



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Medida de temperatura de precisión con sensor RTD y
microcontrolador

Autor:

José Manuel Camacho Salvador

Tutores:

Manuel Fernández Ros

José Antonio Gázquez Parra





DEDICATORIA

A Laura, a mi madre, a mi padre,
a mi hermano, a mis amigos,
a mis compañeros, a mis tutores,
a todos los profesores que
han contribuido en mi formación.

A todos vosotros.





AGRADECIMIENTOS

A Laura García Blanes, mi compañera de vida, que decidió unir su camino al mío para emprender, entre otros, el bonito camino de la Ingeniería.

A Lola Salvador Alonso, mi madre, por ser siempre un apoyo y una fuente de motivación.

A José Manuel Camacho Pérez, mi padre, por despertar en mí el amor por la Ingeniería e inculcarme los valores de esta profesión.

A Miguel Ángel Camacho Salvador, mi hermano por su curiosidad y sus ganas de escuchar lo que tengo que contarle.

A Manuel Fernández Ros y a José Antonio Gázquez Parra, cotutores de este trabajo técnico, por su labor de formación y dirección en este proyecto.

A Nuria Novas Castellano y Rosa María García Salvador, profesoras del Área de Tecnología Electrónica, por su apoyo e interés en la realización de este proyecto.

A todos los/as profesores/as que han formado parte de mi proceso de graduación, por demostrar pasión y fe en sus enseñanzas.





ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 TEMPERATURA	1
1.2 SENSOR.....	2
1.2.1 RESISTENCIAS RTDs	2
1.2.1.1 SENSOR PT100.....	3
1.3 COMPETENCIAS.....	5
1.3.1 COMPETENCIAS BÁSICAS.....	6
1.3.2 COMPETENCIAS TRANSVERSALES DE LA UNIVERSIDAD DE ALMERÍA.....	6
1.3.3 COMPETENCIAS ESPECÍFICAS DEL GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL.....	7
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	9
CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN	11
CAPITULO 3. MATERIALES	15
3.1 ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR.....	16
3.1.1 MICROCONTROLADOR MSP430FR6989	16
3.1.2 LAUNCHPAD MSP430FR6989	17
3.2 MATERIALES DE INSERCIÓN PCB.....	19
3.2.1 ZÓCALO DIL DE 8 CONTACTOS	19
3.2.2 ZÓCALO DIL DE 16 CONTACTOS.....	20
3.2.3 BLOQUE DE TERMINAL PCB DE TRES CONTACTOS	21
3.2.4 CONECTOR DE CONTACTO MACHO VERTICAL	21
3.2.5 ENLACE CORTO HEMBRA DE DOS CONTACTOS.....	22
3.2.6 CONECTOR MACHO PARA PCB DE 10 CONTACTOS.....	22
3.2.7 CABEZAL DE PINES 20 PINES 2 FILAS.....	23
3.3 ELEMENTOS PASIVOS.....	23



3.3.1 RESISTENCIAS	24
3.3.2 RESISTENCIAS VARIABLES	25
3.3.3 CONDENSADORES	26
3.3.4 DIODOS ZENER DE 15V.....	27
3.4 ELEMENTOS ACTIVOS.....	27
3.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL LT1490.....	27
3.4.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA128	28
3.4.3 TRANSEPTOR DE LÍNEA MAX232N.....	29
3.4.4 REFERENCIA DE TENSIÓN TL1431ACZ	30
3.4.5 REGULADOR DE CONMUTACIÓN R-785-0.5.....	30
CAPÍTULO 4. MÉTODOS	31
4.1 HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS.....	31
4.2 MÉTODOS DE DISEÑO.....	31
4.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN	32
4.4 SOFTWARE EMPLEADO	32
4.4.1 MATLAB.....	32
4.4.2 ORCAD	33
4.4.3 CODE COMPOSER STUDIO	34
4.4.4 AUTOCAD	35
4.4.5 MICROSOFT WORD.....	35
4.5. MÉTODOS DE FABRICACIÓN	36
4.5.1 FABRICACIÓN PCB.....	36
4.5.2 ENSAMBLADO DE COMPONENTES.....	36
CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL INSTRUMENTO ELECTRÓNICO	37
5.1 ALIMENTACIÓN DEL INSTRUMENTO	37
5.2 PUENTE DE MEDIDA.....	38
5.3 ACONDICIONADOR DE SEÑAL	43
5.3.1 DISEÑO DE LA GANANCIA	46
5.3.2 DISEÑO DEL DESPLAZAMIENTO	47



5.3.3 DISEÑO FINAL DEL ACONDICIONADOR.....	48
5.4 ADAPTACIÓN DE NIVELES UART.....	49
5.5 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ENSAYO	51
5.5.1 DISEÑO UNIFILAR	51
5.5.2 DISEÑO PCB	52
+.....	54
5.6 DISEÑO DEL INSTRUMENTO ELECTRÓNICO.....	55
5.6.1 DISEÑO UNIFILAR	56
5.6.2 DISEÑO PCB	57
CAPÍTULO 6. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR MSP430FR6989	63
6.1 ESPECIFICACIONES DE PROGRAMACIÓN.....	63
6.2 SOFTWARE IMPLEMENTADO	64
CAPÍTULO 7. RESULTADOS.....	67
7.1 CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO.....	68
7.2 RESULTADOS	69
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	73
8.1 VALORACIÓN DEL TRABAJO TÉCNICO.....	73
8.2 MEJORAS EN EL FUTURO.....	73
8.3 VALORACIÓN PERSONAL	74
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO DE FOTOGRAFÍAS.....	77





RESUMEN

Son numerosos los procesos industriales que requieren conocer con precisión las magnitudes físicas de las que dichos procesos dependen. Magnitudes físicas tales como la temperatura, la humedad, la radiación, etc.

Dada la importancia de conocer estas variables, existe, en la Ingeniería moderna, una rama de conocimiento destinada al desarrollo de sensores que contabilicen las magnitudes físicas.

En este Trabajo Fin de Grado se detalla, paso a paso, el diseño y fabricación de un instrumento electrónico funcional, capaz de medir temperatura a través de tres sensores PT100 diferentes. Este instrumento a su vez constará de un microcontrolador que, mediante su correcta programación, mostrará los datos de temperatura en una pantalla LCD y será capaz de enviar las medidas tomadas por puerto serie, empleando el protocolo de comunicaciones UART.





ABSTRACT

Many are the industrial processes that require precisely knowing the physical values on which processes depend. Physical values such as temperature, humidity, radiation, etc.

Given the importance of knowing these variables, there is in modern Engineering a branch of knowledge for the sensors' development that account for physical values.

This Final Degree Project attempts to create, step by step, the design and manufacture of a functional electronic device, capable of measuring the temperature level through three different PT100 sensors. This device will consist of a microcontroller that, through its correct programming, will display the temperature data on a LCD screen and will also be able to send the taken values by serial port, using the UART communications protocol.





LISTA DE ACRÓNIMOS

<i>3D</i>	3 Dimensiones.
<i>ADC</i>	Analog-to-Digital Conversion.
<i>CAD</i>	Computer-Aided Design.
<i>DIL</i>	Dual in-line.
<i>GND</i>	Ground.
<i>IDE</i>	Integrated Development Environment.
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display.
<i>MCU</i>	Microcontroller Unit.
<i>PC</i>	Personal Computer.
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board.
<i>RS232</i>	Recommended Standard 232.
<i>RTD</i>	Resistance Temperature Detector.
<i>TFG</i>	Trabajo de Fin de Grado.
<i>TTL</i>	Transistor-Transistor Logic.
<i>UART</i>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.





LISTA DE SÍMBOLOS

%	Tanto por ciento.
+Vcc	Tensión de alimentación positiva.
a	Desplazamiento del acondicionador de señal.
b	Ganancia del acondicionador de señal.
C₁, C₂	Condensadores de protección para +VCC y -VCC.
C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇	Condensadores de configuración del MAX232.
D₁, D₂, D₃, D₄, D₅, D₆, D₇, D₈	Diodos Zener de protección del MAX232.
I_R, I₀	Intensidad de entrada al puente de Weathstone.
KΩ	Kilohmios, unidad de medida de la resistencia eléctrica.
mA	Miliamperios, unidad de medida de la corriente eléctrica.
MHz	Megaherzios, unidad de medida de frecuencia.
mm	Milímetros, unidad de medida de longitud.
mV	Milivoltios, unidad de medida de la diferencia de potencial eléctrico.
°C	Grados Celsius, unidad de medida de la temperatura.
°K	Grados Kelvin, unidad de medida de la temperatura.
R₀	Valor del sensor PT100 a 0°C.
R₁	Resistencia fija que une R _{V3} y GND.
R₂, R₃, R₄, R₅	Resistencias de protección del MAX232.
R_{a1}	Resistencia fija del conjunto de ajuste del puente de medida.
R_{a2}	Resistencia fija del conjunto de ajuste de la ganancia del INA128.
R_{a3}	Resistencia fija del conjunto de ajuste de referencia del INA128.



R_G	Resistencia de ganancia del INA128.
R_p	Resistencia fija del puente de medida, tiene un valor de 107Ω
R_S	Resistencia que determina la corriente I_R .
R_T	Valor de resistencia que adquiere el sensor PT100 en función de la temperatura.
R_{v1}	Resistencia variable de ajuste del puente de medida.
R_{v2}	Resistencia variable de ajuste de la ganancia del INA128.
R_{v3}	Resistencia variable de ajuste de ajuste de referencia del INA128.
T	Temperatura.
V	Voltios, unidad de medida de la diferencia de potencial eléctrico.
V_{ACOND}	Voltaje de salida del INA128.
$-V_{CC}$	Tensión de alimentación negativa.
V_{REF}	Voltaje con valor de 2.5 voltios procedente de la referencia tl1431.
$V_{referencia}$	Voltaje de entrada a la referencia del INA128
V_S	Voltaje de la salida del puente de Weathstone.
Ω	Ohmios, unidad de medida de la resistencia eléctrica.
α, β, C	Parámetros característicos del sensor PT100.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Termómetro de Galileo.....	2
Figura 2. Sensor PT100 de uso industrial.....	3
Figura 3. Esquema preliminar del instrumento	12
Figura 4. Croquis del microcontrolador MSP430FR6989	17
Figura 5 Launchpad MSP430FR6989.....	18
Figura 6. Diagrama emulador-MCU-BoosterPack.....	19
Figura 7. Zócalo DIL de 8 patillas	20
Figura 8. Zócalo DIL de 16 CONTACTOS	20
Figura 9. Bloque de terminal PCB de 3 contactos	21
Figura 10. Conector de contacto macho vertical.....	21
Figura 11. Enlace corto hembra de dos contactos	22
Figura 12. Conector macho para PCB de 10 contactos	22
Figura 13. Cabezal de pines 20 pines 2 filas	23
Figura 14. Resistencia genérica	24
Figura 15. Modelo 3D de las resistencias variables	25
Figura 16. Condensador de aluminio	26
Figura 17. Condensador cerámico multicapa.....	26
Figura 18. Condensador de tántalo	26
Figura 19. Diodo Zener de 15V	27
Figura 20. Amplificador operacional LT1490	28
Figura 21. INA128.....	28
Figura 22. Transceptor de línea MAX232N	29
Figura 23. Referencia de tensión TL1431ACZ.....	30
Figura 24. Regulador de conmutación R-785-0.5	30
Figura 25. Conector de 3 contactos para PCB.....	37
Figura 26. R-785-0.5.....	38
Figura 27. Esquema de la alimentación	38
Figura 28. Puente de Weathstone.....	39
Figura 29. Puente de Weathstone alimentado en corriente.....	39



