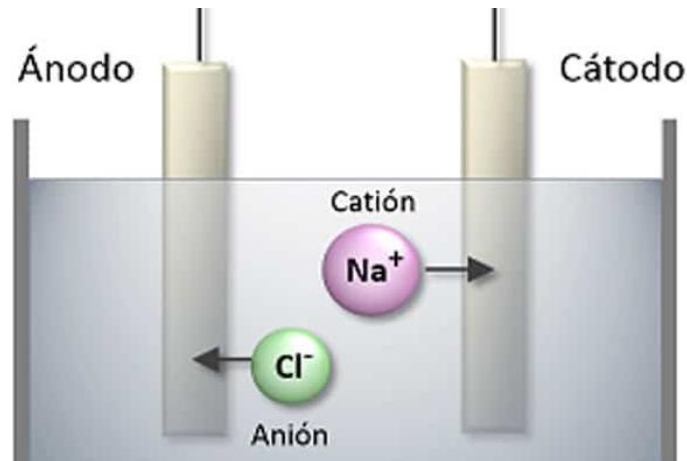


Figura 1. Método de conducción líquidos

La conductividad es de gran importancia debido a que puede producir problemas graves, por ejemplo, en el ámbito de la salud, el agua es necesaria para mantener una buena salud, con lo cual beber agua en unas condiciones no adecuadas puede provocar enfermedades de diversos tipos, el valor admisible de conductividad para aguas potables es de $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ [13]. Otro ejemplo de factor importante de la conductividad del agua está en el sector agrícola, el agua de riego no puede sobrepasar una conductividad de $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$. También otro factor de lo más relevante es cuando la conductividad es en torno a $0.05 \text{ S}/\text{cm}$ puede producir depósitos indeseables en partes cromadas causando problemas significativos en la fabricación de los semiconductores y componentes de turbinas utilizadas en la industria de la energía.

El agua teóricamente pura viene dada con la eliminación de todas las sales e iones libres del agua, a una temperatura de 25°C obtiene una conductancia específica de $0.056 \mu\text{S}/\text{cm}$ y una resistividad de $18,21 \text{ cm megaohms}$. Agua destilada o desmineralizada de alta calidad tienen unas conductancias específicas de $1.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ o menos. En la Figura 2 se muestra las conductividades típicas y rangos de varias sustancias.

Agua pura: $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$
Agua destilada: $0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$
Agua de montaña: $1.0 \mu\text{S}/\text{cm}$
Agua para uso doméstico: $500 \text{ a } 800 \mu\text{S}/\text{cm}$
Máx. para agua potable: $10055 \mu\text{S}/\text{cm}$
Agua de mar: $52 \text{ mS}/\text{cm}$

Figura 2. Rangos de conductividades en soluciones.

1.1. Motivación del trabajo fin de grado

El motivo principal para la elección de este trabajo ha sido el poder trabajar en el ámbito electrónico agrandando el campo de conocimiento y afianzando conceptos en el desarrollo tecnológico, todo el diseño y funcionamiento del PCB visto en Electrónica Analógica. Así como poder trabajar con un microcontrolador de 16 bits (en este caso el LaunchPad MSP430), debido a que en asignaturas de Instrumentación Electrónica y Diseño de Sistemas Electrónicos se han utilizado microcontroladores de 8 bits.

La capacidad de afrontar un nuevo microcontrolador y trabajar en un entorno de desarrollo como es el Code Composer Studio, un software en programación en C desarrollado por Texas Instruments. Con la principal característica de la capacidad de aprendizaje y sabiduría que este reto otorga, abarcando módulos como el ADC, LCD y el protocolo de comunicaciones UART. Otro factor importante como motivación para la realización de este TFG es poder trabajar en un protocolo de comunicaciones debido a que esta parte no ha sido trabajada de manera explícita en el plan de estudios del grado y se considera de importancia de cara al mundo laboral.

1.2. Objetivos

El principal objetivo será, por ende, diseñar y poner en funcionamiento una placa electrónica con microcontrolador capaz de mostrar la conductividad del líquido en el que se está midiendo además de un protocolo de comunicación UART para conectores RS232 con una adaptación de niveles a +/-12 voltios. Para ello se deben de cumplir los siguientes objetivos, resumidos a continuación:

- Estudio sobre la conductividad y concordancia en la electrónica.
- Estudio y selección de los componentes más adecuados para la optimización del circuito.
- Diseño y construcción de un circuito capaz de obtener una salida que relaciona la tensión-conductividad.
- Estudio de los microcontroladores para el desarrollo y elaboración en el entorno de desarrollo.
- Diseño en un entorno de desarrollo para la obtención de algoritmo optimizado en código C (usando CodeComposer).
- Programación del ADC para la lectura de los datos y posterior muestreo en LCD o en el protocolo de comunicación UART.
- Implementación del entorno de desarrollo al microcontrolador de 16 bits.
- Puesta en marcha de la totalidad de la placa electrónica teniendo en cuenta el montaje y pruebas.
- Análisis e interpretación de los resultados reales obtenidos.
- Elaboración de la memoria, detallando los pasos realizados anteriormente.

1.3. Contexto

El presente TFG supone la culminación de los estudios de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial para su autora realizados en la Universidad de Almería.

Se trata de una de las propuestas ofrecidas por el departamento de Electrónica. Se mueve, en general en el ámbito electrónico del diseño e implementación de dispositivo y aplicación, y en un entorno de desarrollo para microcontroladores.

1.4. Planificación temporal

Para la obtención de resultados ha sido posible en consecuencia de una ejecución sistemática de una serie de tareas con diferentes fases y con una determinada planificación. Durante aproximadamente seis meses de trabajo. En el siguiente *diagrama de Gantt* se presenta la cuantificación de horas reales destinadas a cada tarea que integran la planificación del TFG. Destacar que el cómputo de las horas totales excede el establecido de 300 horas según la normativa de la Universidad de Almería.

Tabla 1. Planificación temporal

TAREAS	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	TOTAL
Estudio y formación de la conductividad sobre diferentes líquidos no iónicos, familiarización de los conceptos implicados en el proyecto	20h	5h					25h
Elección de los componentes electrónicos que formarán parte del circuito, así como de su implantación.		35h					35h
Estudio del microcontrolador utilizado, con la especial atención de los componentes que lo forman, como por ejemplo los puertos GPIO, ADC y LCD.		30h					30h
Diseño del circuito electrónico, tanto de la formación del sensor como el acondicionador para la posterior implementación del microcontrolador. Incluyendo cálculo de componentes.			50h				50h
Documentación del proceso de diseño.			30h				30h

1.5. COMPETENCIAS UTILIZADAS EN EL TFG

Tabla 2. Planificación temporal (continuación)

TAREAS	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	TOTAL
Implementación física del diseño inicial. Arreglos en el dispositivo. Ensayos de calibración y medida.				30h			30h
Revisión de los cálculos realizados.				25h			25h
Programación del microcontrolador en el entorno de desarrollo.				80h			80h
Diseño del circuito electrónico junto con el microcontrolador.					40h		40h
Ajustes en el prototipo.					20h		20h
Obtención de los resultados.						20h	20h
Redacción de la memoria.						50h	50h
Total horas							435h

1.5. Competencias utilizadas en el TFG

El Grado de Ingeniería Electrónica Industrial otorga a los titulados la formación adecuada para abarcar distintos tipos de problemas industriales desde los diversos ámbitos del conocimiento. Durante el desarrollo de este TFG han sido trabajadas una serie de competencias sin las cuales no hubiera sido posible alcanzar los resultados obtenidos y que consuman un perfil profesional en el área de la ingeniería. El compromiso para la culminación de los objetivos del proyecto, como la capacidad de búsqueda de información y el trabajo tanto de forma autónoma y en equipo forman parte de una serie de competencias básicas, generales, transversales y específicas de las cuales destacan [12]:

- Poseer y comprender conocimientos (CB1) Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.

- Aplicación de conocimientos (CB2) Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- Capacidad de emitir juicios (CB3) Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
- Capacidad de comunicar y aptitud social (CB4) Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
- Habilidad para el aprendizaje (CB5) Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

Correspondencia entre las competencias genéricas de la Universidad de Almería:

- Habilidad en el uso de las TIC (UAL2) Utilizar las Técnicas de Información y Comunicación (TICs) como una herramienta para la expresión y la comunicación, para el acceso a fuentes de información, como medio de archivo de datos y documentos, para tareas de presentación, para el aprendizaje, la investigación y el trabajo cooperativo.
- Capacidad para resolver problemas (UAL3) Capacidad para identificar, analizar, y definir los elementos significativos que constituyen un problema para resolverlo con rigor.
- Comunicación oral y escrita en la propia lengua (UAL4) Comprender expresar con claridad y oportunidad las ideas, conocimientos, problemas y soluciones a un público más amplio, especializado o no especializado (y sentimientos a través de la palabra, adaptándose a las características de la situación y la audiencia para lograr su comprensión y adhesión).
- Capacidad de crítica y autocrítica (UAL 5) Es el comportamiento mental que cuestiona las cosas y se interesa por los fundamentos en los que se asientan las ideas, acciones y juicios, tanto propios como ajenos.
- Conocimiento de una segunda lengua (UAL7) Entender y hacerse entender de manera verbal y escrita usando una lengua diferente a la propia.
- Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma (UAL9) Capacidad para diseñar, gestionar y ejecutar una tarea de forma personal.

Correspondencia con las competencias específicas del título:

- CT1. Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.

1.5. COMPETENCIAS UTILIZADAS EN EL TFG

- CT3. Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
- CT4. Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
- CT5. Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
- CT10. Capacidad de trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.
- CB1. Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra 1 1.1 24/133 lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.
- CB3. Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
- CRI4. Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
- CRI5. Conocimientos de los fundamentos de la electrónica.
- CRI12. Conocimientos y capacidades para organizar y gestionar proyectos. Conocer la estructura organizativa y las funciones de una oficina de proyectos.
- CTEE1. Conocimiento aplicado de electrotecnia.
- CTEE2. Conocimiento de los fundamentos y aplicaciones de la electrónica analógica.
- CTEE3. Conocimiento de los fundamentos y aplicaciones de la electrónica digital y microprocesadores.
- CTEE4. Conocimiento aplicado de electrónica de potencia.
- CTEE5. Conocimiento aplicado de instrumentación electrónica.
- CTEE6. Capacidad para diseñar sistemas electrónicos analógicos, digitales y de potencia.
- CTEE10. Conocimiento aplicado de informática industrial y comunicaciones.
- TFG. Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.
- CTEQ2. Capacidad para el análisis, diseño, simulación y optimización de procesos y productos.

1.6. Estructura de la memoria del TFG

La memoria ha sido estructurada con el objetivo de acompañar al lector por todo el proceso de diseño de un medidor de la conductividad en líquidos con procesamiento en microcontrolador.

En el capítulo 2, se presentará los materiales y métodos. Este capítulo permitirá al lector conocer los diferentes tipos de materiales que se han escogido, y los métodos y programas necesarios en el proceso del conductímetro.

El capítulo 3 ha sido destinado al cálculo y diseño del sensor, donde el lector podrá conocer paso por paso el cálculo de la parte analógica para el posterior diseño del PCB, además de la programación en el entorno de desarrollo para el microcontrolador.

En el capítulo 4, se ha realizado un apartado de resultados, donde el lector puede observar los resultados obtenidos en las diferentes medidas tomadas.

Por último, el capítulo 5 contiene unas breves conclusiones resaltando las deducciones más importantes desde el punto de vista de los resultados, y la propuesta de posibles mejoras en las cuales se puede seguir trabajando.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2.1 Materiales

Los materiales que se han utilizado en este proyecto se han empleado a lo largo del grado de Ingeniería Electrónica Industrial, las asignaturas en las cuales se han utilizado vienen dadas por: Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Electrónica Analógica [43103211], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].

2.1.1. XR2206

De los distintos generadores de señales de ondas senoidales se ha seleccionado el XR2206 [3]. Se utilizará para generar una señal sinusoidal, en una frecuencia de 1KHz.

Este dispositivo se compone de cuatro bloques funcionales, un oscilador controlado por voltaje (VCO), un multiplicador analógico y sinusoidal, un amplificador buffer de ganancia unitaria, y un conjunto de interruptores de corriente

El patillaje indicado se corresponde con encapsulados de orificio pasante (DIP-16) y montaje superficial (SO-16). Su esquema interno se corresponde con el esquema mostrado en la Figura 3. El modelo que se ha utilizado es el XR-2206CP, el cual tiene un rango de temperatura de operación de 0°C a 70°C. La frecuencia con la que puede trabajar se puede seleccionar en un rango de operación externamente entre 0.01Hz a 1MHz. En el circuito se dispone para trabajar como se ha mencionado anteriormente en un 1KHz. En la Figura 3 se puede observar el patillaje y esquema interno del XR2206.