Figura 30. Conexión de LT1431.....	40
Figura 31. Puente de Weathstone con ajuste de cero	42
Figura 32. Ajuste del puente	42
Figura 33. Esquema del INA128	45
Figura 34. Ajuste ganancia INA128	46
Figura 35. Diseño de la tensión de desplazamiento.....	47
Figura 36. Etapa de acondicionado	48
Figura 37. MAX232	49
Figura 38. Diseño de la adaptación de niveles para el puerto serie	50
Figura 39. Diseño del prototipo.....	51
Figura 40. Esquema unifilar del prototipo implementado	53
Figura 41. PCB del prototipo.....	54
Figura 42. Esquema unifilar del instrumento electrónico.....	56
Figura 43. Esquema unifilar Capture del instrumento electrónico	58
Figura 44. Diseño PCB del instrumento electrónico	60
Figura 45. Diagrama de flujo de la programación implementada	66
Figura 46. Simulador PT100	67
Figura 47. Ajuste del puente de medida.....	68
Figura 48. Ensayo a 105.	77
Figura 49. Ensayo a 118.7Ω.....	77
Figura 50. Ensayo a 112.2Ω.....	78
Figura 51. Ensayo a 105.2Ω.....	78
Figura 52. Ensayo a 102Ω.....	79
Figura 53. Ensayo a 96.63Ω.....	79
Figura 54. Ensayo con PT100 a temperatura ambiente	80



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tolerancia de las PT100 según su clase.....	4
Tabla 2. Diagrama de Gantt de la planificación	14
Tabla 3. Valores de resistencia	24
Tabla 4. Valor de resistencia.....	25
Tabla 5. Condensadores empleados.....	26
Tabla 6.Resultados de laboratorio	69
Tabla 7. Análisis estadístico de los resultados	71



CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan las motivaciones que han llevado a realizar este proyecto, así como un repaso por los fundamentos de éste.

El grupo de Investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemetría (TIC-019) tiene una línea de investigación abierta, con asentamiento en Calar Alto, cuyo objeto es estudiar un fenómeno electromagnético conocido como Resonancias Tierra – Ionosfera o Resonancias de Schumann.

Para continuar dicha línea de investigación se precisa conocer la temperatura en tiempo real en tres zonas diferentes de la ubicación. Es por ello que este Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo final la producción de un instrumento de medida de temperatura, gobernado por un microcontrolador, con especificaciones suficientes para el uso anteriormente descrito. En esta memoria se describen los conceptos teóricos relacionados y los procedimientos y herramientas utilizados para la elaboración del instrumento.

A continuación, se exponen una serie de subapartados cuyo objeto es familiarizar al lector con los conceptos teóricos básicos que se emplean en este Trabajo Fin de Grado.

1.1 TEMPERATURA

En física, la temperatura se define como una magnitud expresada por un solo módulo y que tiene el mismo valor para todos los observadores que se relaciona con la energía interna de un sistema termodinámico. Más específicamente, está relacionada con la energía cinética, es decir, la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema. A mayor energía cinética, mayor temperatura. Son variables por tanto directamente proporcionales.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El ser humano precientífico captó a través de sus sentidos esta magnitud física y se interesó por determinar su magnitud. Se estima que el primer termómetro fue creado en 1592, obra de Galileo Galilei y consistía en un tubo de vidrio con una esfera de vidrio hueca en su extremo superior, en el que se introducía un líquido que al calentarse subía por el tubo. El primer líquido utilizado fue el agua, aunque fue sustituido por alcohol debido a su menor punto de congelación.

No fue hasta 1612 cuando Santorre Santorio introdujo una graduación numérica al invento de Galileo y le dio un uso medicinal.



Figura 1. Termómetro de Galileo

1.2 SENSOR

También conocido como transductor, se conoce con el nombre de sensor a todo objeto que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio. Al variar esta magnitud, varía con sí la propiedad física del sensor. Dicho con otras palabras, el sensor, mediante variaciones en sus propiedades, manifiesta la presencia de dicha magnitud.

En la industria se conoce como sensor a aquel objeto capaz de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas con un transductor en variables eléctricas.

Los sensores son parte fundamental de la Ingeniería moderna, y se aplican en todos los campos que esta abarca.

1.2.1 RESISTENCIAS RTDs

Un RTD es un tipo de resistencia eléctrica cuya propiedad fundamental es la variación de su oposición al paso de corriente eléctrica en función de la temperatura. Al calentarse el metal del que se compone habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia. Existen resistencias RTD de diversos metales.

1.2.1.1 SENSOR PT100

Las resistencias PT 100 son un tipo específico de detector de temperatura RTD. Su característica principal es su material de fabricación, el platino. Estas resistencias presentan un valor de 100 ohmios a la temperatura de 0°C. Los sensores PT100 está formado por un filamento de platino enrollado alrededor de un núcleo de cerámica o de vidrio. Las dimensiones típicas de estos elementos son de 1 a 5 mm de diámetro y de 10 a 50 mm de longitud. El núcleo de cerámica o vidrio puede volverlos frágiles y susceptibles a la vibración por lo que normalmente están protegidos dentro de una vaina, formando una sonda para uso práctico. La Figura 2 muestra una fotografía de un sensor PT100 de uso industrial.



Figura 2. Sensor PT100 de uso industrial

1.2.1.1 TOLERANCIA DE LOS SENSORES PT100

La norma internacional IEC 751 especifica la tolerancia de los sensores RTD industriales. Hay dos clases de sondas PT100 clasificadas en función de su tolerancia: clase A, con una tolerancia de $\pm 0,15^\circ\text{C}$ a 0°C y clase B, con una tolerancia de $\pm 0,3^\circ\text{C}$ a 0°C . Además, existen 2 clases de precisión adicionales para el trabajo de precisión y estos se conocen comúnmente como "1/10 DIN" y "1/3 DIN"; esto significa una tolerancia de 1/10 o 1/3 de la especificación de clase B a 0°C respectivamente. La lista completa de las tolerancias de la clase A, B, 1/10 y 1/3 se enumeran en la Tabla 1.



Temp °C	Clase B	Clase A	1/3 DIN	1/10 DIN
-200	1,30	□	□	□
-100	0,80	□	□	□
-50	0,55	0,25	0,18	□
0	0,30	0,15	0,10	0,03
100	0,80	0,35	0,27	0,08
200	1,30	0,55	0,43	□
250	1,55	0,65	0,52	□
300	1,80	0,75	□	□
350	2,05	0,85	□	□
400	2,30	0,95	□	□
450	2,55	1,05	□	□
500	2,80	□	□	□
600	3,30	□	□	□

Tabla 1. Tolerancia de las PT100 según su clase

1.2.1.2 MODELO MATEMÁTICO DE UN SENSOR PT100

En la literatura existen tablas predefinidas donde asignan a cada valor de temperatura un valor de la resistencia que adopta la PT100. Pero a la hora de diseñar una etapa instrumental es necesario conocer el modelo matemático que rige dicho comportamiento.

Para usos donde no se requiere una precisión extraordinaria es común equiparar la función matemática de la resistencia en función de la temperatura como un modelo lineal ecuación [1]. Aunque para el uso expuesto en este Trabajo Fin de Grado (TFG) no podemos hacer tal simplificación.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad [1]$$

La conocida compañía Texas Instruments detalla en uno de sus artículos [1] dedicados a sensores RTDs un modelo matemático definido a trozos para caracterizar una PT100.

La ecuación [22] es la empleada para el tramo de valores negativos, mientras que la ecuación [33] es para los valores positivos.

$$\text{Para } T < 0^{\circ}\text{C} \rightarrow R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100)) \quad [2]$$

$$\text{Para } T \geq 0^{\circ}\text{C} \rightarrow R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2) \quad [3]$$

Donde,

R_T es el valor de temperatura.

R_0 es el valor de la RTD a 0°C .

T es la temperatura.

α , β y C son parámetros característicos de la PT100.

Este es el modelo matemático que se adoptará para este trabajo, en los siguientes capítulos se asignarán valores a los parámetros característicos que sean fidedignos al sensor empleado.

1.3 COMPETENCIAS

En este apartado se hace referencia a las competencias adquiridas durante el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y que han sido empleadas, en mayor o menor medida, durante la realización de este trabajo técnico. Todas las competencias mencionadas en este capítulo se encuentran en la web de la Universidad de Almería [2]



1.3.1 COMPETENCIAS BÁSICAS

Son competencias que se adquieren en todos los títulos de grado. Vienen descritas en el R.D. 393/2007, de 29 de octubre. A continuación, se listan las que se han empleado en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

- CB1. Poseer y comprender conocimientos.
- CB2. Aplicación de conocimientos.
- CB3. Capacidad de emitir juicios.
- CB4. Capacidad de comunicar y aptitud social.

1.3.2 COMPETENCIAS TRANSVERSALES DE LA UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Son las competencias propias comunes a los grados impartidos en la Universidad de Almería. A continuación, se listan las que se han empleado en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

- UAL1. Conocimientos básicos de la profesión.
- UAL 2. Habilidad en el uso de las TIC.
- UAL3. Capacidad para resolver problemas.
- UAL 4. Comunicación oral y escrito en la propia lengua.
- UAL 5. Capacidad de crítica y autocrítica.
- UAL 7. Conocimiento de una segunda lengua.
- UAL 9. Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma.
- UAL 10. Competencia social y ciudadanía global.



1.3.3 COMPETENCIAS ESPECÍFICAS DEL GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Son las competencias específicas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial. A continuación, se listan las que se han empleado en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

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.

- CT2. Capacidad para la dirección, de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en el epígrafe anterior.
- 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.
- CT6. Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- CB1. Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.
- CB2. Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
- CB3. Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
- CB5. Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y geometría descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador.



- CRI1. Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería.
- CRI3. Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre la microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales.
- CRI4. Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
- CRI5. Conocimientos de los fundamentos de la electrónica.
- CRI10. Conocimientos básicos y aplicación de tecnologías medioambientales y sostenibilidad.
- 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.
- CTEE7. Conocimiento y capacidad para el modelado y simulación de sistemas.
- 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 sintetizen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria de este Trabajo Fin de Grado se compone de ocho capítulos. A continuación, se enumeran y se ofrece una pequeña introducción de cada uno de ellos.

1. **Introducción.** En este capítulo se detallan las motivaciones que han llevado a realizar este proyecto, así como un repaso por los fundamentos de éste.
2. **Objetivos y planificación.** En este capítulo se detallan los objetivos preestablecidos para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, así como la planificación que se prevé seguir.
3. **Materiales.** En este capítulo se describe al lector los materiales empleados en el diseño y montaje del instrumento objeto de este Trabajo Fin de Grado.
4. **Métodos.** En este capítulo se describen las herramientas, métodos y software empleado en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.
5. **Diseño del instrumento electrónico.** En este capítulo se describe al lector el diseño del instrumento electrónico.
6. **Programación del microcontrolador MSP430FR6989.** En este capítulo se describe al lector la programación implementada en el microprocesador MSP430FR6989.
7. **Resultados.** En este capítulo se muestran los procedimientos y resultados obtenidos en laboratorio.
8. **Conclusiones.** Este capítulo final recoge las conclusiones extraídas por el autor de este Trabajo Fin de Grado, conclusiones tanto técnicas como personales

Cada capítulo se compone de una serie de subapartados, tantos como se ha considerado necesario. Se ha procurado no sobrepasar los tres niveles de subapartados.



CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN

En este capítulo se detallan los objetivos preestablecidos para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, así como la planificación que se prevé seguir.

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es el diseño y fabricación de un instrumento avanzado de medida que cumpla los requisitos establecidos a continuación.

- 3 canales de medida compatibles con sensor PT100 a tres hilos.
- LCD donde mostrar los datos de temperatura.
- Resolución de decigrados Celsius.
- Convertidor analógico-digital de 12 Bits.
- Comunicación a PC a través del protocolo UART.
- Microcontrolador que gobierne el instrumento.
- Rango de medida comprendido entre -20°C y 50°C .

Con estos requisitos se puede plantear un esquema de cómo será el instrumento. En la Figura 3 se detalla este esquema

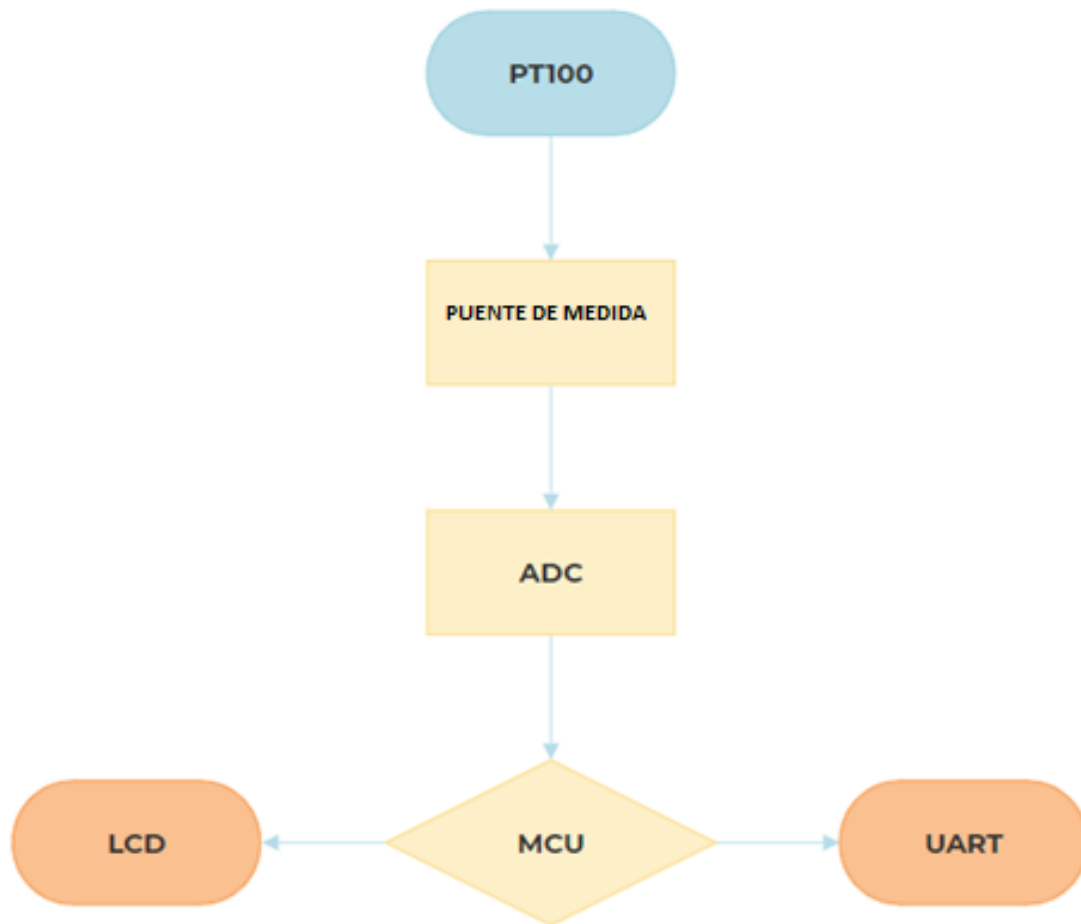


Figura 3. Esquema preliminar del instrumento

Una vez que se ha prediseñado la estructura del instrumento, se pueden plantear una serie de objetivos o metas que conduzcan al desarrollo final del trabajo.

1. Recopilación de información acerca de sensores PT100, así como los circuitos de medida que se emplean para ellos.
2. Documentación y elección del microcontrolador que se va a emplear.
3. Documentación y elección del convertidor analógico – digital que se va a emplear.
4. Documentación y elección del LCD que se va a emplear.
5. Modelar matemáticamente los sensores PT100 que se van a emplear.
6. Diseñar la etapa analógica adecuada para este proyecto. En este apartado se incluye la elección de los componentes electrónicos apropiados para esta etapa.

7. Modelar matemáticamente la etapa analógica haciendo uso de técnicas de análisis de circuitos.
8. Simular con el software de ORCAD la etapa analógica diseñada y comprobar la concordancia de los resultados con los esperados matemáticamente.
9. Diseño y fabricación de un prototipo de la etapa analógica.
10. Análisis en laboratorio de los resultados obtenidos con el prototipo, así como comparación con los resultados obtenidos en simulación y en el modelo matemático.
11. Diseño del instrumento completo, este apartado incluye la elección de los componentes electrónicos necesarios.
12. Fabricación del PCB y ensamblado de los componentes.
13. Programación del microcontrolador.
14. Análisis de los resultados obtenidos en el instrumento.
15. Redacción de la memoria.

Una vez los objetivos están definidos se puede establecer una planificación acorde a estos (Tabla 2). Para planificar el trabajo se va a hacer uso del Diagrama de Gantt [3]. Se estima por tanto una duración de catorce semanas. Además, se estima una dedicación media de cuatro horas diarias, siendo la duración total de este Trabajo Fin de Grado de 392 horas.

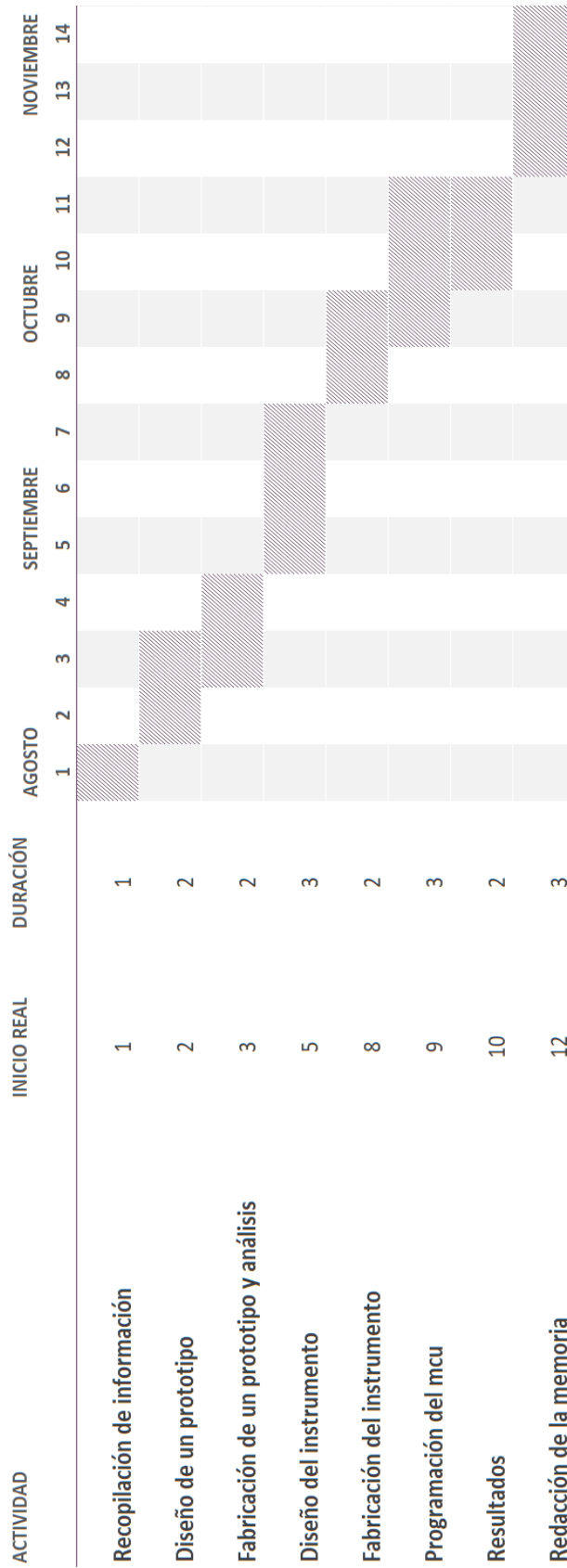


Tabla 2. Diagrama de Gantt de la planificación

CAPITULO 3. MATERIALES

En este capítulo se describe al lector los materiales empleados en el diseño y montaje del instrumento objeto de este Trabajo Fin de Grado. El capítulo se divide en cuatro apartados principales. En cada apartado se describen los materiales, indicando qué son, para qué se emplean, las características que han llevado a escoger dichos componentes, la referencia bibliográfica del datasheet componente y una imagen de éste.

Los materiales escogidos han sido explicados y empleados en las asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial que listan a continuación: Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Electrónica Analógica [43103211], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de sistemas electrónicos [43104219].

La tecnología de montaje escogida para todo el diseño es la de orificio pasante.

Todos los materiales se han escogido haciendo un análisis calidad-precio entre los disponibles en el catálogo del proveedor RS-COMPONENTES.



3.1 ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

La primera decisión que se debe tomar para llevar a cabo este proyecto es la elección del microcontrolador. Esta decisión es de vital trascendencia para el desarrollo del trabajo, por lo que es necesario hacer un buen trabajo de documentación a la par de tener presentes las especificaciones anteriormente descritas [capítulo 2].



CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN Tras investigar los fabricantes más conocidos en este ámbito (Atmel, National Instruments, Texas Instruments, Microchip Technology e Intel) llamó poderosamente la atención un sistema integrado del fabricante Texas Instruments compuesto por el microcontrolador MSP430FR6989.

3.1.1 MICROCONTROLADOR MSP430FR6989

El microcontrolador escogido para este instrumento fue el MSP430FR6989 [26] de Texas Instruments. En este apartado vamos a detallar el porqué de su elección y las características que lo hacen idóneo para nuestro proyecto.

- Arquitectura de 16-Bits, con reloj interno de hasta 16MHz. La potencia de este dispositivo lo hace muy atractivo para este proyecto y sus posibilidades de ampliación.
- ADC interno de 12 bits de resolución y 16 canales de muestreo.

Contar con un convertidor analógico embebido hace que la carga de diseño se vea reducida. Además, sus doce bits de resolución son suficientes para ser la precisión descrita anteriormente [capítulo 2]. En este cometido se precisan tres de los dieciséis canales, pero es interesante la posibilidad de ampliación del instrumento.

- Modos de funcionamiento “Ultra-Low-Power”.
En la ingeniería moderna resulta fundamental reducir el consumo de nuestros instrumentos a la hora de diseñar. Es por este hecho que resulta de gran interés sumergirse en la programación de un microcontrolador de estas características.
- Comunicación UART por puerto serie con detección automática de la tasa de Baudios.

Como se ha descrito en los requisitos del instrumento



CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN [capítulo 2] se precisa disponer de comunicación por el puerto serie. Este MCU además de estar preparado para ello dispone de tecnologías adicionales que facilitan la comunicación.

- Entorno de programación C/C++ propio “CODE COMPOSER STUDIO”.
Que este MCU se pueda programar en lenguaje C lo hace atractivo para este proyecto. C es el lenguaje que se imparte en el Grado de Ingeniería Electrónica Industrial. Además, el entorno de programación es propio de Texas Instruments y resulta de gran interés manejarse en una suite profesional. Es muy recomendable de cara al mercado laboral conocer entornos específicos de programación de microcontroladores.

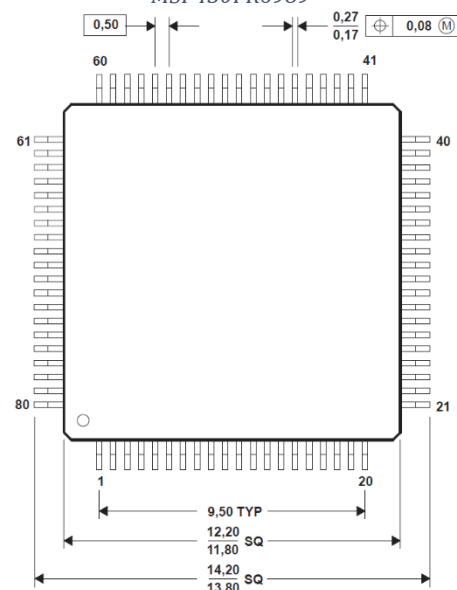
3.1.2 LAUNCHPAD MSP430FR6989

El microprocesador anteriormente descrito (3.1.1 MICROCONTROLADOR MSP430FR6989) es vendido en formato smd. A la derecha del texto, en la Figura 4 podemos ver una imagen que se ha extraído del datasheet de este microcontrolador. Teniendo en cuenta que las cotas que nos ofrecen son milímetros nos hacemos una idea del reducido tamaño del microcontrolador. Se trata de un dispositivo equipado con 80 patillas. Cada patilla tiene un grosor de 0.2mm y el ancho de esta obra de ingeniería es de 12 mm.

Con la tecnología que se dispone actualmente en el Área de Tecnología Electrónica de la Universidad de Almería no se puede soldar este dispositivo al PCB. Es por ello que optamos por una solución que evitara tener que cambiar el microcontrolador escogido.

El fabricante Texas Instruments [4] dispone de tarjetas de desarrollo “LaunchPad” en las que se integra el microcontrolador. Este LaunchPad está equipado con un Booster Pack que permite conectarlo con el exterior. Esta tarjeta incluye un LCD interconectado con el MSP430FR6989, lo que reduce la carga de diseño de nuestro instrumento.

Figura 4. Croquis del microcontrolador MSP430FR6989



En la Figura 5 se muestra una imagen del LaunchPad.

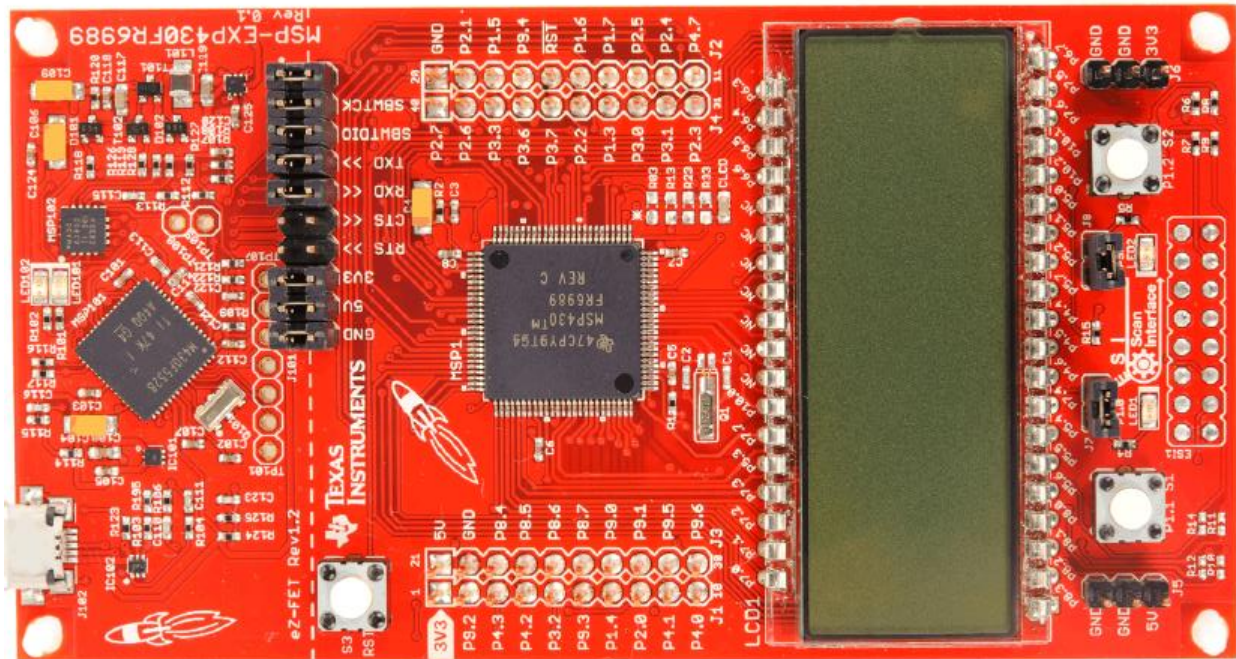


Figura 5 Launchpad MSP430FR6989

En este apartado vamos a detallar el porqué de su elección y las características que lo hacen idóneo para nuestro proyecto.

- Booster Pack de Inserción.

El principal argumento para la elección de esta tarjeta integrada es la facilidad de inserción al instrumento electrónico que se va a construir.

- Liquid Cristal Display (LCD).

Como se ha resaltado anteriormente, el LaunchPad dispone de un panel LCD interconectado con el microcontrolador.

- Emulador incorporado.

Este Launchpad dispone de un emulador con un conector USB que se conecta con el entorno CODE COMPOSER STUDIO para lanzar la programación al MCU. Esta es de lo más conveniente ya que nos permite cargar códigos sin necesidad de extraer el MCU y además tiene la ventaja de poder depurar el código con el MCU conectado al instrumento a fabricar.



En la Figura 6 se muestra un diagrama de la arquitectura emulador-MCU-BoosterPack que el fabricante incluye en el Datasheet [5] y que resulta interesante para comprender el emulador.

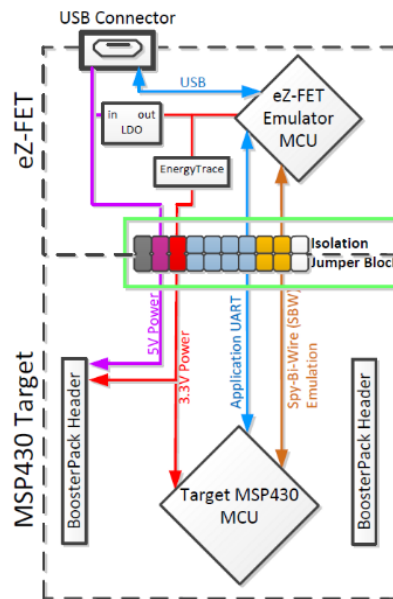


Figura 6. Diagrama emulador-MCU-BoosterPack

3.2 MATERIALES DE INSERCIÓN PCB

En este apartado se detallan los materiales que no forman parte de la circuitería, pero son necesarios para el diseño del PCB.

3.2.1 ZÓCALO DIL DE 8 CONTACTOS

Este componente se usa para insertar los integrados de ocho patillas. Es un elemento de protección. Si se decidieran soldar los integrados al PCB directamente, el calor de la soldadura podría dañar el componente. Además, en caso de avería o deterioro de los integrados colocados sobre zócalos se pueden sustituir sin necesidad de emplear técnicas de desoldado. En la bibliografía se encuentra el datasheet de este elemento [6].

En la Figura 7 se muestra una imagen de este componente.



Figura 7. Zócalo DIL de 8 patillas

3.2.2 ZÓCALO DIL DE 16 CONTACTOS

Este componente se usa para insertar los integrados de 16 patillas. Al igual que en el apartado anterior [3.2.1 ZÓCALO DIL DE 8 CONTACTOS] se trata de un elemento de protección. En el caso de este elemento, el fabricante no suministra su datasheet. En la Figura 8 se muestra una imagen de este componente.

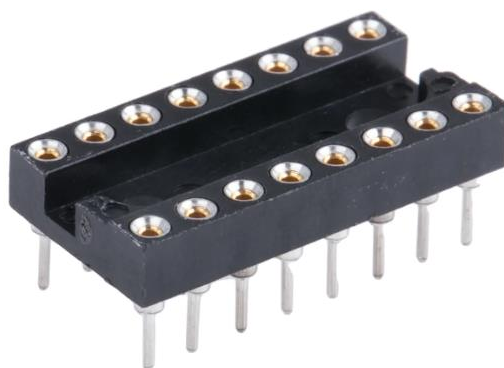


Figura 8. Zócalo DIL de 16 CONTACTOS



3.2.3 BLOQUE DE TERMINAL PCB DE TRES CONTACTOS

Este versátil componente se emplea para conectar elementos externos al instrumento con la circuitería de éste. En este caso se emplea un bloque para la alimentación simétrica y tres para los canales de medición. El datasheet de este dispositivo se encuentra en la bibliografía [7]. En la Figura 9 se muestra una imagen de este componente.



Figura 9. Bloque de terminal PCB de 3 contactos

3.2.4 CONECTOR DE CONTACTO MACHO VERTICAL

Este elemento es empleado en este diseño como como unión fija, para conectar dos pistas del PCB, con la posibilidad de interrumpir la continuidad ante futuras modificaciones. Es de gran utilidad y en la industria se emplea con vistas a diseñar un prototipo de pruebas versátil, que pueda implementar varias configuraciones y escoger la que se desee sin necesidad de tener que volver a fabricar un prototipo. En la bibliografía se encuentra el datasheet de este elemento [8]. En la Figura 10 se muestra un croquis de este componente.

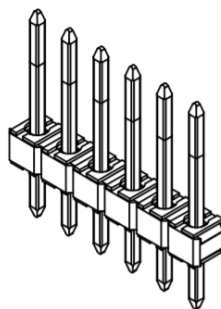


Figura 10. Conector de contacto macho vertical

3.2.5 ENLACE CORTO HEMBRA DE DOS CONTACTOS

Este elemento se emplea para unir los terminales del componente anterior estableciendo así la continuidad eléctrica en sendos terminales. En la bibliografía se encuentra el datasheet de este elemento [9]. En la Figura 11 se muestra una imagen de este componente.



Figura 11. Enlace corto hembra de dos contactos

3.2.6 CONECTOR MACHO PARA PCB DE 10 CONTACTOS

Este elemento terminal es empleado para conectar el computador con el instrumento electrónico y poder establecer, de esta manera, la comunicación UART. El fabricante no aporta datasheet de este conector. En la Figura 12 se muestra una imagen de este componente.