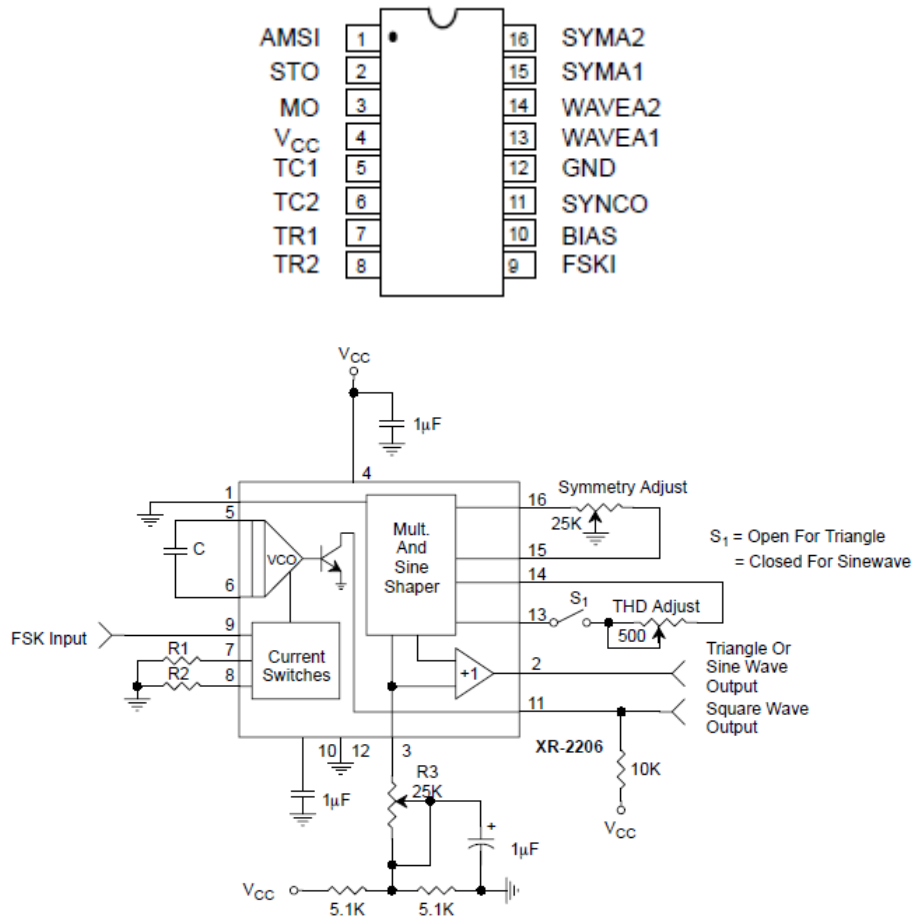


Figura 3. Patillaje y esquema interno del XR2206

Para evitar deposiciones en los electrodos que pueden aparecer en corriente continua, se permite trabajar en corriente alterna. Por ende, se ha dispuesto este dispositivo. Analizando los distintos generadores de señal existentes en el mercado se ha seleccionado el XR2206 debido a que se puede obtener una frecuencia específica en este caso 1000Hz. Este dispositivo lo proporciona perfectamente sin distorsión de onda, obteniendo una salida requerida y perfectamente sinusoidal.

2.1.2. MC1458

Se trata de un amplificador operacional dual de alto rendimiento. En la Figura 4 se puede observar el patillaje del MC1458. Se ha seleccionado este dispositivo debido a que está diseñado para proporcionar un rendimiento superior en modo de seguidor de voltaje en aplicaciones analógicas. Además de poseer unas características que cumplen con las especificaciones requeridas, el dispositivo está disponible en encapsulado de orificio pasante (DIP-8) y montaje superficial (SO-8).

2.1. MATERIALES

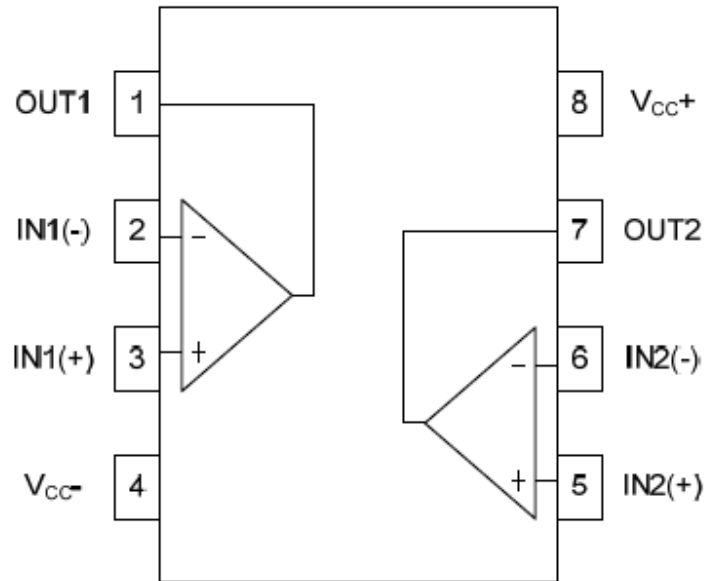


Figura 4. Patillaje de MC1458

El objetivo de colocar un amplificador operacional MC1458 [4] en configuración de seguidor de tensión permite obtener una corriente requerida al dispositivo asegurando estabilidad y el correcto funcionamiento del circuito.

2.1.3. TL082

Este amplificador operacional TL082 [5] se utilizará para dos etapas; la primera una etapa de ganancia y para otra etapa de acondicionamiento llevando la señal al ADC del microcontrolador.

El patillaje indicado en la Figura 5 corresponde a los encapsulados de orificio pasante (DIP-8) y montaje superficial (S0-8). El dispositivo cuenta con unas altas velocidades de rotación, baja polarización de entrada y corrientes de compensación, ello sumado al rendimiento proporcionado más el bajo coste ha sido unas de las principales motivos para la elección de este.

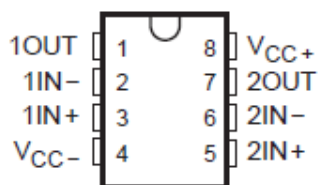


Figura 5. Patillaje de TL082

2.1.4. LT1431

Para evitar irregularidades en la alimentación y evitar que el circuito dependa de una fuente de tensión constante, se disponen de una referencia de tensión, LT1431 [8]. Las referencias de tensión son dispositivos mucho más precisos que los reguladores de tensión, además su coeficiente térmico es menor. Esta referencia de tensión con un encapsulado TO92 y cuyo patillaje se puede observar en la Figura 6 está preparada para dar 2.5 voltios a su salida, tensión la cual se utilizará para la etapa de acondicionamiento de la señal.

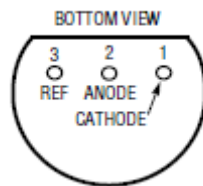


Figura 6. Patillaje de TL1431

2.1.5. MSP430FR6989

El MSP430 trata de una familia de microcontroladores fabricados por Texas Instruments, compuesto por una CPU de 16 bits. Se ha precisado de este microcontrolador debido a que se caracteriza por un ultra bajo consumo de energía, además de su diseño para aplicaciones embebidas de bajo costo. En este proyecto se trabaja con el LaunchPad MSP430FR6989 Development Kit [6]. En la Figura 7 se puede observar el LaunchPad.

Las características principales que se han utilizado para llevar a cabo todo este trabajo vienen dadas en primer lugar por el módulo ADC del LaunchPad. El módulo ADC admite conversiones analógicas a digitales de 12 bits, con 32 memorias intermedias independientes de conversión y control. Incorpora un muestreo en períodos programables controlado por software o temporizadores. El voltaje de referencia es programable, en este caso se ha seleccionado por software a 2.5 voltios.



Figura 7. MSP430FR6989 LaunchPad Development Kit

2.1.7 MAX232

El MAX232 [10] se trata de un dispositivo con un circuito integrado, el objetivo es convertir las señales de un puerto serie RS-232 a señales compatibles con los niveles TTL de circuitos lógicos. Se ha utilizado como interfaz para las señales RX y TX (recepción y transmisión de datos respectivamente). Se ha dispuesto en un configuración explicada en el apartado cálculos para convertir de [0V ; 3.3V] a [-12V ; 12V]. El patillaje indicado en la Figura 10 corresponde a los encapsulados de orificio pasante (DIP-16) y montaje superficial (SO-16).

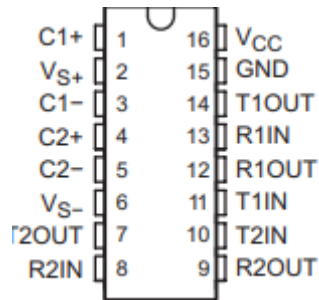


Figura 10. Patillaje MAX232

2.1.8. Conector RS-232

RS-232 designa una norma para el intercambio de datos binarios serie entre un equipo terminal de datos, en este caso es una computadora y un equipo de comunicación de datos, como es el MSP430. Se trata de un conector tipo DB-10 (10 pines), aunque la norma específica DB-9 en este caso para la aplicación que se le va a dar es mejor el tipo DB-10. Este conector es referido al protocolo de comunicaciones UART, su principal función es la de conectar como se ha explicado anteriormente el PCB con la computadora. En la Figura 11 se puede observar el dispositivo utilizado para la intersección con el conector.

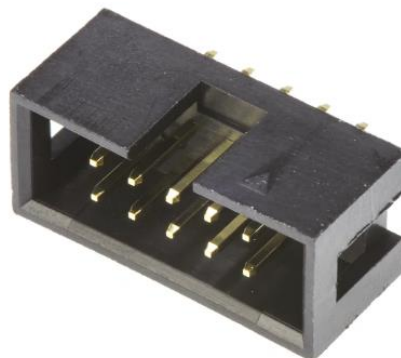


Figura 11. Conector RS-232

2.2. MÉTODOS

2.1.9. Componentes pasivos y otros componentes

Para completar el circuito se requiere de condensadores, resistencias, tanto fijas como variables, y diodos. Los condensadores utilizados principalmente para cumplir la función de desacoplo. Las resistencias fijas para que no afecte al comportamiento de circuito se utilizarán resistencias con una tolerancia del 1% en la medida en la que pueda ser posible. Las resistencias variables utilizadas para calibrar el error que nos puedan dar las resistencias fijas y obtener unos valores requeridos. El diodo utilizado junto con un amplificador operacional forma parte de una etapa de importancia y fundamental en el sensor, ello es debido a que ambos constituyen un diodo ideal que se utilizará para la rectificación de la señal. Los diodos zener referido al protocolo de comunicación tienen como principal función proteger al instrumento.

Otros componentes que se han utilizado para completar el diseño ha sido el uso: (i) Los zócalos se han utilizado debido a que en el proceso de soldadura se trabaja a altas temperaturas, para evitar el contacto de los dispositivos más delicados con el soldador y poder ocasionar quemados o imperfecciones en los dispositivos. (ii) Las clemas se utilizan para facilitar la introducción de elementos externos a la PCB, por ejemplo, los cables de alimentación van conectados a la placa a través de las clemas, al igual que sucede con los electrodos. (iii) Los jumpers se han utilizado junto con el puente bipolar sobre todo como función seleccionadora de diferentes configuraciones.

2.2 Métodos

2.2.1. OrCAD

Este paquete de software se compone de un conjunto de herramientas de simulación y diseño de circuitos asistidos por ordenador. La elección de este software es debido a su familiarización con su uso, debido a que se ha utilizado en gran parte en las asignaturas de electrónica.

Está compuesto de una serie de programas específicos que forman parte del proceso de diseño del circuito. Los programas que se han utilizado principalmente para la obtención de la placa son principalmente; Schematics, Capture y Layout.

Schematics es una herramienta para la simulación de circuitos. La utilidad principal de esta herramienta es que nos permite simular el circuito de una forma comprensible y familiar como es el esquema eléctrico. Esto es muy importante, debido a que nos permite analizar y comprobar cómo funciona el circuito obteniendo los resultados tanto analíticamente como gráficamente.

Incorpora una herramienta compuesta por una serie de librerías en las cuales se pueden encontrar una gran variedad de componentes electrónicos. Asimismo, se puede crear o editar partes y símbolos, y luego almacenarlos en bibliotecas nuevas o ya existentes. Los dispositivos se conectan entre sí mediante pistas realizando la función de conexión eléctrica.

Una vez simulado el circuito, podemos analizar la respuesta en forma gráfica, obteniendo la respuesta en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.

Además, esta herramienta incorpora unos comandos útiles para hacer cualquier tipo de cálculos entre las funciones, mostrando la gráfica de la función resultante.

Capture es una herramienta utilizada para el diseño de esquemas de circuitos. La principal utilidad de esta herramienta e igual que el Schematics es que permite una conexión del circuito de una manera fácil de comprender y familiar. Una ventaja principal es que se puede pasar las conexiones al diseño del circuito físico, por ende, se empieza a la disposición del circuito con los componentes ya conectados entre sí.

Dos de las funcionalidades principales y que por ello se utilice tanto esta herramienta, vienen dadas por; (i) el poder de crear nuevos componentes o modificar los ya existentes, permite el diseño de nuevos elementos o dispositivos necesarios y posteriormente, poder colocarlos en el esquema junto con los ya existentes. (ii) tener el dominio de asignar huellas (footprint) para ello tiene la herramienta 'library manager' todo esto posibilita la representación del elemento en el circuito físico.

Una vez diseñado el esquema, toda la información se exporta a la herramienta de Layout donde se realizarán las pistas definitivas para la obtención del resultado final. Como se ha mencionado anteriormente, Capture es especialmente necesario ya que se obtienen las conexiones entre componentes de manera intuitiva, facilitando el trabajo para la siguiente herramienta.

Layout es una herramienta utilizada para definir las conexiones físicas entre los componentes del circuito. Estas conexiones se pueden hacer mediante pistas que discurren entre distintas capas que el usuario puede determinar. Esta herramienta permite crear las pistas a partir de las conexiones que se han definido en la anterior herramienta (OrCAD Capture) y en la capa que se quiera trabajar.

En esta herramienta se puede crear huellas de los componentes, la cual es importante en algunos dispositivos que requieran una numeración de patilla específicas. También se puede crear texto facilitando la comprensión del circuito.

Una vez creadas las pistas o conexiones en las capas que se hayan considerado pertinentes, se obtiene en un formato de imagen vectorial 2D denominado Gerber. En el caso de este proyecto, se ha decidido enviar los archivos Gerber a una empresa para la obtención del PCB. La empresa que se ha seleccionado es JLCPCB [14], se ha seleccionado esta empresa por el servicio y calidad.

2.2.2. Code Composer Studio

Para la programación del microcontrolador MSP430 se utiliza el lenguaje de programación C, para hacerlo posible es necesario un entorno de desarrollo. Para el progreso de la programación se ha utilizado un software propiedad de Texas Instruments (TI), se trata del programa de Code Composer Studio (CCS).

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para procesadores integrados y la familia de microcontroladores de Texas Instruments. Code Composer Studio está formado por un conjunto de herramientas para hacer posible el desarrollo y la depuración de aplicaciones embebidas. Entre otras funciones, se ha podido destacar un compilador de C/C++ de manera optimizada, un entorno de compilación de proyectos, un editor de código fuente, un depurador, etc. Se trata de un entorno de desarrollo integrado intuitivo y fácil de utilizar, proporciona una interfaz que lleva al usuario paso por paso al desarrollo del proceso de las aplicaciones. Ofrece un entorno de desarrollo con multitud de posibilidades para el desarrollo de sistemas integrados.

2.2. MÉTODOS

Esta herramienta ha sido utilizada en diversas funcionalidades, en primer lugar, se ha diseñado el código en su espacio de trabajo, pudiendo compilar dicho código para la correcta corrección de errores. Code Composer Studio proporciona un depurador del cual ha sido útil verificar el procedimiento que sigue el programa. Sobre todo, destacar la facilidad para flashear el programa diseñado en el microcontrolador.

2.2.3. Matlab

Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Entre sus aplicaciones básicas destaca la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, etc.

Esta herramienta ha sido utilizada para la obtención de la salida mediante una representación gráfica de la cual se ha realizado un barrido de los posibles datos dentro del rango obteniendo para cada salida de tensión el valor correspondiente a la conductividad

2.2.4. AutoCAD

Es un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D. Es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. Se puede crear dibujos o planos genéricos, incluye geometría básica para dibujar líneas, arcos, cuervas, etc. Además, se puede insertar librerías de símbolos de diferentes temas en relación con la industria.

En este trabajo el programa AutoCAD se ha utilizado para el desarrollo del diseño de los circuitos electrónicos pudiéndose añadir a esta memoria de una manera más legible y entendible, haciéndose más visual a la vista para el lector.

Capítulo 3

Cálculos y diseño

3.1. Cálculo y diseño del sensor

Es de destacar la importancia de este apartado en la resolución del sistema, debido a que el diseño del circuito electrónico es una de las partes más complejas y en la que hay que tener especial atención. Un pequeño error en los cálculos o en la etapa de diseño puede dar un resultado diferente a lo esperado.

Las asignaturas en el Grado de Ingeniería Electrónica Industrial en las que se adquieren los conocimientos necesarios para la realización de este capítulo son las que se describen a continuación: Matemáticas I y II [44101101] [44101102], Programación [44101107], Teoría de Circuitos y Máquinas Eléctricas [44102205], Automatización Industrial [44102208], Electrónica Básica [44102206], Modelado y Control de Sistemas Continuos [43103214], Control por Computador [43103220], Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Electrónica Analógica [43103211], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].

En este capítulo se describirá con detalle las etapas del circuito. Se ha comentado con especial consideración las fórmulas utilizadas y los resultados que se han ido obteniendo.

Inicialmente se desea una alimentación simétrica de $\pm 12V$ utilizando una fuente de tensión. El dispositivo XR2206 se ha conectado a la fuente de tensión, como se ha explicado anteriormente, en el apartado de materiales (2.1) se puede observar la disposición de las patillas del dispositivo XR2206 en la Figura 12, los cálculos necesarios en este elemento son para conseguir la frecuencia y la amplitud de trabajo necesaria. En este sistema se va a trabajar en 1000 Hz, con lo cual desde la patilla 5 a la 6 hay colocado un condensador no polarizado, para determinar los valores de resistencias y condensadores para obtener dicha frecuencia, en el datasheet [3] del dispositivo se puede observar la ecuación (1) para la frecuencia de operación:

$$f_0 = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

Donde f_0 [Hz] es la frecuencia de operación, C [F] es el condensador para dicha frecuencia y R [Ω] es la resistencia para 1000 Hz. La resistencia y el condensador a los que hace referencia la fórmula son los situados en la patilla 7 y entre 5 y 6 respectivamente. Como se necesita una buena precisión en la frecuencia se ha dispuesto de un selector para escoger entre varios valores de condensadores y dos resistencias variables, para obtener el máximo valor ajustable posible. Además, se disponen de una resistencia variable más para ajustar la amplitud, obteniendo 2V.

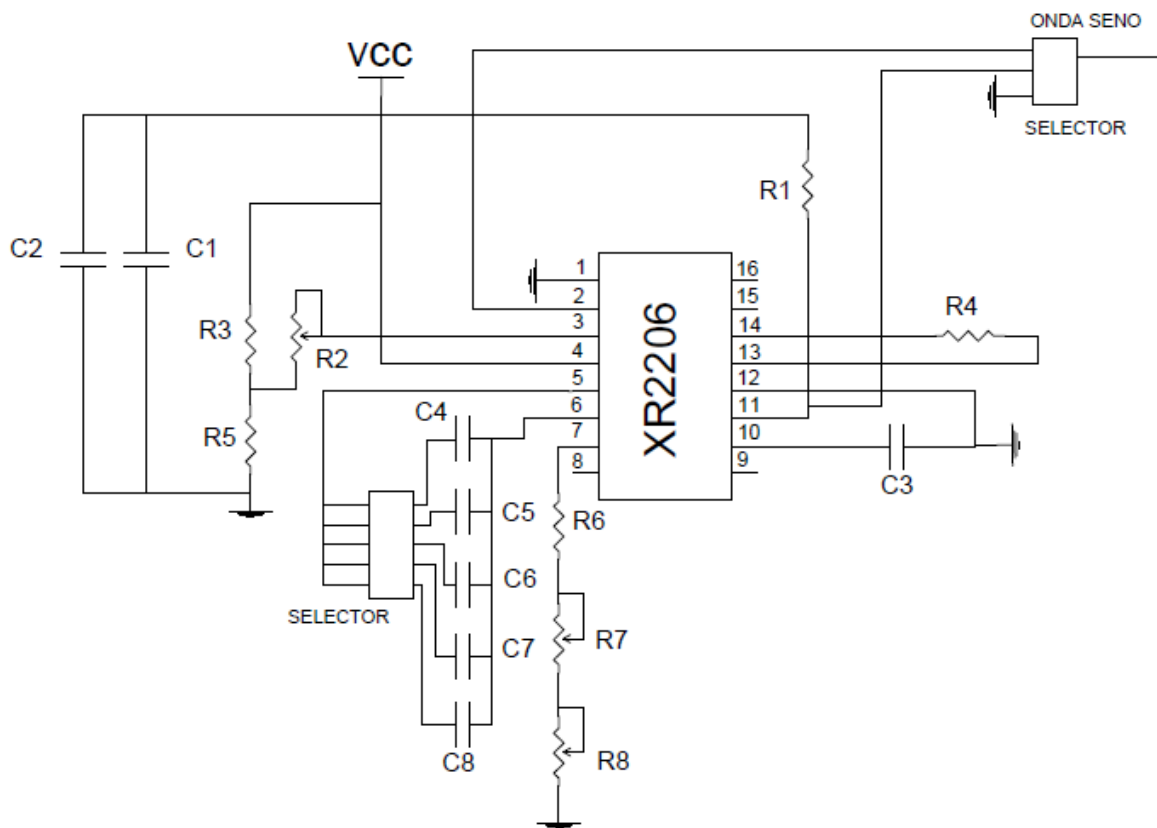


Figura 12. Esquema del dispositivo XR2206

La siguiente etapa del circuito se trata de un seguidor de tensión Figura 13, para ello se ha utilizado un amplificador operacional MC1458 y una resistencia (R9) de valor de 10K Ω , aumentando la corriente del circuito obteniendo un valor de la orden de 20 mA, ello es para garantizar una corriente significativa asegurando el correcto funcionamiento del circuito.

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

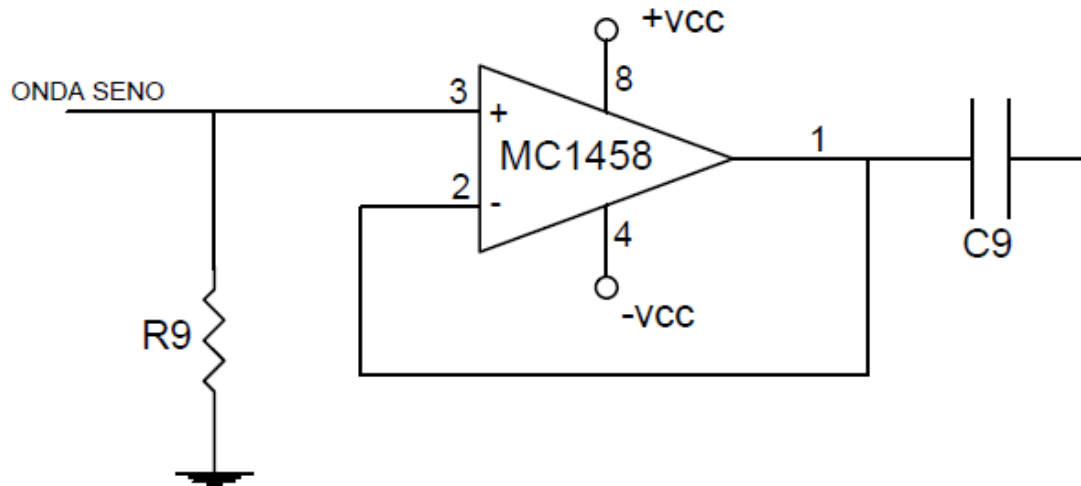


Figura 13. Seguidor de tensión MC1458

Entre el seguidor de tensión y el sensor se dispone de un condensador (C9) de 22 uF con el propósito de que no pase corriente continua a los electrodos. Y con el valor suficiente como para no distorsionar la onda senoidal.

A continuación del sensor, se ha dispuesto de un rango para abarcar de una manera más precisa el valor de la conductividad del líquido que se esté tratando o midiendo. Para ello se ha establecido el siguiente rango de 0.01 ms a 100 ms.

R_s es el valor de la resistencia en el punto de equilibrio del rango. Para calcular la resistencia de R_s se debe de conocer previamente los electrodos que se va a utilizar. En este caso los electrodos del sensor son tornillos de acero A4-80, con diámetro de 6 mm, la separación entre las barras es de 15 mm y la longitud de la altura de las barras es de 35 mm, en la Figura 14 se puede observar la medida de los electrodos junto con la distancia de separación entre ellos. La superficie efectiva de los electrodos viene dada por:

$$S_{ef} = 2\pi rL = 2\pi \cdot 0.3 \cdot 3.5 = 6.597 \text{ cm}^2 \quad (2)$$

La constante de la celda, k , es una característica de la misma. Viene dada por:

$$k = \frac{L}{S_{ef}} [\text{cm}^{-1}] \quad (3)$$

Donde L [cm] es la distancia entre los dos electrodos, y S_{ef} [cm²] es la superficie efectiva calculada anteriormente. El valor de la constante de la celda muestra la configuración física particular de la celda. Por ejemplo, un valor de 1 cm⁻¹ usualmente poseen electrodos pequeños y espaciados, mientras que las celdas con valores de constante en el entorno de 0.1 cm⁻¹ poseen electrodos grandes y poco espaciados.

En este caso el valor de la constante de la celda es de 0.227 cm^{-1} con lo cual se deduce que los electrodos son de un tamaño grande y con poca separación entre ellos. En los conductímetros profesionales las sondas vienen identificadas por el valor de k .

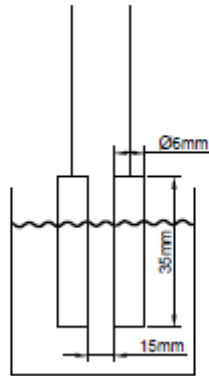


Figura 14. Medidas de los electrodos

Se denomina $R_x [\Omega]$ a la resistencia que ofrece el líquido no iónico entre los electrodos, dicha resistencia viene dada por la ecuación (4).

$$R_x = \frac{1}{\sigma} \frac{L_{sep}}{S_{ef}} \quad (4)$$

Donde $L_{sep} [\text{cm}]$ es la separación entre las barras de los electrodos, $S_{ef} [\text{cm}^2]$ es la superficie efectiva de los electrodos y $\sigma [\text{S}]$ es la conductividad del líquido. A continuación, se muestran los valores de la resistencia en centro el rango, así como en los extremos del rango.

$$\begin{aligned} R(0.01 \text{ ms}) &= 22737.6 \Omega \\ \text{en el equilibrio } R(50 \text{ ms}) &= 45.475 \Omega \\ R(100 \text{ ms}) &= 2.273 \Omega \end{aligned}$$

Para aumentar la tensión de salida se ha realizado una etapa de ganancia aplicado en la ecuación (5) se ha diseñado un amplificador operacional en modo no inversor, el amplificador utilizado se trata de un TL082, obteniendo una ganancia en la tensión de salida de:

$$G = 1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \quad (5)$$

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

La ganancia tendrá un valor de 2, para ello se ha colocado unos valores de R_{11} de $10k\Omega$ y R_{12} de $10k\Omega$. Como se quiere conseguir la máxima precisión, en serie a R_{12} hay una resistencia variable (R_{13}), con el objetivo que la ganancia obtenga el valor expuesto anteriormente. Esta precisión en esta etapa es tan importante debido a que la ganancia va multiplicando a la tensión de salida total. Por ende, cualquier pequeña variación multiplica a la tensión de salida obteniendo un resultado distorsionado. En la Figura 15. Aumento de la ganancia en capture se puede observar la etapa descrita.