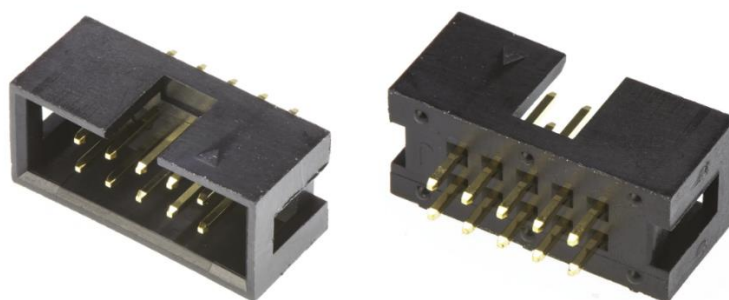


Figura 12. Conector macho para PCB de 10 contactos



3.2.7 CABEZAL DE PINES 20 PINES 2 FILAS

Estos conectores los vamos a emplear para ensamblar el LaunchPad a nuestro circuito. En la bibliografía se encuentra el datasheet

de este componente [10]. En la Figura 123 se muestra una imagen de este componente



Figura 13. Cabezal de pines 20 pines 2 filas

3.3 ELEMENTOS PASIVOS

En este apartado se describen al lector los elementos pasivos empleados en el diseño.



3.3.1 RESISTENCIAS

Todas las resistencias empleadas en este diseño tienen una tolerancia del 0.1%. Esta tolerancia se ha dimensionado teniendo en cuenta la precisión indicada en las especificaciones del instrumento [capítulo 2



CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN]. En la bibliografía se encuentra el datasheet de estos elementos [11]. Los valores de resistencia que se han adquirido se muestran en la Tabla 3.

VALOR DE RESISTENCIA [Ω]
10K
107
4.87K
8.06K
178
40.2
10
510
100

Tabla 3. Valores de resistencia

En la siguiente imagen se observa una resistencia como las empleadas en el diseño. En la Figura 14 se muestra una imagen de una resistencia genérica.



Figura 14. Resistencia genérica

3.3.2 RESISTENCIAS VARIABLES

Estos elementos resistivos se van a emplear para calibrar el dispositivo. Se ha escogido el modelo de 20 vueltas ya que a mayor número de vueltas mayor precisión en el ajuste. Todas las resistencias variables incluidas en este diseño son del mismo modelo, únicamente cambia su valor

de resistencia nominal. En la bibliografía se encuentra el datasheet de estos elementos [12]. La Tabla 4 muestra los valores de resistencia variable que se han adquirido.

VALOR DE RESISTENCIA [Ω]
100
3.3K
10K

Tabla 4. Valor de resistencia

En la Figura 155 se muestra una imagen de este componente.

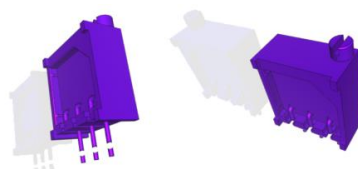


Figura 15. Modelo 3D de las resistencias variables

3.3.3 CONDENSADORES

Los condensadores empleados en nuestro diseño se encuentran ordenados en la Tabla 5

CAPACIDAD	MATERIAL	POLARIZADO	TOLERANCIA	DATASHEET	IMAGEN
-----------	----------	------------	------------	-----------	--------




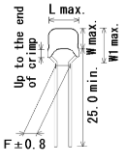

10uF	Aluminio	Sí	20%	Referencia bibliográfica [13]	 <p><i>Figura 16. Condensador de aluminio</i></p>
100nF	Cerámico multicapa	No	15%	Referencia bibliográfica [14]	 <p><i>Figura 17. Condensador cerámico multicapa</i></p>
10uF	Tántalo	Sí	10%	Referencia bibliográfica [15]	 <p><i>Figura 18. Condensador de tántalo</i></p>

Tabla 5. Condensadores empleados

3.3.4 DIODOS ZENER DE 15V

Estos componentes se emplean en el circuito de protección del circuito de adaptación de niveles del protocolo UART. En la bibliografía se encuentra el datasheet de estos componentes [16]. En la Figura 19 se muestra una imagen de este componente.



Figura 19. Diodo Zener de 15V

3.4 ELEMENTOS ACTIVOS

En este apartado se describen al lector los elementos activos que han sido empleados en el diseño.

3.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL LT1490

Todos los amplificadores operaciones empleados en nuestro diseño son del modelo LT1490 [17] del fabricante ANALOG DEVICES. Se trata de un amplificador operacional Rail-to-Rail. Este dispositivo se mantiene en la línea de diseño optimizado de bajo consumo. Una característica muy atractiva y que lo hace ideal para nuestro diseño es su bajo offset siendo éste de 500uV como valor máximo. Para llevar al lector a comprender la magnitud de este offset se puede comparar con el offset proporcionado por el amplificador de uso común TL082 [18]. El fabricante de este último nos garantiza un offset de 15mV, es decir, dos órdenes de magnitud mayor.



En la Figura 20 se muestra una imagen de este componente.

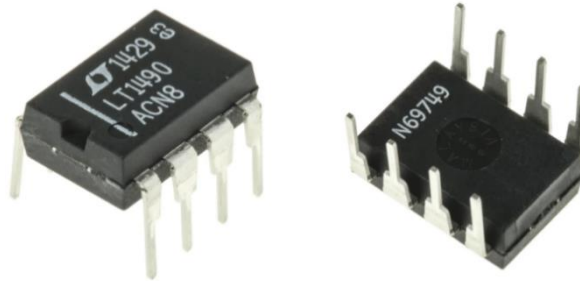


Figura 20. Amplificador operacional LT1490

3.4.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA128

El amplificador de instrumentación INA128 [19] se emplea para amplificar tensiones diferenciales, lo cual hace este dispositivo ideal para nuestro propósito. Su ganancia es configurable, con un rango comprendido entre 1 y 10000. Esta ganancia se configura colocando una resistencia entre los pines 1 y 8 del dispositivo. Además de amplificar la señal de entrada es capaz de desplazarla, haciendo de este dispositivo un acondicionador de señal all in-one. El INA128 posee un circuito de compensación de offset interno que garantiza un offset de salida máximo de 50uV, un orden de magnitud menor que el offset del LT1490 (3.4.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL LT1490). En la Figura 21 se muestra una imagen de este componente.



Figura 21. INA128

3.4.3 TRANSECTOR DE LÍNEA MAX232N

Como se indica más adelante en la descripción del microprocesador [3.1.1 MICROCONTROLADOR MSP430FR6989], éste dispone de patillas destinadas al protocolo UART. Los niveles de señal del MCU son TTL, es decir, un cero lógico se simboliza con una tensión de cero voltios y un uno lógico se simboliza con un voltaje de 3.3 voltios. El computador, sin embargo, trabaja con un valor de -12 voltios para el cero lógico y un valor de +12 voltios para el uno lógico. Esta incompatibilidad requiere que se implemente una adaptación de niveles. Para este trabajo se ha optado por escoger el dispositivo MAX232 [20]. Este dispositivo de dieciséis patillas cuenta con dos canales de conversión de datos, aunque en nuestro uso únicamente emplearemos uno es interesante contar con un canal libre para futuras ampliaciones.

En la Figura 22 se muestra una imagen de este componente.



Figura 22. Transceptor de línea MAX232N



3.4.4 REFERENCIA DE TENSION TL1431ACZ

El diseño requiere de puntos de tensión diseñados a 2.5V. Para este propósito se va a emplear la referencia de tensión TL1431ACZ [21]. Se trata de una referencia programable que emplea en su diseño un diodo Zener, lo garantiza una precisión de salida del 0.4% al 0.25% un bajo coeficiente de temperatura. En la Figura 23 se muestra una imagen de este componente.



Figura 23. Referencia de tensión TL1431ACZ

3.4.5 REGULADOR DE CONMUTACIÓN R-785-0.5

Para alimentar la etapa digital de nuestro instrumento es necesario un generador de tensión de 5V. En este diseño se ha optado por el dispositivo R-785-0.5 [22]. Siguiendo la línea de optimizar el consumo, se ha escogido este regulador conmutado que cuenta con una eficiencia del 97%. Este dispositivo es capaz de suministrar 500mA de corriente nominal, siendo su potencia de 2.5W, todo esto sin la necesidad de montar disipador de calor. En la Figura 244 se muestra una imagen de este componente.



Figura 24. Regulador de conmutación R-785-0.5

CAPÍTULO 4. MÉTODOS

En este capítulo se describen las herramientas, métodos y software empleado en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

4.1 HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS

Los conocimientos para emplear con destreza las herramientas matemáticas empleadas en este Trabajo Fin de Grado han sido adquiridos en el Grado en Ingeniería electrónica Industrial de la Universidad de Almería. Se consideran claves los conocimientos adquiridos en las asignaturas que listan a continuación: Matemáticas I [44101101], Matemáticas II [44101102], Teoría de Circuitos y Máquinas Eléctricas [44101102], Electrónica Básica [44102206], Electrónica Analógica [43103211], Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].

4.2 MÉTODOS DE DISEÑO

Los métodos de diseño empleados en este Trabajo Fin de Grado han sido aprendidos en el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial de la Universidad de Almería. Se consideran clave los conocimientos adquiridos en las asignaturas que listan a continuación: Electrónica Analógica [43103211], Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].



4.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN

En este Trabajo Fin de Grado se emplean los conocimientos de programación en C/C++ adquiridos en la asignatura Programación [44101107] del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y los conocimientos de programación de microcontroladores adquiridos en la asignatura Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].

4.4 SOFTWARE EMPLEADO

En este apartado se describen los programas informáticos que han hecho posible la consecución de este proyecto.

4.4.1 MATLAB

Para el cálculo matemático de este Trabajo Fin de Grado se ha empleado el Software MATLAB [23], de la empresa MATHWORKS. Esta plataforma ha sido optimizada para la resolución de problemas de Ingeniería. Cuenta con un lenguaje de programación propio, basado en matrices. Una característica muy interesante son las gráficas integradas, ya que facilitan la visualización de los datos y el tratamiento de la información que nos ofrecen.

La Universidad de Almería pone a disposición del alumnado licencias de uso personal para este software.

Las asignaturas en las cuales se ha impartido este software son las que listan a continuación: Automatización Industrial [44102208], Modelado y Control de Sistemas Continuos [43103214], Control por Computador [43103220], Robótica [43104216] y Técnicas de Control Industrial [43104221].

4.4.2 ORCAD

Durante el transcurso del grado en Ingeniería Electrónica Industrial y por parte del profesorado del Área de Tecnología Electrónica de la Universidad de Almería se ha formado al alumno en este software [24] de simulación y diseño de sistemas electrónicos. Se trata de un conjunto formado por tres programas que permiten al usuario diseñar desde cero cualquier sistema analógico. Se trata de un programa empleado ampliamente en la industria.

La Universidad de Almería pone a disposición del alumnado licencias de uso personal para este paquete de software.

Las asignaturas en las cuales se ha impartido este paquete de software son las que listan a continuación: Electrónica Básica [44102206], Electrónica Analógica [43103211], Electrónica de Potencia [43103218], Electrónica Digital [43103212], Instrumentación Electrónica [43104213] y Diseño de Sistemas Electrónicos [43104219].

4.4.2.1 SCHEMATICS

Este software se centra en la simulación de sistemas electrónicos analógicos. En su librería cuenta con una gran variedad de componentes electrónicos de diversos fabricantes, además de conceder la opción de diseñar y modelar los componentes que el usuario requiera.

Entre la variedad de análisis con la que cuenta este software se ha empleado el análisis transitorio.