Después sigue un amplificador operacional junto con un diodo. Ello forma un diodo ideal. Esta configuración se utiliza para rectificar la onda senoidal. La señal se queda sólo con valores del extremo positivos, con el objetivo de obtener corriente continua. Lo que hace de esta configuración un diodo ideal es que, al estar retroalimentado en el bucle, la caída de tensión del diodo de 0.7 voltios se hace casi 0 voltios por que se divide entre la ganancia del lazo abierto que es bastante mayor, aproximándose a 0 voltios la caída de tensión.

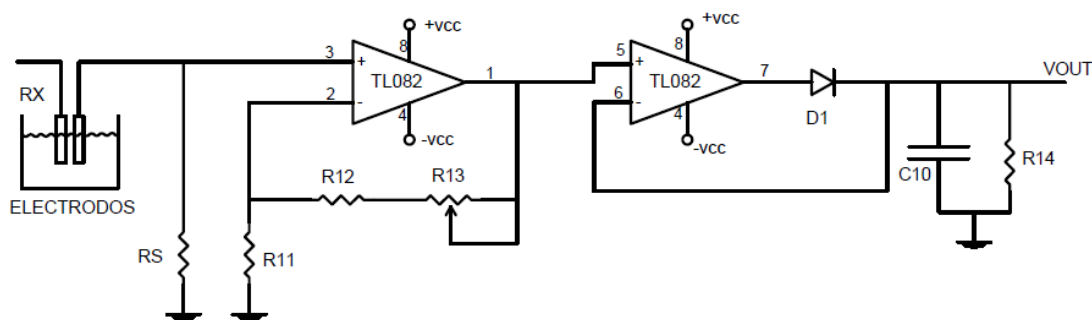


Figura 15. Aumento de la ganancia en capture

Hasta aquí la salida de tensión que se obtiene viene dada por la ecuación (6)

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}\right) \cdot \left(V_1 \cdot \frac{R_S}{R_X + R_S}\right) \quad (6)$$

Donde R_{11} y R_{12} son los valores de $10k\Omega$ calculado anteriormente. V_1 es la tensión que nos proporciona el XR2206, al ser 2V de amplitud obtenemos 1V de salida. R_S [Ω] es la resistencia en el punto de equilibrio, y R_X [Ω] es la resistencia que proporcionan los electrodos del sensor.

La siguiente etapa la forma el acondicionador, en el diseño de este hay que tener en cuenta la entrada que permite el ADC del micro MSP430. En el datasheet [7] se observa que la entrada se puede programar, se ha elegido una salida del acondicionador entre 0 voltios y 2.5 voltios debido a que se trata de un rango recomendado y normalizable. Para los cálculos del acondicionador se debe de calcular la tensión de salida en los valores máximos y mínimos, para ello se utilizaba la ecuación de salida expuesta anteriormente. En la siguiente tabla se ha detallado para los valores de conductividad del centro y los extremos el valor de la resistencia del sensor y su tensión de salida.

Tabla 3. Conductividad y su salida en tensión

CONDUCTIVIDAD [ms]	RESISTENCIA DEL SENSOR [Ω]	TENSIÓN [V]
0.01	22737.6	$3.99 \cdot 10^{-3}$
50	45.47	1
100	2.27	1.904

Como se puede observar en la tabla la salida de tensión es de $3.99 \cdot 10^{-3}$ voltios como valor mínimo y 1.904 voltios es la tensión máxima que se obtendrá en la salida de Vout. El acondicionador se ha calculado para proporcionar una tensión de 0 voltios a 2.5 voltios dependiendo de la tensión que haya en Vout.

Para el diseño del acondicionador se debe de calcular la ecuación (7) de la recta que nos pasa por los dos puntos anteriores.

$$y = bx + a \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 = b \cdot 3.99 \cdot 10^{-3} + a \\ 2.5 = b \cdot 1.904 + a \end{array} \right\} a = -0.052; b = 1.339$$

Siendo 'a' el desplazamiento y 'b' la ganancia que debe de tener el acondicionador. A continuación, se puede observar la gráfica en la Figura 16 mostrando la recta existente entre la salida del sensor y la entrada al microcontrolador:

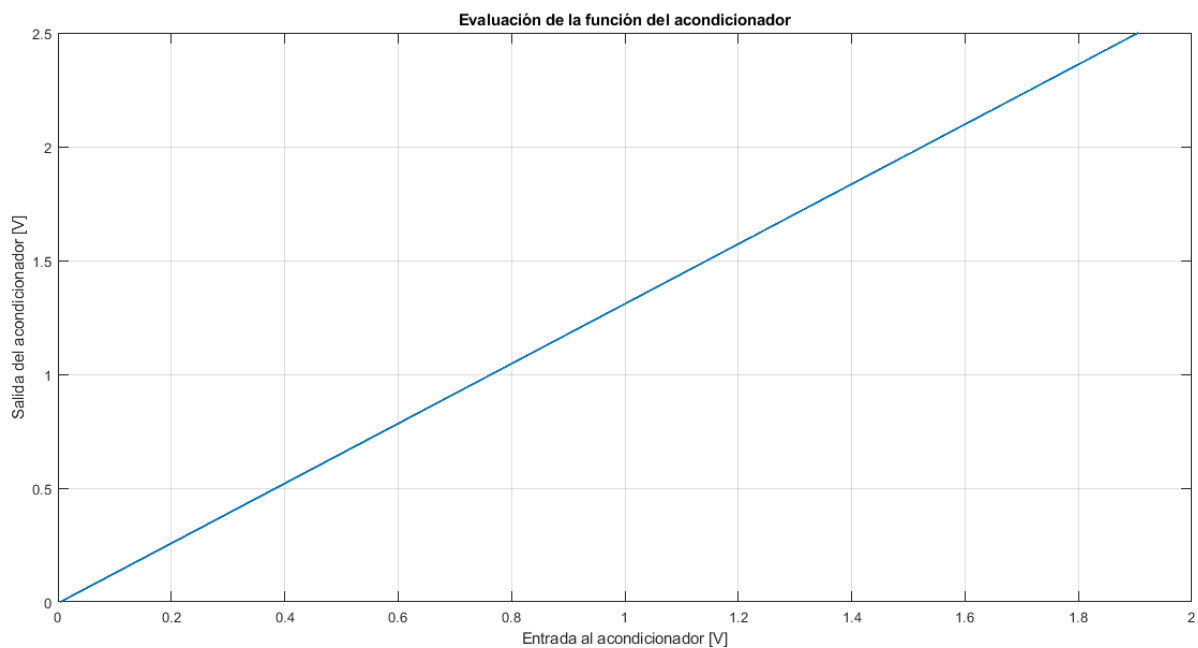


Figura 16. Evaluación de la función del acondicionador

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

Para la etapa del acondicionador se dispone de dos amplificadores operacionales TL082, en configuración de inversor ambos. Por tanto, se obtienen las siguientes expresiones haciendo referencia a la ganancia de cada uno de ellos.

$$a = -V_{REF} \cdot \frac{R_{19}}{R_{20}} \quad (8)$$

$$b = \frac{R_{16}}{R_{15}} \quad (9)$$

La tensión de referencia se obtendrá del dispositivo LT1431, el valor de tensión que se pretende conseguir es de 2.5 voltios. Este valor ha sido elegido por aparecer como valor típico de alimentación, debido a que se trata de un valor normalizado para muchos dispositivos de referencia de tensión, teniendo más información sobre el comportamiento del dispositivo a esa tensión.

En el datasheet [8] del dispositivo muestra la configuración del circuito de tensión ajustable a 2.5 voltios. Como se puede observar en la Figura 17. El valor de R_L se calcula a partir de la corriente que se requiera proporcional. En este caso, del datasheet se comprueba que la corriente máxima que puede suministrar el dispositivo es de 100 mA, teniendo en cuenta que la tensión de referencia alimentará sólo el acondicionador, se ha probado que dimensionando el circuito para 20 mA funciona correctamente. Por lo tanto, la resistencia R_L tendrá un valor de 510Ω .

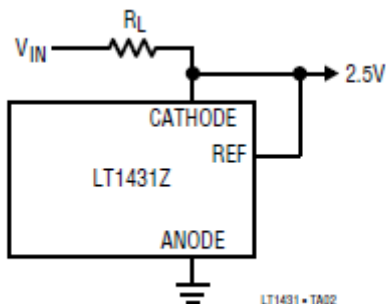


Figura 17. Configuración de la referencia de tensión

Una vez calculado el valor de la tensión de referencia, se obtienen los valores de las resistencias que forman el acondicionador Figura 18. La expresión del desplazamiento y ganancia ecuación (8) y ecuación (9) deja en función de dos resistencias, con lo cual, hay que tomar una situación de compromiso entre ambas resistencias para la obtención de valores que sean lógicos para ambas. En el primer amplificador las resistencias serán: $R_{15} = 2800 \Omega$ y $R_{16} = 3749.2 \Omega$. En el segundo amplificador la ganancia tiene que ser unitaria para no perturbar la ganancia total del acondicionador. Se obtienen unos valores de resistencias de: $R_{18} = R_{19} = 316 \Omega$ y $R_{20} = 15192.3 \Omega$.

Al trabajar con valores pequeños cualquier variación del valor de las resistencias pueden modificar en gran medida la salida del circuito. Para evitar esos errores se han colocado unas resistencias variables. Los valores teóricos con los valores reales se ajustan más modificando las resistencias variables.

El potenciómetro del primer amplificador es de $3K3 \Omega$ multivuelta y el del segundo amplificador de $20 K \Omega$ multivuelta. Consiguiendo un ajuste real y en concordancia a lo calculado. En la Figura 18 se puede observar la disposición de los componentes para formar el acondicionador del sistema.

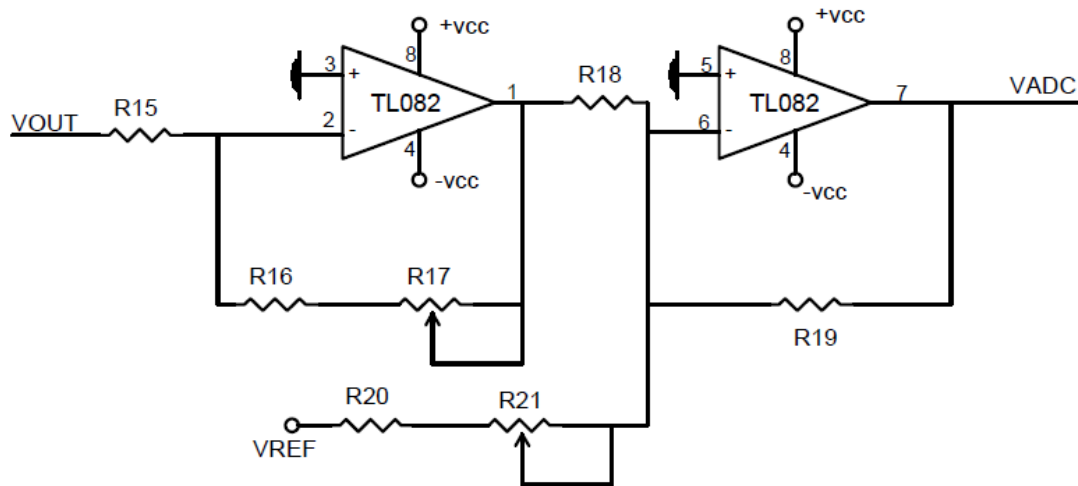


Figura 18. Diseño acondicionador

Para obtener el diseño del circuito completo se debe de añadir el protocolo de comunicaciones UART, para ello se ha dispuesto del siguiente circuito en la Figura 19. Se ha utilizado el dispositivo MAX232 para convertir las señales del puerto serie RS-232 a señales compatibles con los niveles TTL de circuitos lógicos. Por un lado, el microcontrolador se conecta a las patillas 9 y 10 siendo RX y TX respectivamente (transmisión y recepción de datos). Y, por otro lado, se han conectado las patillas 7 y 8 del MAX232 al adaptador RS-232, siendo las patillas 7 y 8 la resistencia de la transmisión de datos y la resistencia de la recepción de datos respectivamente.

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

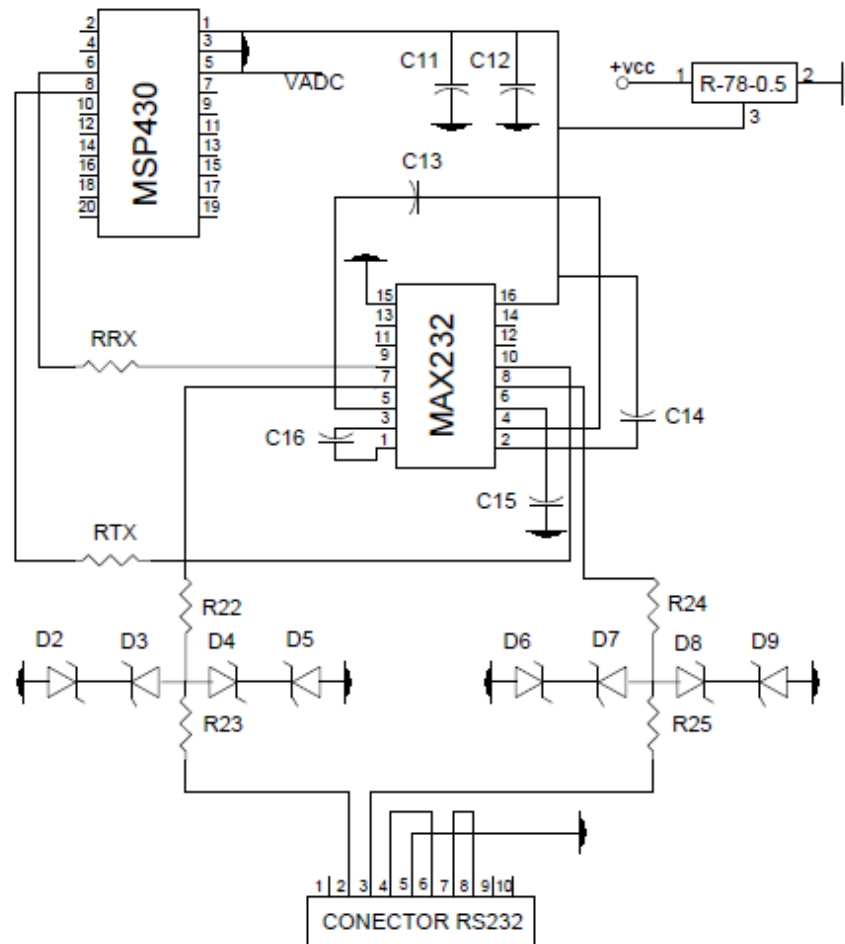


Figura 19. Circuito protocolo comunicación UART

Obtenida la salida del acondicionador se procede a la programación del microcontrolador. Pero antes de la programación se debe graficar como de lineal va a ser los valores con los que vamos a trabajar, todo esto es para la elección de código de programación más óptimo.

Para graficar los valores se ha utilizado el programa descrito anteriormente Matlab, se ha realizado un script del rango del ADC frente a un barrido de valores de conductividad posibles. A continuación, en la Figura 20, se muestra la gráfica para la salida del acondicionador de [0 2.5] V a los diferentes valores de conductividad existentes entre [0.01 mS a 100mS].

Como se puede apreciar en la Figura 20, la gráfica obtenida no es lineal, con lo cual se deberá programar la función de transferencia para obtener el valor correcto de la conductividad.

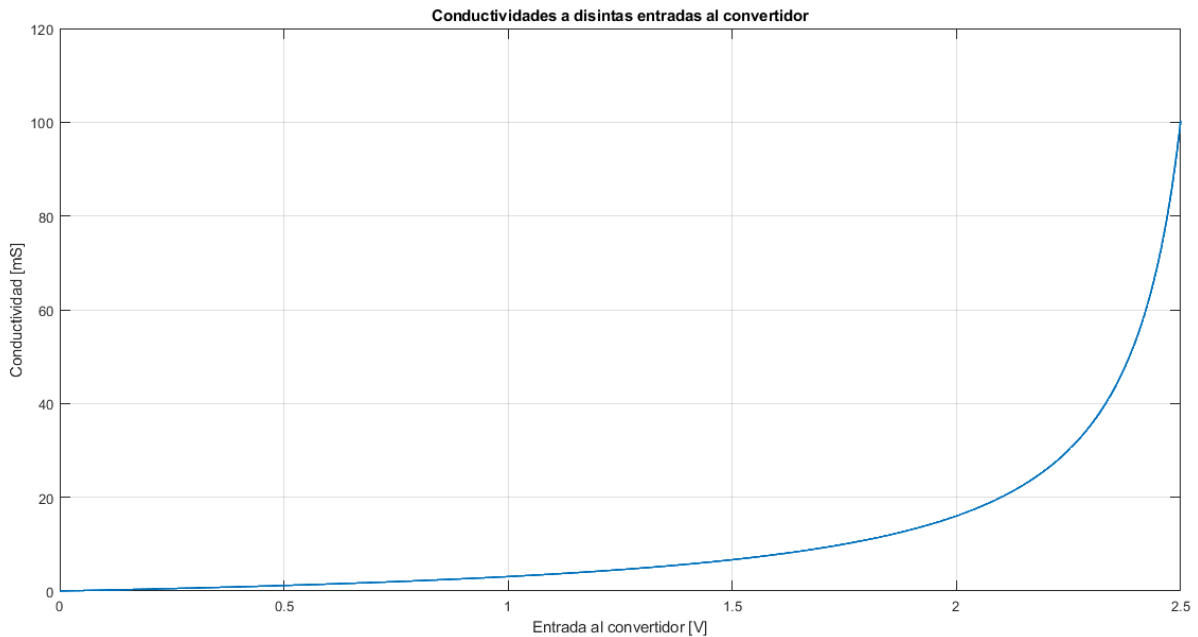


Figura 20. Conductividades frente a la entrada del convertidor

En la Figura 21 se puede visualizar una representación del diseño del circuito completo.

Para la realización del diseño en Layout se ha de tener en cuenta la disposición de los componentes y el tamaño del microcontrolador para que sea acorde al tamaño de la placa. Se ha dispuesto los componentes de una manera optimizada, teniendo en cuenta la situación de la fuente de alimentación, la entrada de los electrodos y el conector RS-232. Además, las resistencias variables deben estar en posiciones de fácil acceso, facilitando su uso para poder calibrar el sensor de una manera fácil y sencilla. El LaunchPad MSP430FR6989 se ha situado en un extremo de la placa facilitando la inserción de este a la PCB. Con lo cual se puede observar en la Figura 22 el resultado final del diseño del PCB obteniendo un resultado armónico visualmente. El PCB se ha diseñado a doble cara para garantizar unas pistas más lineales y, por tanto, que no hagan giros extraños pudiendo provocar errores.

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

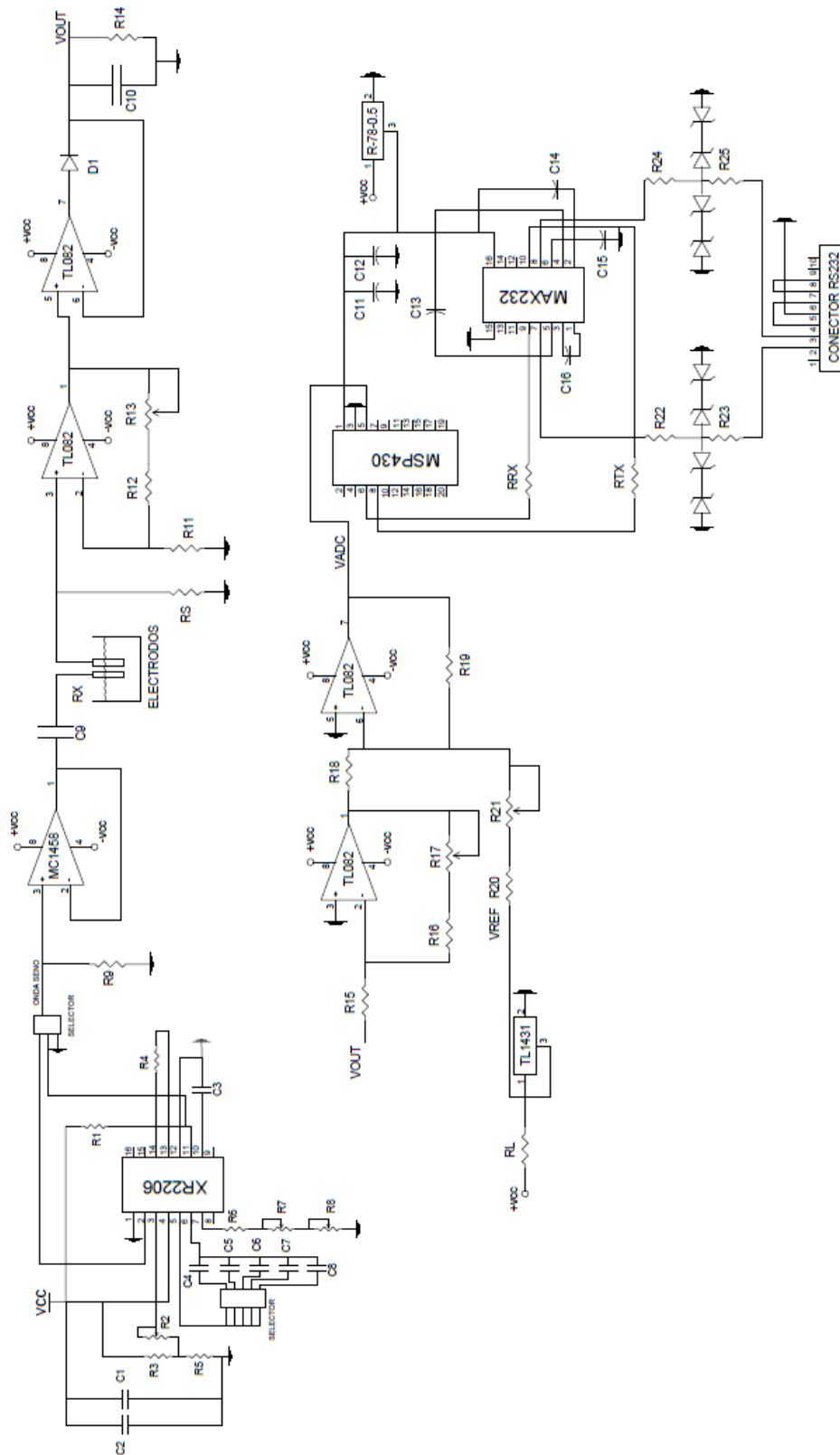


Figura 21. Diseño del conductímetro

3.1. CÁLCULO Y DISEÑO DEL SENSOR

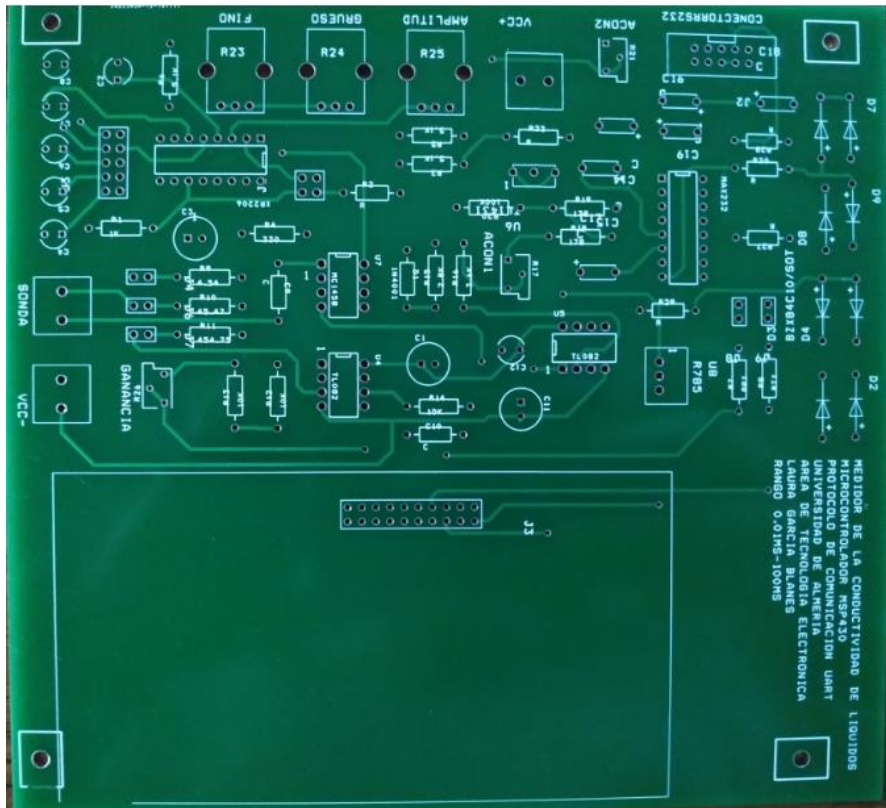


Figura 23. PCB terminada cara A

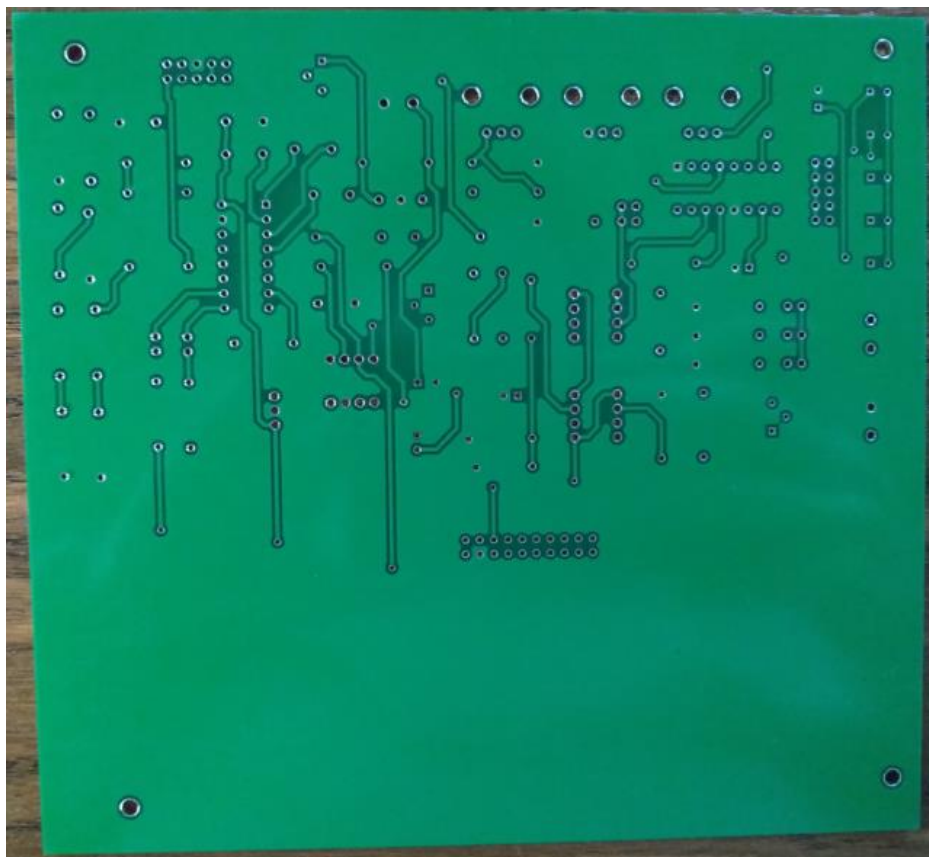


Figura 24. PCB terminada cara B

Previamente a la programación del microcontrolador se ha explicado la ecuación (11) que se debe de insertar en la programación que viene dada por las fórmulas descritas anteriormente, despejando se obtiene el valor de la conductividad en función de la tensión que le llega del acondicionador. Se debe de tener en cuenta la resolución del ADC al tratarse de 12 bits con el fin de hacer el denominador 4096 para una precisión aceptable. En el datasheet del microcontrolador [6] se observa que tiene una conversión de resultados, una vez que se han guardado y almacenado el usuario debe convertirlos manualmente de nuevo en resultados significativos. Para la realización de la conversión se utiliza la ecuación (10).

$$\text{Measured Voltage} = \text{ADC Value} \cdot \frac{V_{ref}(mV)}{2^{ADC Resolution}} \quad (10)$$

Siendo ‘measured voltage’ [V] la tensión de salida del acondicionador, pudiendo ser de 0 a 2.5V, V_{ref} [V] la tensión de referencia utilizada, en este caso de 2.5V y ADC value va entre 0 y 2^{12-1} que asigna el ADC. Se ha procedido al despeje para la obtención de la función de transferencia que relaciona la tensión del ADC con la conductividad, utilizada en el siguiente apartado.