4.4.2.2 CAPTURE

Este software se emplea para el diseño unifilar del circuito electrónico. Es el paso previo a al diseño PCB del circuito. Al igual que SCHEMATICS [4.4.2.1 SCHEMATICS] incorpora una amplia variedad de componentes de diversos fabricantes y da la opción de modelar componentes nuevos.

4.4.2.3 LAYOUT

Este software se utiliza para el diseño del PCB. Se implementa el diseño creado en CAPTURE y se da forma al PCB final que se va a fabricar. Este programa permite configurar todos los parámetros del diseño. Además, cuenta con la posibilidad de revisar errores de diseño basados en las normas generales de diseño que se deseen.

4.4.3 CODE COMPOSER STUDIO

Este software [25] es un entorno integrado de desarrollo (IDE) empleado para la programación de microcontroladores y procesadores integrados de TEXAS INSTRUMENTS. CODE COMPOSER STUDIO cuenta con un conjunto de herramientas empleadas para el desarrollo y depuración de aplicaciones integradas. El compilador empleado es de C/C++. La interfaz de programación hace es muy intuitiva y facilita el uso de un programa con el cual el alumno de Ingeniería Electrónica Industrial de la Universidad de Almería no está familiarizado.

Va a ser empleado para la programación del microcontrolador MSP430FR6989 descrito en el apartado de materiales [3.1.1 MICROCONTROLADOR MSP430FR6989].

Este software no ha sido utilizado en el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial de la Universidad de Almería.

Es un software de licencia abierta.



4.4.4 AUTOCAD

Autocad [27] es un software de diseño asistido por ordenador (CAD) empleado para producir dibujos 2D. En este Trabajo Fin de Grado se ha empleado con la finalidad de crear figuras donde se detallan partes y diseños del circuito electrónico para que el lector de este documento pueda entender con claridad los pasos que se detallan.

Las habilidades y conocimientos para emplear este software han sido adquiridos a través de un curso impartido por parte del área de formación continua de la Universidad de Almería.

La Universidad de Almería dispone de ordenadores con licencia de AUTOCAD para que los alumnos puedan trabajar en este programa.

4.4.5 MICROSOFT WORD

MICROSOFT WORD [28] es procesador de texto de la compañía MICROSOFT. Es el procesador de texto más utilizado globalmente, y se adquiere dentro del paquete de software ofimático MICROSOFT OFFICE.

Este procesador de texto ha sido usado en mayor o menor medida en todas las asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.

La Universidad de Almería pone a disposición licencias de uso personal para el alumnado.



4.5. MÉTODOS DE FABRICACIÓN

En este apartado se describen los métodos de fabricación empleados en este proyecto.

4.5.1 FABRICACIÓN PCB

En este trabajo se han empleado dos métodos de fabricación PCB diferentes, por un lado, para el prototipo, se ha empleado un método de fabricación casero, el cual consiste en grabar el diseño PCB del prototipo en una placa PCB fotosensible, empleando una insoladora para, posteriormente, y con la ayuda de diversos químicos, eliminar el cobre y por ende trazar las pistas.

Por otro lado, para el instrumento electrónico, se han enviado los archivos correspondientes a la empresa JLCPCB [29] para que fabriquen el PCB.

4.5.2 ENSAMBLADO DE COMPONENTES

Tanto el instrumento como el prototipo se han ensamblado empleando un soldador manual y estaño.

CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL INSTRUMENTO

ELECTRÓNICO

En este capítulo se describe al lector el diseño del instrumento electrónico, etapa por etapa y empleando los métodos descritos anteriormente

5.1 ALIMENTACIÓN DEL INSTRUMENTO

Se ha acordado con el director del Trabajo Fin de Grado que la alimentación que se requiere es una alimentación simétrica a 15V. Dicha tensión se proporciona ya filtrada por lo que únicamente se incorporarán dos condensadores cerámicos polarizados con valor de 10uF, uno para la entrada +15V y otro para la entrada -15V. Además, se incorpora un conector de tres entradas [7] para conectar la alimentación al PCB. En la Figura 25 se muestra una imagen de este componente.



Figura 25. Conector de 3 contactos para PCB

Para alimentar la etapa digital del instrumento se requiere una tensión de 5V. Para conseguir esta diferencia de potencial vamos a requerir de un elemento generador de tensión. Tras revisar las diferentes opciones y empleando los conocimientos adquiridos en la asignatura Electrónica de Potencia de la Universidad de Almería [código 43103218] se concluye que la mejor solución consiste en un regulador conmutado. Estos dispositivos ofrecen una precisión extraordinaria en su voltaje de salida con un consumo menor que los reguladores tradicionales.



Este bajo consumo lo consiguen empleando transistores bipolares que trabajan entre la zona de corte y la de saturación, conmutando de una fase a otra. El punto negativo que ofrecen este tipo de reguladores es que introducen ruido de alta frecuencia en el sistema.

Tras revisar los reguladores de tensión conmutados se escoge el dispositivo R-785-0.5 [22]. Este dispositivo de tres patillas [Figura 26] ofrece una tensión de salida de 5V con una corriente máxima de 500mA. Para comprobar que esta corriente es suficiente para alimentar el LaunchPad se ha revisado el datasheet de éste [5].



Figura 26. R-785-0.5

En la Figura 27 se muestra un esquema de la alimentación diseñada.

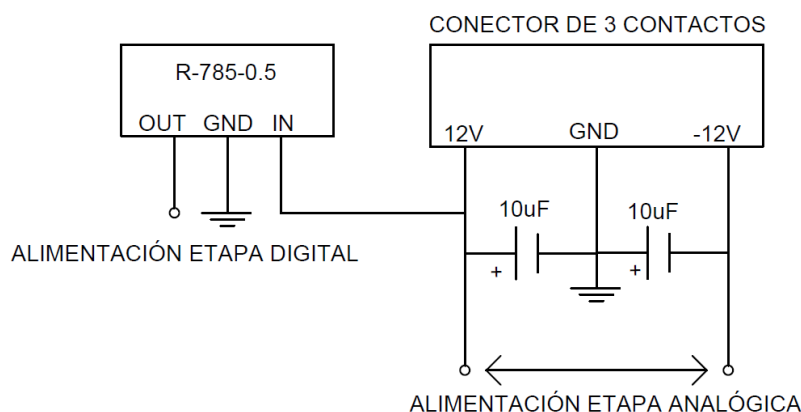


Figura 27. Esquema de la alimentación

5.2 PUENTE DE MEDIDA

Como se ha descrito anteriormente, [capítulo 2] el instrumento debe medir temperatura a través de tres sensores PT100 diferentes. Para cumplir este requisito debemos diseñar tres puentes de medida. Será suficiente con diseñar uno y triplicarlo en el diseño, puesto que los sensores son los mismos y en el mismo rango.

En la bibliografía existen múltiples diseños de puentes de medida. En concordancia con lo visto en la asignatura Instrumentación Electrónica [3104213] de la Universidad de Almería se determina que el diseño más eficiente para medir resistencias PT100 a tres hilos es el puente de Weathstone [30].

En la Figura 28 se muestra dicho puente.

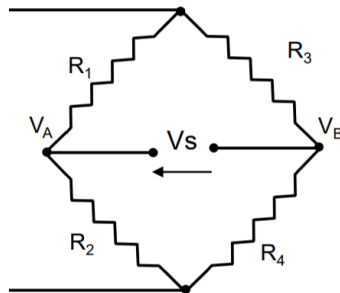


Figura 28. Puente de Weathstone

El puente de medida se puede excitar en tensión, colocando una fuente entre sus extremos, sin embargo, se ha decidido excitar con corriente, ya que de esta manera se reduce el error a la mitad. Esto añade carga al diseño, pero a cambio se consigue mejorar la linealidad de la respuesta. La fuente de corriente se ha diseñado empleando un amplificador operacional realimentado negativamente siguiendo el diseño mostrado en la Figura 29.

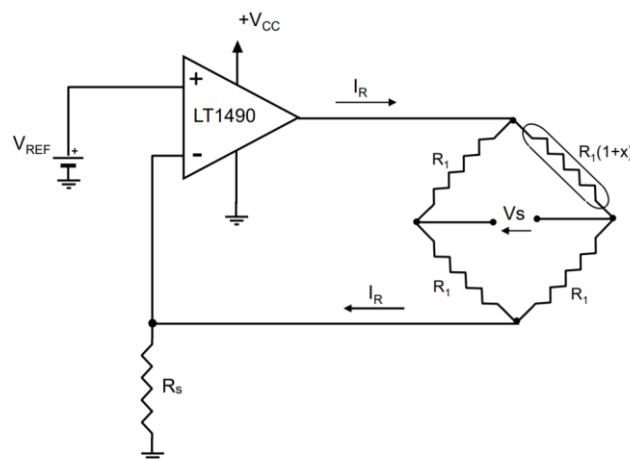


Figura 29. Puente de Weathstone alimentado en corriente



Al emplear este diseño la corriente de alimentación queda definida por la ecuación [4].

$$I_R = \frac{V_{REF}}{R_S} \quad [4]$$

Se procede a dimensionar los componentes de esta etapa del circuito.

- Amplificador operacional.

Se ha decidido emplear el LT1490 por su bajo offset de salida, característica que permitirá que la corriente de salida se mantenga próxima al valor diseñado.

- Voltaje de referencia.

Para suministrar el voltaje necesario vamos a emplear una referencia de tensión de precisión programable que hemos empleado en la asignatura Instrumentación Electrónica [43104213] de la Universidad de Almería. Se trata del dispositivo TL1431. En un componente muy versátil debido a que se puede programar la tensión de salida. Es capaz de suministrar corrientes de hasta 100mA sin necesidad de disipador, lo cual no es nada habitual para un encapsulado T092. En la Figura 30 se muestra la conexión que vamos a emplear para obtener un voltaje de salida de dos voltios y medio.

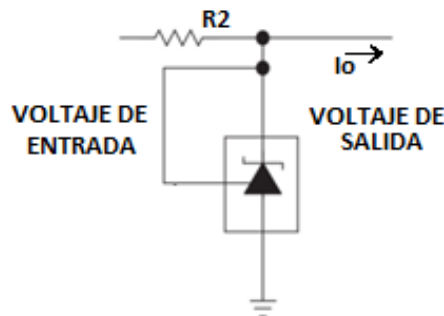


Figura 30. Conexión de LT1431

La resistencia R_S fija la corriente que suministra la referencia de tensión. Sabiendo que la alimentación de entrada es de doce voltios y el voltaje de salida es de dos voltios y medio podemos determinar que la corriente que suministra el dispositivo viene dada por la ecuación [5].

$$I_0 = \frac{V_{ENTRADA} - V_{SALIDA}}{R_1} \quad [5]$$

La corriente que suministra la referencia no debe ser precisa. Basta con ser dos magnitudes superior a la corriente de excitación del puente. Se fija la corriente en 20 mA y se procede a calcular la resistencia.

$$R_2 = \frac{V_{ENTRADA} - V_{SALIDA}}{I_0} = \frac{12V - 2.5V}{20 \text{ mA}} = 0.475 \text{ K}\Omega$$

Se asigna el valor normalizado de 510 Ω por lo que tendremos una intensidad de aproximadamente 18 mA.