Se precisa de la ecuación (6) de salida del circuito, la fórmula de la resistencia Rx en función de la conductividad ecuación (4), la ecuación (7) del acondicionador. Despejando y sustituyendo se obtiene la función de transferencia descrita en la ecuación (11).

$$\sigma(V_{ADC}) = \frac{105.5356241 \cdot V_{ADC} + 1191.450659}{-21.10470384 \cdot V_{ADC} + 90701.7372} \quad (11)$$

3.2. Programación del microcontrolador MSP430

La programación del microcontrolador se ha realizado en el programa y entorno de desarrollo Code Composer Studio. Para la explicación del programa del microcontrolador se ha creado un diagrama de flujo en el cual se puede visualizar en la Figura 25 la programación realizada.

En primer lugar, se configuran el temporizador, las entradas y salidas de propósito general (GPIO), el ADC programando el puerto 8.4 como entrada analógica, además asignando el puerto 4.2 como TX y el puerto 4.3 como RX, el LCD y el RS232.

Se pone el temporizador a 500 ms y esperamos respuesta, si en ese tiempo no hay nada que leer volvemos a esperar 500ms. En caso contrario, se lee el ADC guardando el valor leído en la memoria del microcontrolador. La conversión utilizada para pasar del valor leído a un valor en conductividad es mediante la ecuación (10). Borrarnos el valor que puede haber adquirido el LCD y se muestra el valor en el LCD representando la conductividad.

3.2. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR MSP430

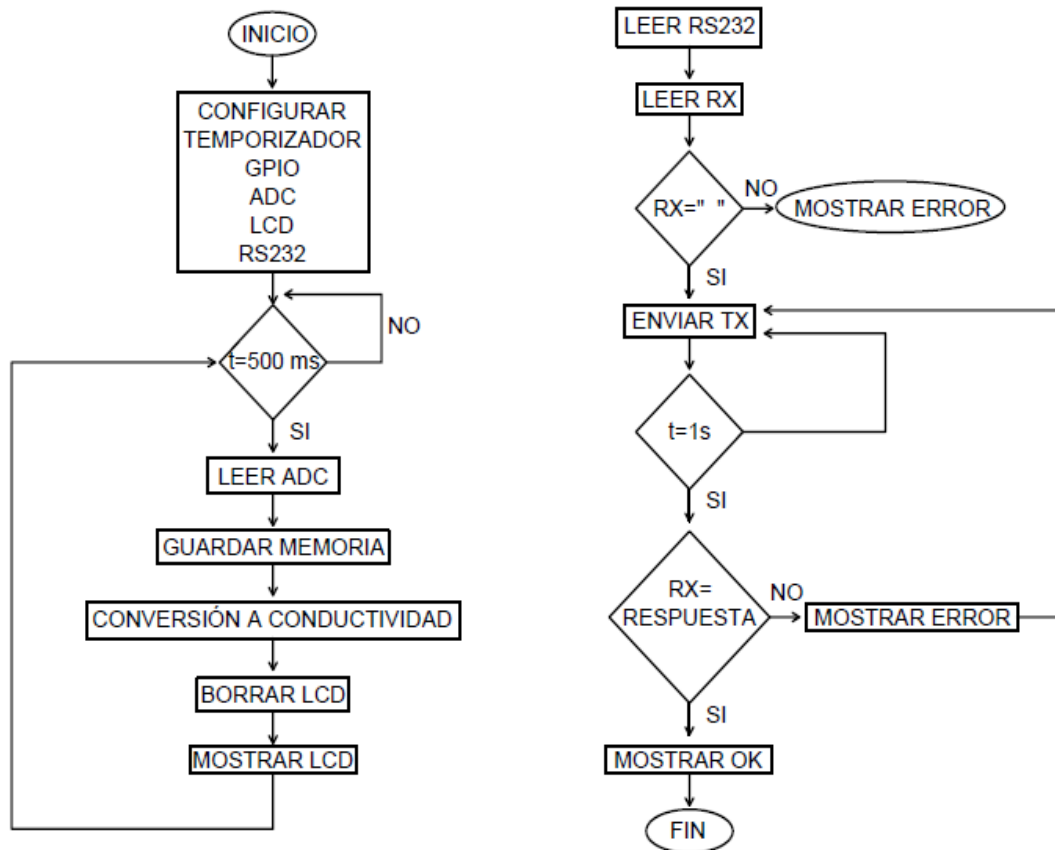


Figura 25. Diagrama flujo programación microcontrolador

Para la programación destinada al protocolo de comunicación UART se ha programado mediante interrupción, es decir, se debe enviar una señal desde el procesador de la computadora para indicar que debe de interrumpir el curso de ejecución de muestreo en el LCD. Y pasar a ejecutar el código específico de la lectura del RS232. Con lo cual se suspenderá de manera temporal la ejecución del proceso, para pasar a ejecutar esta subrutina de servicio de interrupción. Una vez que se finaliza dicha subrutina, se reanuda la ejecución del programa.

De esta manera el procesador no consume constantemente recursos, debido a que no necesita instrucciones de sondeo ni tiene que averiguar si se quiere realizar comunicación con él teniendo que estar constantemente muestreando. El procesador queda a la espera de que le avisen o en este caso interrumpan cuando tengan algo que transferir de información. En la Figura 26 se puede observar el procesamiento de interrupción del microcontrolador. Y en la Figura 27 el regreso de la interrupción del microcontrolador.

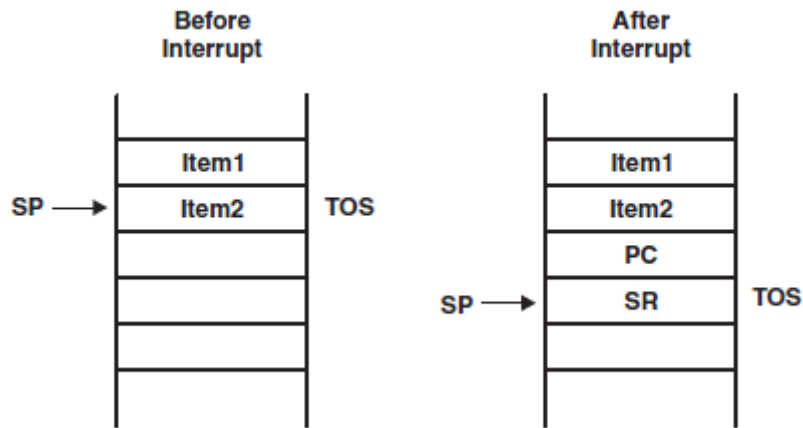


Figura 26. Procesamiento de interrupción [9]

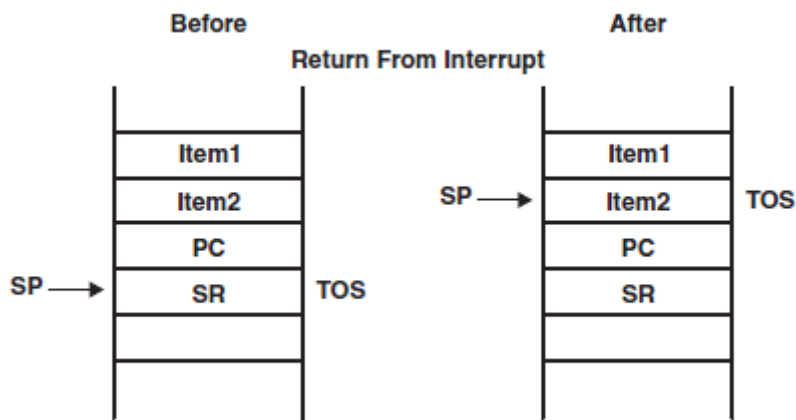


Figura 27. Regreso de la interrupción [9]

Una vez que se interrumpe el programa se comienza a la subrutina leyendo el RS232. El cual el valor de RX debe coincidir con el valor previamente programado, en caso contrario se informa mostrando error. Si el valor de RX coincide se envía el valor de TX (TX envía el valor de la conductividad), se espera 1s de manera iterativa para posteriormente enviar RX. Si RX es igual a la respuesta configurada se muestra OK y finaliza el programa, en caso contrario muestra un error y se vuelve a enviar TX. El protocolo se ha configurado con una velocidad de 9600 baudios, se ha utilizado 2 bits para comunicar, y no se utilizan bits de paridad.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo el lector puede observar los resultados obtenidos ante distintos tipos de líquidos, obteniendo el dato de la conductividad.

Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito junto con los elementos que lo forman, se deberá hacer ensayos en el laboratorio. Durante las pruebas se pueden detectar fallos que se corrigieron para garantizar la funcionalidad del circuito, obteniendo el PCB final.

Las comprobaciones realizadas son las siguientes:

COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL XR2206

Tras conectar el circuito a alimentación y disponer de un osciloscopio, se comprueba y ajusta mediante las resistencias variables instaladas, la tensión de entrada y la frecuencia, ajustando a los valores deseados. En este caso, obtenemos una tensión de 1 voltio de amplitud, y una frecuencia de trabajo de 1000 Hz. En la Figura 28 se puede observar la señal de salida del XR2206. Con lo cual, se obtiene una señal sinusoidal tal y como se deseaba.

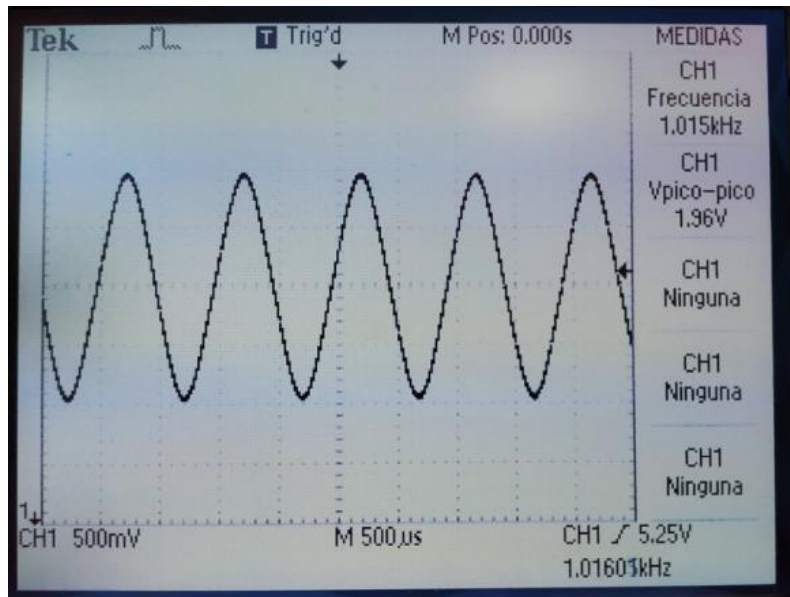


Figura 28. Salida del XR2206

COMPROBACIÓN DE VALORES

Para comprobar que el circuito funcione de manera correcta, se tomaron medidas de tensión de diferentes puntos, como la salida de la referencia de tensión, el regulador de tensión, así como las cargas y descargas de condensadores.

AJUSTE DE LA GANANCIA

Se comprueba la salida de tensión que debe proporcionar la ganancia con el multímetro, con la resistencia variable se ajusta hasta el valor deseado. Se obtiene la salida de tensión específica, con esto se evita de ir teniendo mayor error en la medida.

COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ACONDICIONADOR

Con la ayuda de un multímetro, se pudieron tomar medias para la comprobación de la salida de tensión del acondicionador. Obteniendo la tensión en ese punto. Para ello se realizaron varias medidas en los extremos del rango, en el centro, y varios puntos dentro del rango.

CALIBRACIÓN

Para la calibración del circuito, se coloca una resistencia del centro del rango en la salida de los electrodos. Previamente se obtiene una gráfica en Matlab con el valor de la resistencia frente al valor de la tensión de salida del acondicionador. Esa gráfica viene dada en la Figura 29.