- Intensidad I_0

La intensidad I_0 de excitación del puente de medida se rige por la ecuación [6], que no es más que la aplicación de la ley de Ohm.

$$I_0 = \frac{V_{REF}}{R_S} \quad [6]$$

Para el diseño de esta corriente hay que tener en cuenta dos factores. En primer lugar, a mayor corriente mayor será el voltaje de salida del puente V_S . Por otro lado, debemos tener en cuenta el fenómeno de autocalentamiento, por el cual una resistencia aumenta su temperatura al pasar por ella una corriente. A mayor corriente mayor incremento de temperatura. Este incremento de temperatura puede inducir a error las lecturas de nuestro instrumento por lo que se debe llegar a una solución de compromiso entre los dos aspectos descritos. Tras revisar la bibliografía se ha convenido fijar la intensidad I_0 en 250 μA . Se calcula por tanto el valor de la resistencia R_S para dicha corriente.

$$R_S = \frac{V_{REF}}{I_0} = \frac{2.5 \text{ V}}{250 \mu\text{A}} = 10 \text{ K}\Omega$$

Dicho valor se encuentra normalizado por lo que se da por concluido el cálculo.

- Resistencias R_p .

El valor de las tres resistencias R_p de la Figura 31 se establece como el valor de resistencia que adquiere la PT100 en el punto medio del rango, en este caso a los quince grados centígrados. Este valor de resistencia es de 105.24 Ω . Puesto que no existe esta resistencia como valor comercial se ha diseñado un ajuste que permite colocar resistencias de valores normalizados.



Se deben colocar como resistencia R_p un valor normalizado inmediatamente por encima de 105.24Ω . Este valor es de 107Ω . El ajuste implementado se observa en la Figura 311.

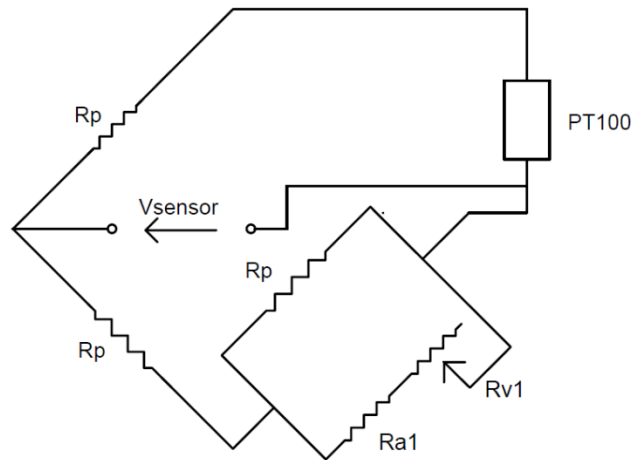


Figura 31. Puente de Weathstone con ajuste de cero

Con este ajuste se consigue equilibrar el puente de medida en el centro del rango, para ello el conjunto que se muestra en la Figura 32 debe dar como resultado equivalente el valor de la PT100 en el centro del rango, es decir, 105.24Ω .

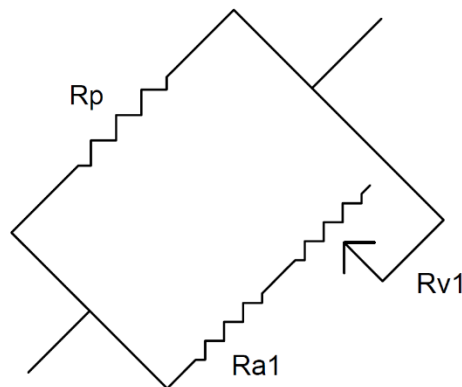


Figura 32. Ajuste del puente

Aplicamos la ecuación [7] para resistencias equivalentes serie y paralelo.

$$105.24 \Omega = \frac{107 \Omega \cdot (R_p + R_p)}{107 \Omega \cdot R_{V1} \cdot R_{A1}} \quad [7]$$



Se establecen los siguientes valores:

$$R_{V1} = 10K\Omega$$

$$R_{A1} = 4.87K\Omega$$

Se da por concluido el diseño y el cálculo del puente de medida.

5.3 ACONDICIONADOR DE SEÑAL

Para que el convertidor analógico – digital interprete correctamente la señal del sensor es necesario adecuarla al rango de entrada de dicho convertidor. Mediante programación se establece que el rango de entrada al ADC es de 0V a 2.5V, vamos a estudiar matemáticamente cuál es el rango de salida del sensor. La ecuación [8] representa la función de transferencia del voltaje V_S en función del valor de resistencia del sensor PT100.

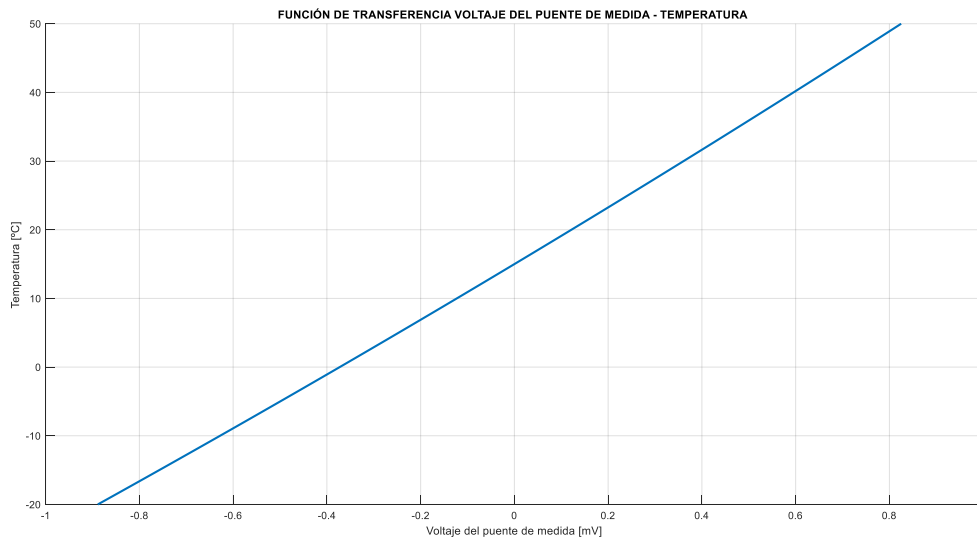
$$V_S = \frac{(R_1 + R_{PT100}) \cdot R_1 - (2 \cdot R_1) \cdot R_{PT100}}{3 \cdot R_1 + R_{PT100}} \cdot I_0 \quad [8]$$

Las ecuaciones [2] y [3] rigen la resistencia del sensor PT100 en función de la temperatura.

Empleando el software MATLAB creamos un vector de valor de la resistencia del sensor PT100 para cada valor del rango, con una resolución al miligrado. Una vez obtenido se introduce en la función V_S de la ecuación [8].



El resultado se muestra en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Función de transferencia voltaje del puente de medida - Temperatura

Observando la gráfica se determina que el voltaje del sensor va desde -0.88 mV para una temperatura de -20°C hasta un voltaje de 0.82 mV. Además, se aprecia la no linealidad de la función de transferencia. Esta no linealidad es menos acentuada que la de otros transductores como los NTC.

Para calcular nuestro acondicionador lo modelamos como una recta con una pendiente “b” y una ordenada en el origen “a”. Dicha recta viene definida por la ecuación [9].

$$V_{ACOND} = b \cdot V_S + a \quad [9]$$

Las condiciones de diseño son:

$$0 = b \cdot (-0.88 \text{ mV}) + a$$

$$2500 \text{ mV} = b \cdot (0.82 \text{ mV}) + a$$

Se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas y se obtienen los siguientes resultados:

$$b = 1459.427$$

$$a = 1295.971 \text{ mV}$$

Para diseñar el acondicionador se debe tener en cuenta que la tensión procedente del sensor es diferencial, es decir, no está referida a tierra. Por este motivo no podemos implementar un acondicionador basado en un amplificador operacional en modo inversor o no inversor. Debemos utilizar un amplificador de instrumentación con entrada diferencial. Para este propósito se va a emplear el INA128 [19], un amplificador de instrumentación diseñado para estos propósitos. Se revisa el datasheet para asegurarnos que nos puede proporcionar la ganancia deseada. Además, este dispositivo dispone de una patilla de entrada de referencia, donde llevaremos el voltaje correspondiente al desplazamiento “a”. En la Figura 33 se muestra un diagrama del INA128 donde se muestra su patillaje.

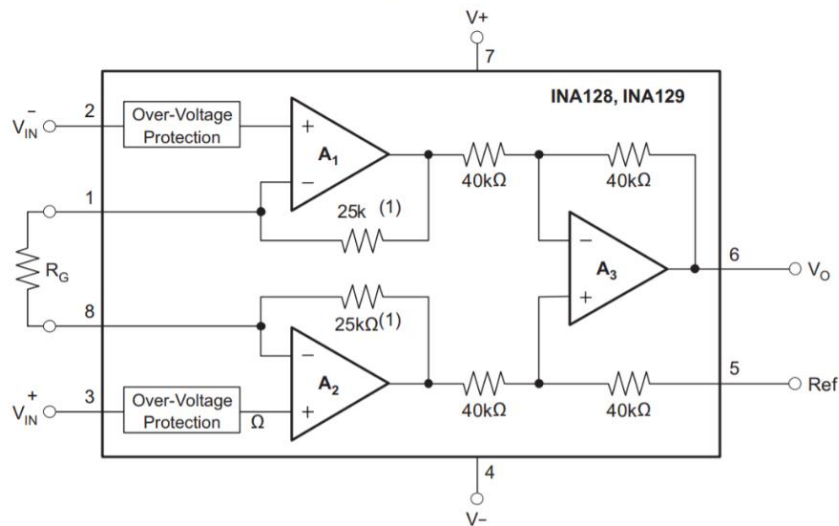


Figura 33. Esquema del INA128



5.3.1 DISEÑO DE LA GANANCIA

Para establecer la ganancia del INA 128 se coloca una resistencia entre las patillas 1 y 8 del dispositivo. La ecuación [10] para determinar dicha resistencia la proporciona el fabricante en el datasheet [19].

$$b = 1 + \frac{50 \text{ K}\Omega}{R_G} \quad [10]$$

Calculamos el valor de R_G para nuestra ganancia:

$$R_G = \frac{50 \text{ K}\Omega}{b - 1} = 34.28 \Omega$$

Para tener un ajuste de ganancia comprendido entre 1520 y 1420 se va a implementar una resistencia de ajuste en paralelo a la resistencia de ganancia compuesta por una resistencia fija de 178Ω [R_{A2}] y una resistencia variable 100Ω [R_{V2}]. La resistencia de ganancia se fija en 40.2Ω . En la Figura 34 se observa el diseño descrito.

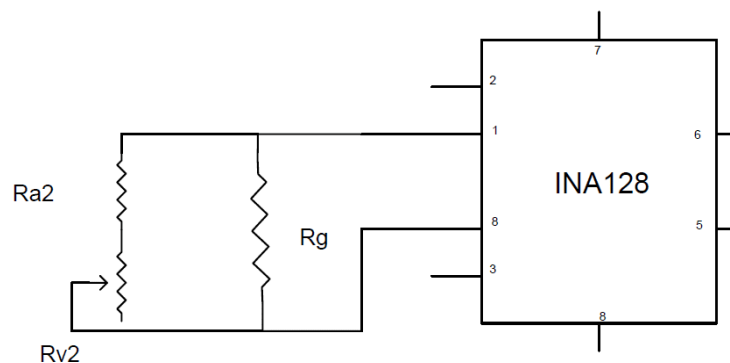


Figura 34. Ajuste ganancia INA128

5.3.2 DISEÑO DEL DESPLAZAMIENTO

En este apartado se va a diseñar la etapa que llevará el voltaje de desplazamiento hasta la patilla 5 del INA128. Se va a emplear un divisor resistivo con un ajuste que permita tener un desplazamiento regulable entre 1200 mV y 1400 mV. Añadimos también un amplificador operacional LT1490 en modo seguidor de tensión para disminuir la impedancia de salida de esta etapa. En la Figura 35 se observa el diseño descrito.