RESULTADOS

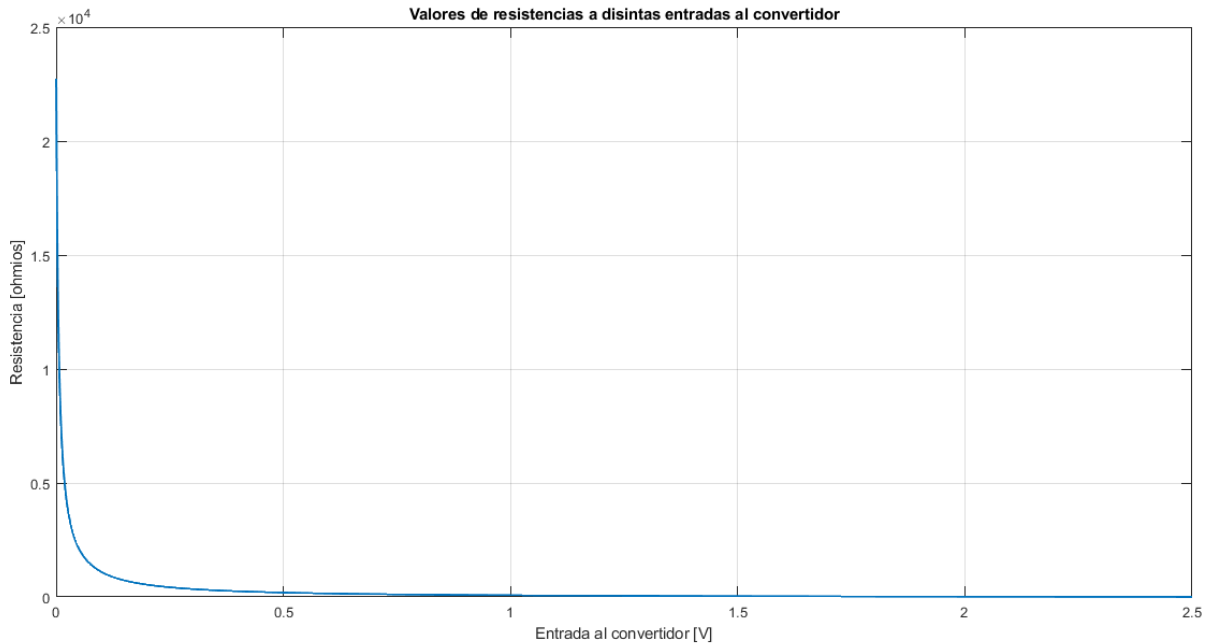


Figura 29. Resistencia frente al valor del VADC

Con lo cual, con el valor exacto, ajustamos la salida con las resistencias variables obteniendo mayor precisión en las mediciones y una correcta calibración.

COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MICROCONTROLADOR

Una vez calibrado el circuito, conectamos el microcontrolador. Sabiendo el dato de la conductividad frente a valores del ADC se podrá visualizar si el dato proporcionado es válido. Para ello, obtenemos una gráfica con la ayuda de Matlab realizando un barrido, obtenido en la Figura 20. Y se comprueba que los valores mostrados son correctos.

ENSAYOS Y MEDIDAS DE LA CONDUCTIVIDAD

En el laboratorio se han hecho diferentes ensayos de conductividad con distintos líquidos, obteniendo los siguientes resultados recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultados reales

LIQUIDO	CONDUCTIVIDAD [mS/cm]
Lanjarón	0.29
Bezoya	0.07
Solan de cabra	0.56
AquaBona	0.42
Agua del grifo	1.65
Agua del mar	17.01
Coca Cola sabor light	1.27
Agua destilada	0.01
Agua destilada con 7 gramos de cloruro sódico	15.96
Agua destilada con 12 gramos de cloruro sódico	22.14

Para corroborar estas medidas se ha accedido al sitio web Globahydro [2], de la página se ha obtenido la siguiente tabla donde se puede visualizar las conductividades de varias marcas de agua embotellada, a temperatura ambiente en torno a 23°C.

Tabla 5. Conductividades aguas embotelladas

Agua	H2 (ppb)	ORP (mV)	pH	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	T ^a (°C)
Agua (Ahorramas)	0	234	7.45	885	23.2
Aquarel	0	234	5.87	80	23.0
BEZOYA	0	246	7.02	64	22.9
Font Vella	0	241	7.34	585	23.0
Lanjarón	0	264	6.78	236	22.9
Natura	0	150	7.83	478	23.1
Solan de Cabras	0	222	7.71	454	23.1

De esta tabla se pueden comparar Lanjarón, Bezoya y Solan de cabras. Como se puede observar hay una pequeña cierta variación, esto puede ser a que la temperatura del líquido de medición no es la misma.

En la Figura 2 se puede observar un rango de valores para diferentes tipos de agua, el valor medido ha sido de las cañerías de la Universidad de Almería, se puede comparar con el agua de uso doméstico. Como se puede observar el valor es bastante parecido, debido a que se desconoce la temperatura en la cual hace referencia y la localización. El agua del mar ha sido tomada en la playa de Costacabana en la orilla, con lo cual el valor de la conductividad va a variar dependiendo a que altura se coge la muestra. La muestra posteriormente se ha embotellado para poder realizar la prueba en el laboratorio, obteniendo el resultado visto en la tabla.

En el caso del agua destilada, en la Figura 2 se observa que tiene que dar en torno a 0.0005 mS, al pasarse del rango que se ha establecido muestra el valor mínimo dentro del rango, en este caso se trata de 0.01 mS.

Se puede observar en la Figura 20 que el valor de conductividad no es lineal, en el ensayo con el agua destilada ante distintos valores de cloruro de sodio. Se visualiza que efectivamente a mayor cantidad de cloruro de sodio mayor conductividad, sin ser proporcional la cantidad añadida con el valor de conductividad dado.

Otro factor importante en la medición es el valor que se ha tenido en cuenta para el cálculo de la superficie efectiva, debido a que los electrodos se han medido con regla, se puede obtener un pequeño error en el factor humano junto con la resolución del instrumento de medida.

Capítulo 5

Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, a pesar de los inconvenientes que han ido surgiendo se ha obtenido un medidor de líquidos con una precisión excelente, además se ha realizado ensayos comunicando dos microcontroladores MSP430, partiendo del protocolo de comunicación UART. Configurando un microcontrolador como si fuera la computadora, el otro microcontrolador es el medidor de conductividad. El microcontrolador que hace de computadora demanda el valor de conductividad que este midiendo y el otro microcontrolador interrumpe su proceso para el envío del valor. Una vez enviado el microcontrolador (computadora) lo muestra por pantalla y termina la interrupción hasta cuando desee otro valor.

MEJORAS EN UN FUTURO

Se pueden estudiar posibles mejoras, una de ellas es obtener aún más precisión, se puede sustituir el LCD que lleva integrado el LaunchPad MSP430FR6989 por otro que pueda visualizar más dígitos.

Una propuesta interesante de estudio sería observar cómo varía la conductividad en función de la frecuencia de la onda senoidal, consiguiendo una caracterización del líquido que se está trabajando al obtener la función de transferencia de la conductividad en función de la frecuencia. Con este estudio se puede averiguar adulteraciones en los líquidos, además en la industria puede favorecer procesos en los que se trabaje con líquidos. Por ejemplo, en una fábrica de zumos se está midiendo constantemente la conductividad, y si hay alguna alteración es un indicio de que hay algún fallo en el proceso productivo.

Una mejora del futuro para obtener un valor de la conductividad bastante más preciso es añadir un sensor de temperatura al sensor de conductividad. Al tener un sensor de temperatura se permite la medida simultánea de la conductividad y la temperatura y, por lo tanto, se podría corregir automáticamente el efecto de la temperatura sobre la conductividad de la muestra. Obteniendo un valor más preciso y real de la muestra.

Bibliografía

- [1] Circuito Científicos. Conductividad, de HACH COMPANY Sitio web: https://latam.hach.com/cms-portals/hach_mx/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf
- [2] Globahydro.(2015). Test de aguas minerales españolas realizado con Hydraction-II. 1, de 1 Sitio web: <http://www.globaehydro.es/docs/Test%20de%20Aguas%20Minerales.pdf>
- [3] EXAR, “XR-2206 Monolithic Function Generator.” (2008). Datasheet.
- [4] Unisonic Technologies (2009). “*MC1458 linear integrated circuit.*”, Datasheet.
- [5] Texas Instruments (1977). “TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B, TL084, TL084A, TL084B JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS”. Datasheet.
- [6] Texas Instrumets (2018). “MSP430FR698x(1), MSP430FR598x(1) Mixed-Signal Microcontrollers.”. Datasheet.
- [7] Texas Instrumets (2015). “MSP430FR6989 LaunchPad™ Development Kit (MSP-EXP430FR6989)” Datasheet.
- [8] Texas Instruments, “Tl431, tl431a *adjustable precision shunt regulators,*” Datasheet.
- [9] Texas Instruments. (2017). “*MSP430FR58xx, MSP430FR59xx, and MSP430FR6xx Family User's Guide.*”, Datasheet.
- [10] Texas Instruments. (2014). “*MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers.*” Datasheet.
- [11] INNOLINE. (2014). “*R-78-0.5*”. Datasheet.
- [12] Universidad de Almería. (2019). Objetivos y competencias. Sitio web: <http://cms.ual.es/UAL/estudios/grados/objetivos/GRADO4310>
- [13] Dárner Mora Alvarado Jimena Orozco Gutiérrez Pablo Rivera Navarro Yuliana Solís Castro Luis Zúñiga Zuñiga David Cambronero Bolaños Azucena Urbina Campos. (26 de Enero de 2018). ndice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH) . 1, de INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS LABORATORIO NACIONAL DE AGUAS Sitio web: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/investigacion-y-tecnologia-en-salud/inventarios/inventario-tecn-de-agua-de-consumo-humano/legislacion-documentos-internacionales/documento-tecnico-5/3892-indice-de-riesgo-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano-en-costa-rica-segunda-version-enero-2018/file>
- [14] PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer – JLCPCB. Sitio web: <https://jlcpcb.com/>

Anexo

Mediciones obtenidas en el laboratorio con diferentes líquidos



Figura 30. Ensayo con agua bezoya

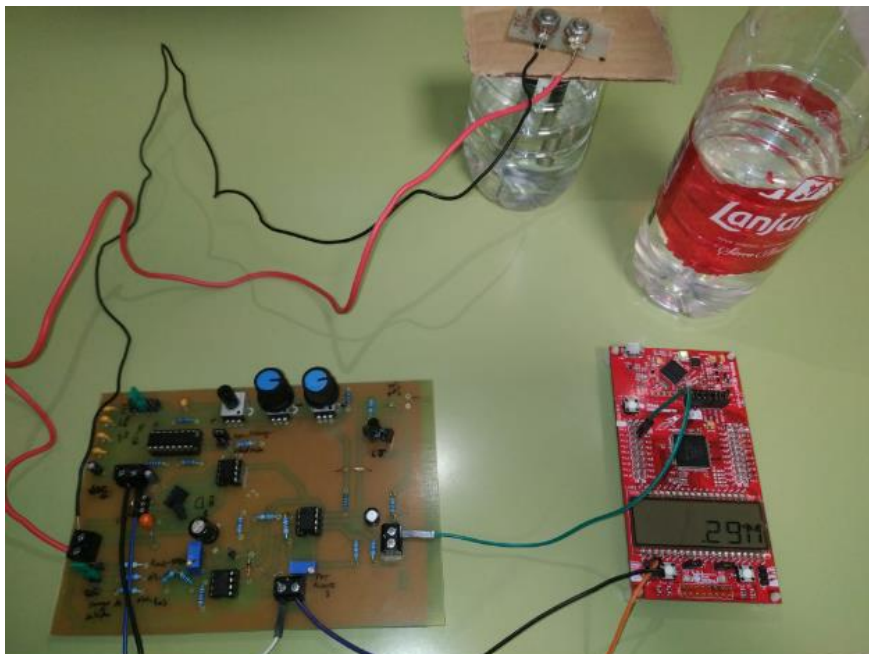


Figura 31. Ensayo con agua lanjarón

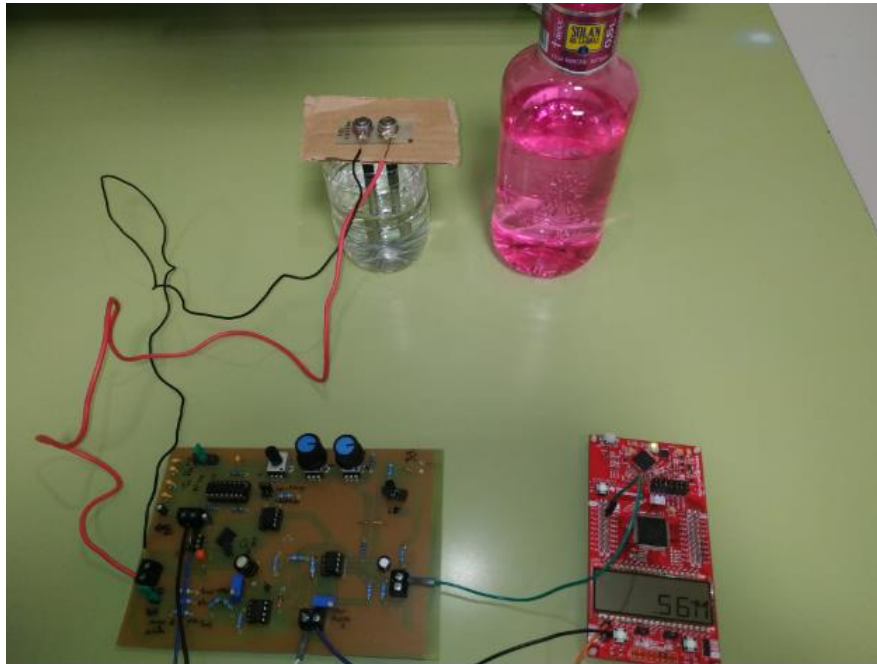


Figura 32. Ensayo con agua solar de cabra

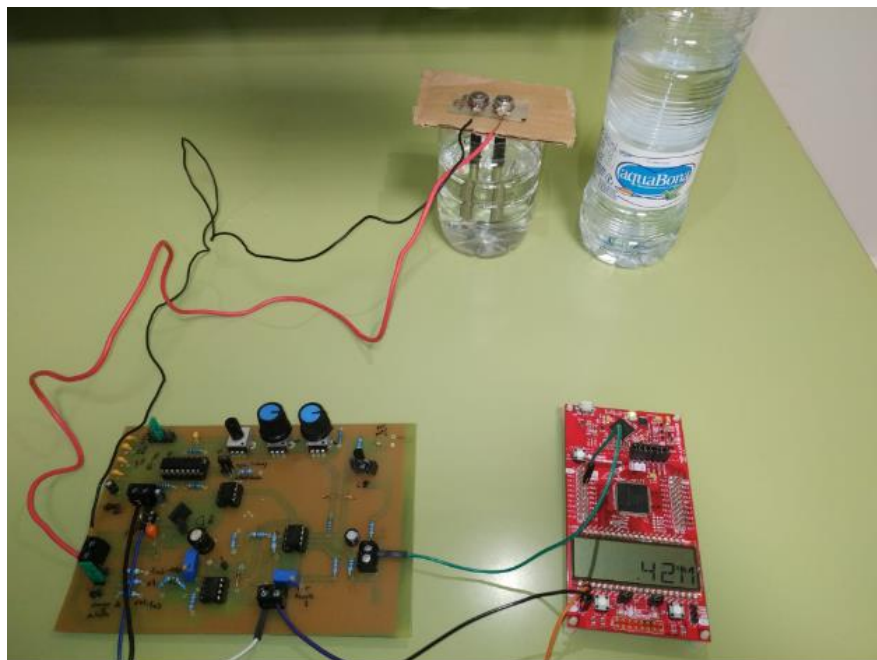


Figura 33. Ensayo con agua aquabona

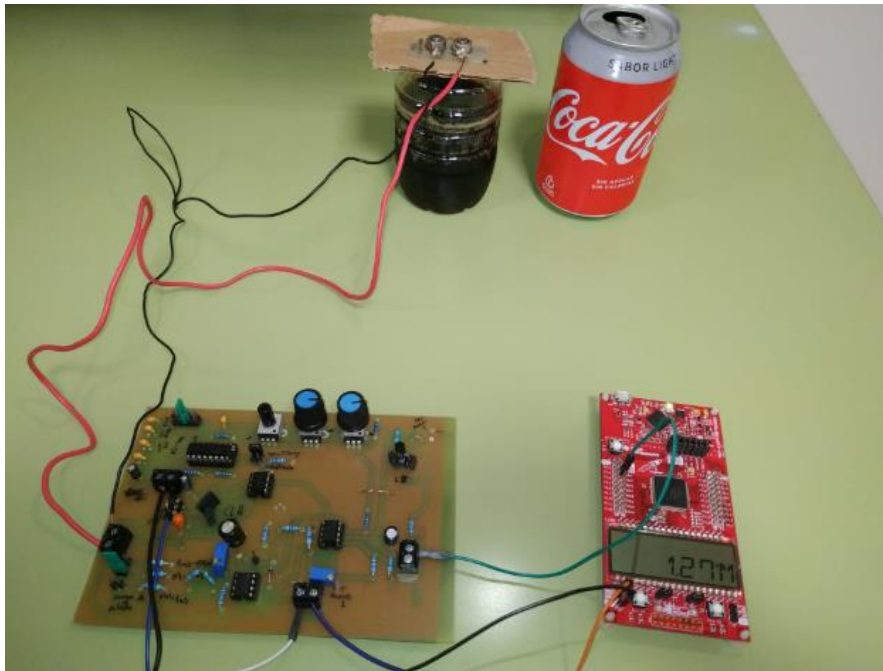


Figura 34. Ensayo con coca cola

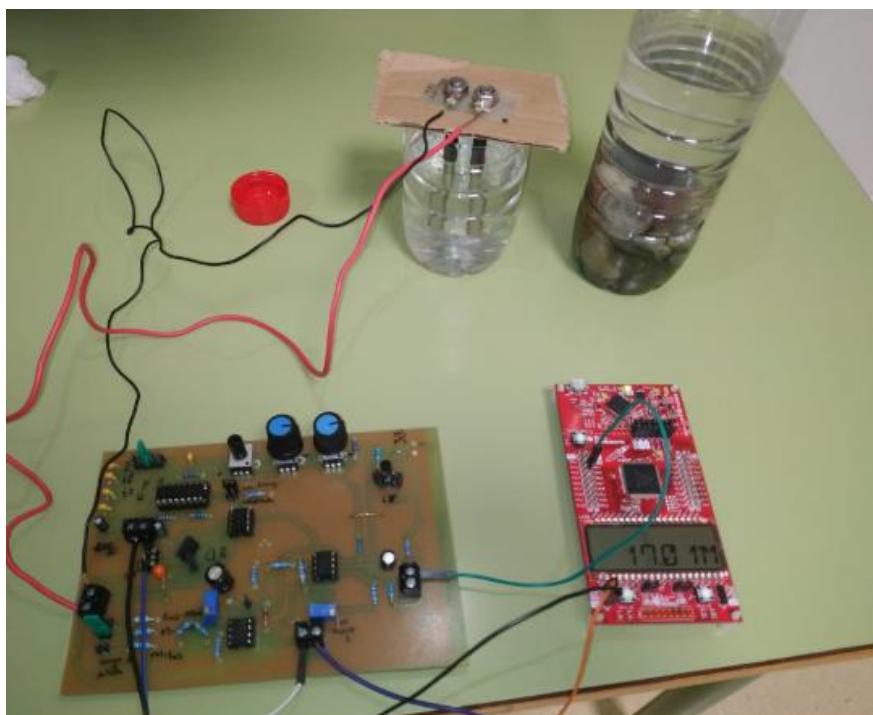


Figura 35. Ensayo con agua del mar

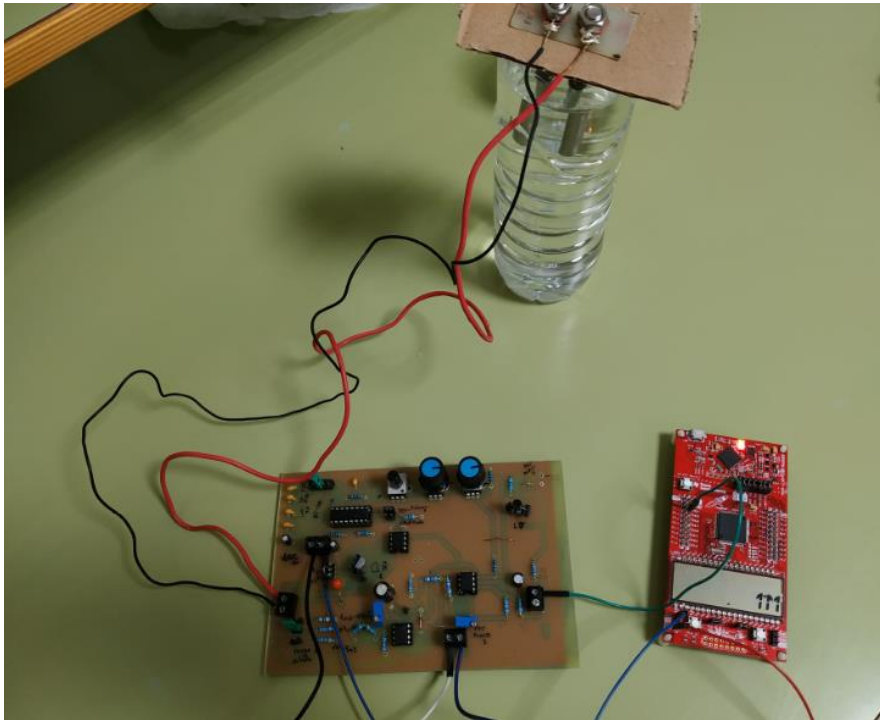


Figura 36. Ensayo con agua destilada

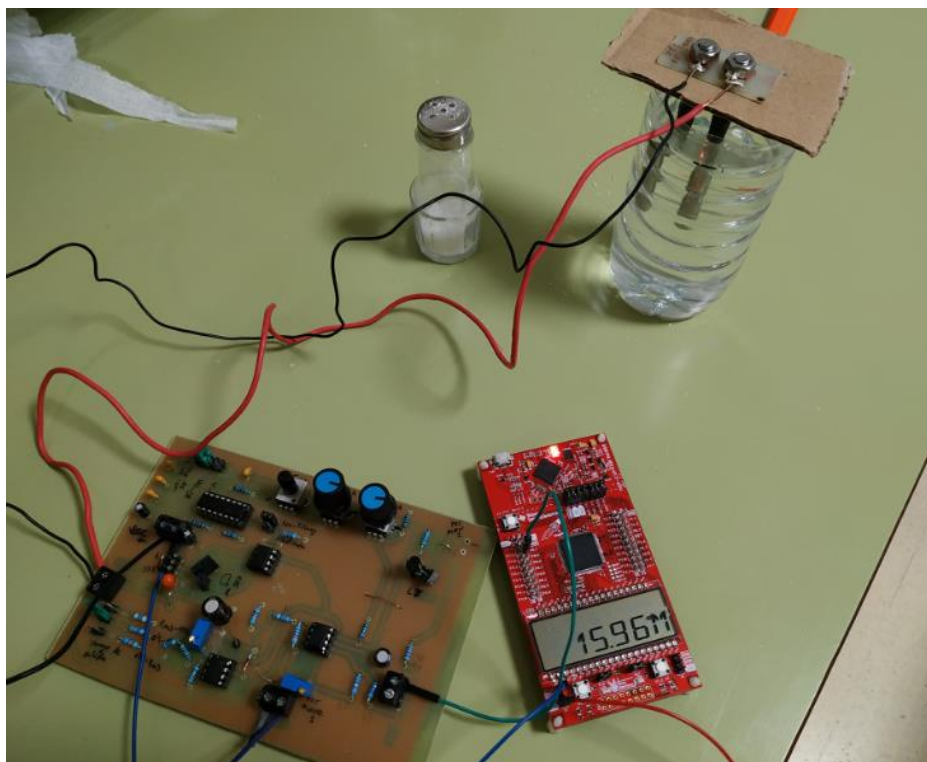


Figura 37. Ensayo con agua destilada con 7 gramos de cloruro de sodio

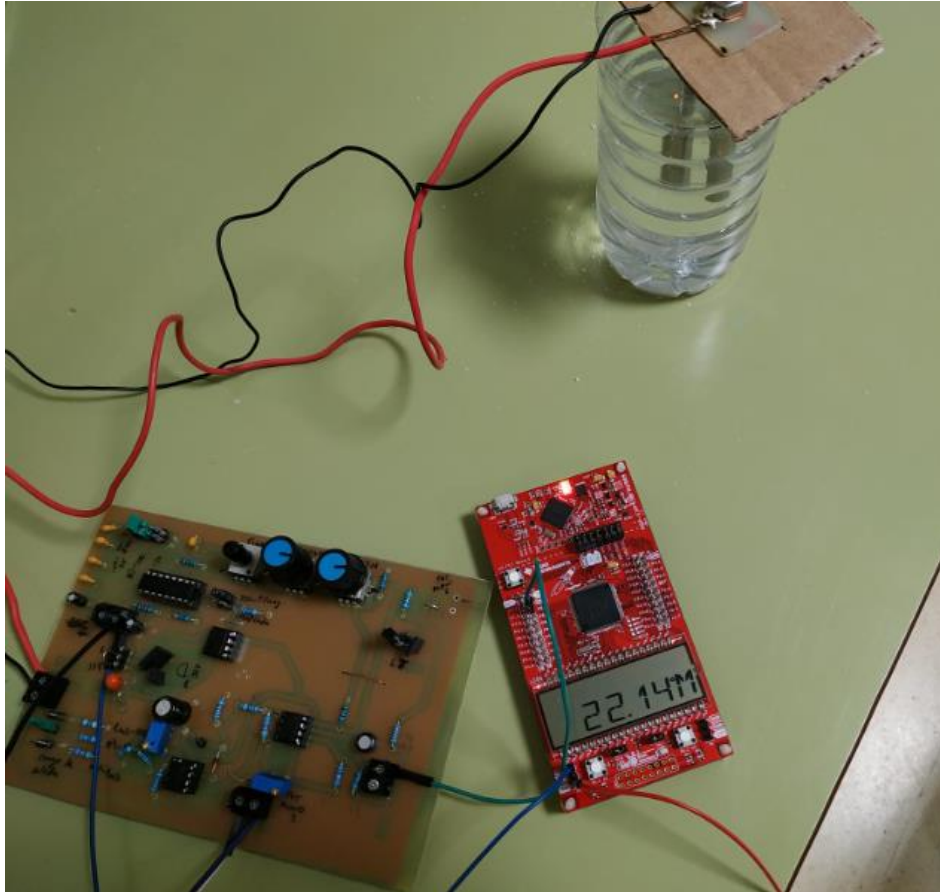


Figura 38. Ensayo con agua destilada con 12 gramos de cloruro de sodio