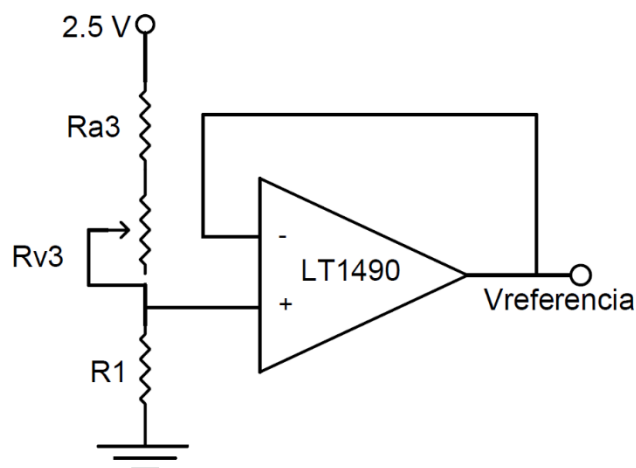


Figura 35. Diseño de la tensión de desplazamiento

Para obtener un desplazamiento regulable entre 1200mV y 1400mV se han escogido los siguientes valores de resistencias:

$$R_{A3} = 8.06 \text{ K}\Omega$$

$$R_{V3} = 3.3 \text{ K}\Omega$$



5.3.3 DISEÑO FINAL DEL ACONDICIONADOR

El diseño final de la etapa de acondicionado se muestra en la Figura 36.

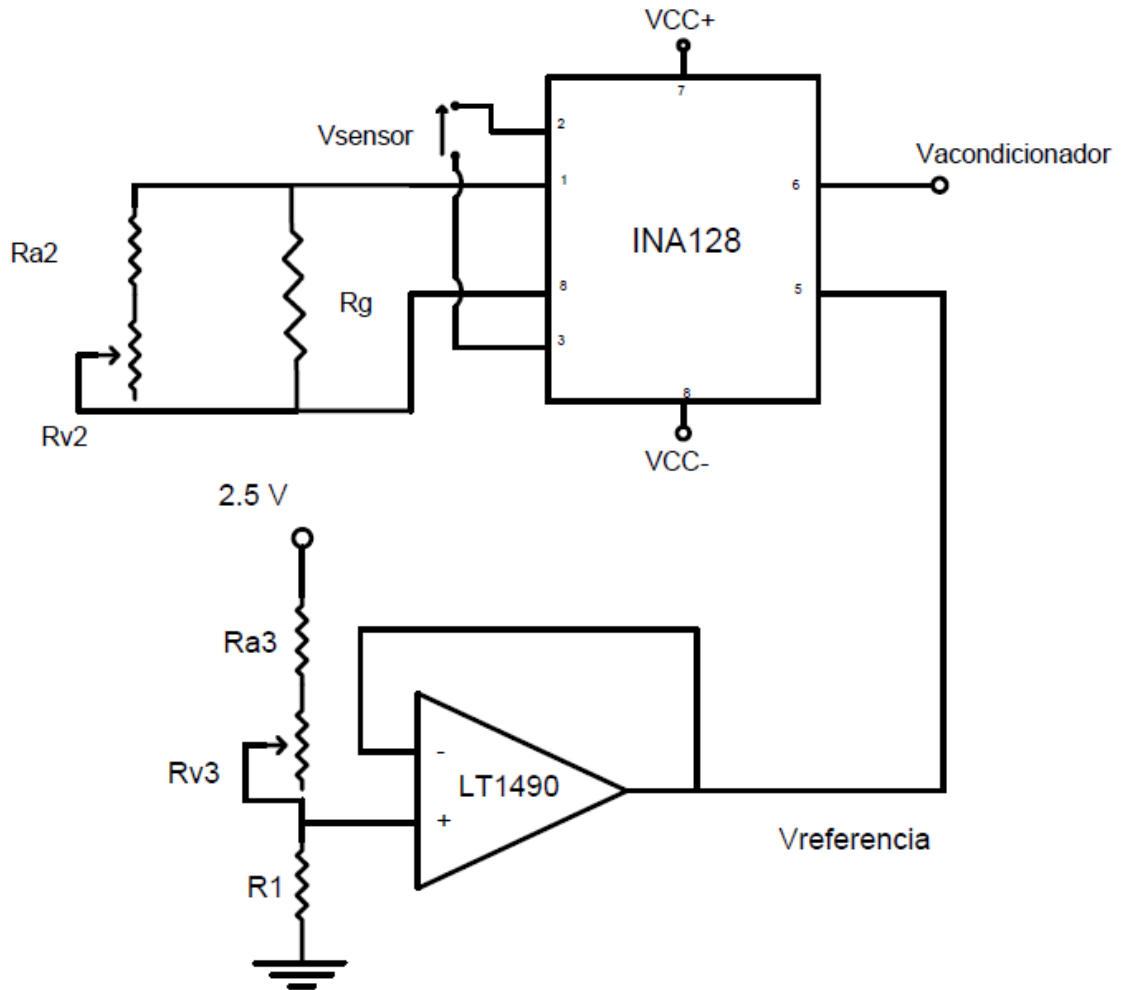


Figura 36. Etapa de acondicionado

5.4 ADAPTACIÓN DE NIVELES UART

Como se ha indicado en la descripción del microprocesador, éste dispone de patillas destinadas al protocolo UART. Los niveles de señal del MCU son TTL, es decir, un cero lógico se simboliza con una tensión de cero voltios y un uno lógico se simboliza con un voltaje de 3.3 voltios. El computador, sin embargo, trabaja con un valor de -12 voltios para el cero lógico y un valor de +12 voltios para el uno lógico. Esta incompatibilidad requiere que se implemente una adaptación de niveles. Para poder solventar esta situación se han revisado manuales técnicos de protocolos de comunicaciones, con el apoyo de los codirectores. Es un problema común en este tipo de instrumentos, es por esto que los fabricantes ponen a disposición de los diseñadores componentes electrónicos que hagan esta suerte de adaptación. Para este trabajo se ha optado por escoger el dispositivo MAX232 [10] [figura 37]. Este dispositivo de dieciséis patillas cuenta con dos canales de conversión de datos, aunque en nuestro uso únicamente emplearemos uno es interesante contar con un canal libre para futuras ampliaciones. Este dispositivo requiere de condensadores externos para ajustar los parámetros de funcionamiento. Se implantarán también diodos Zener de 15V [12] para proteger el instrumento de la entrada de señales procedentes del ordenador.



Figura 37. MAX232



En la Figura 38 se muestra el diseño implementado.

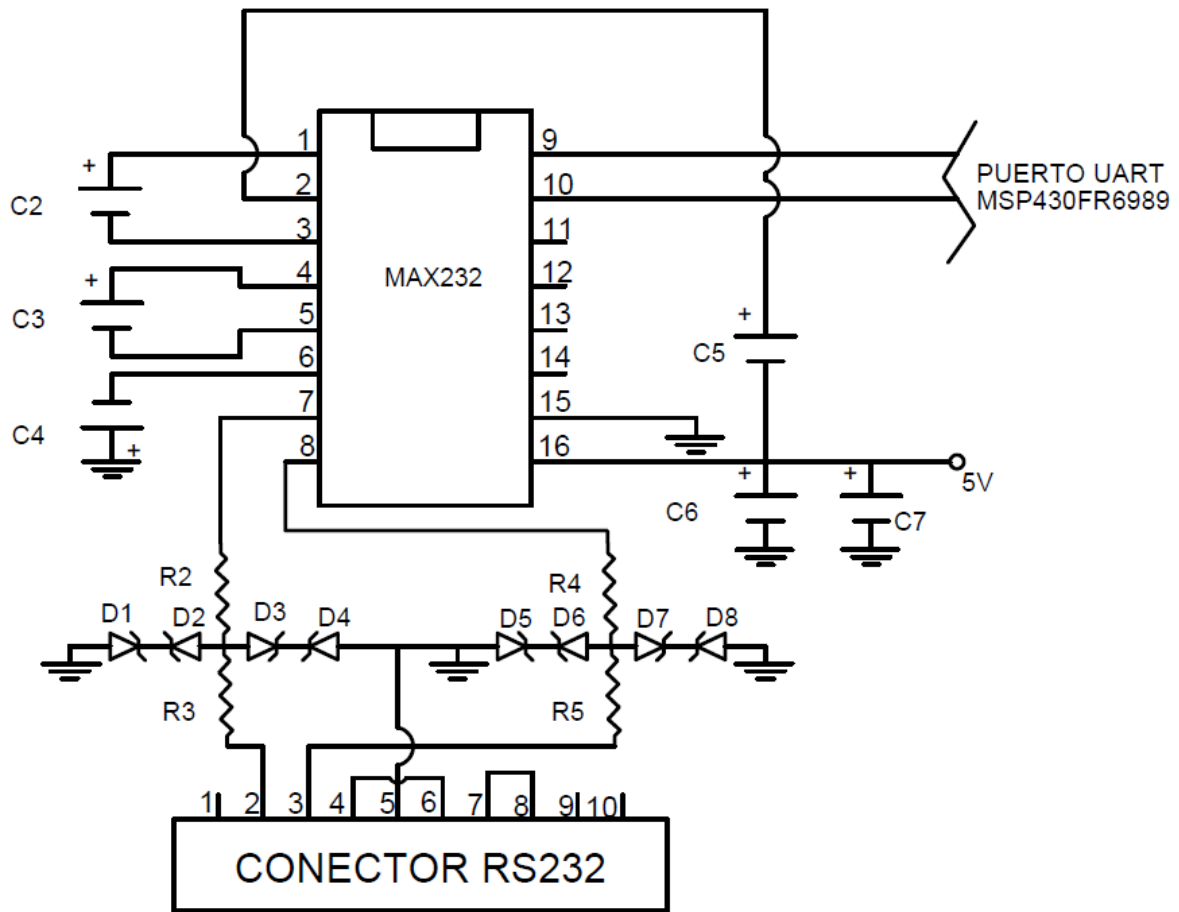


Figura 38. Diseño de la adaptación de niveles para el puerto serie

5.5 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ENSAYO

Ante un diseño de estas características es conveniente realizar un diseño preliminar, o prototipo, reducido para, mediante ensayos en el laboratorio, tener la seguridad de que los cálculos realizados a la hora de diseñar han sido los correctos. En este apartado se narra el diseño de dicho prototipo.

5.5.1 DISEÑO UNIFILAR

Ante un diseño de estas características es conveniente realizar un diseño preliminar, o prototipo, reducido para, mediante ensayos en el laboratorio, tener la seguridad de que los cálculos realizados a la hora de diseñar han sido los correctos. El prototipo que se va a diseñar en este capítulo se muestra en la Figura 39 y cuenta con un puente de medida, un acondicionador y un LaunchPad MSP430FR6989.

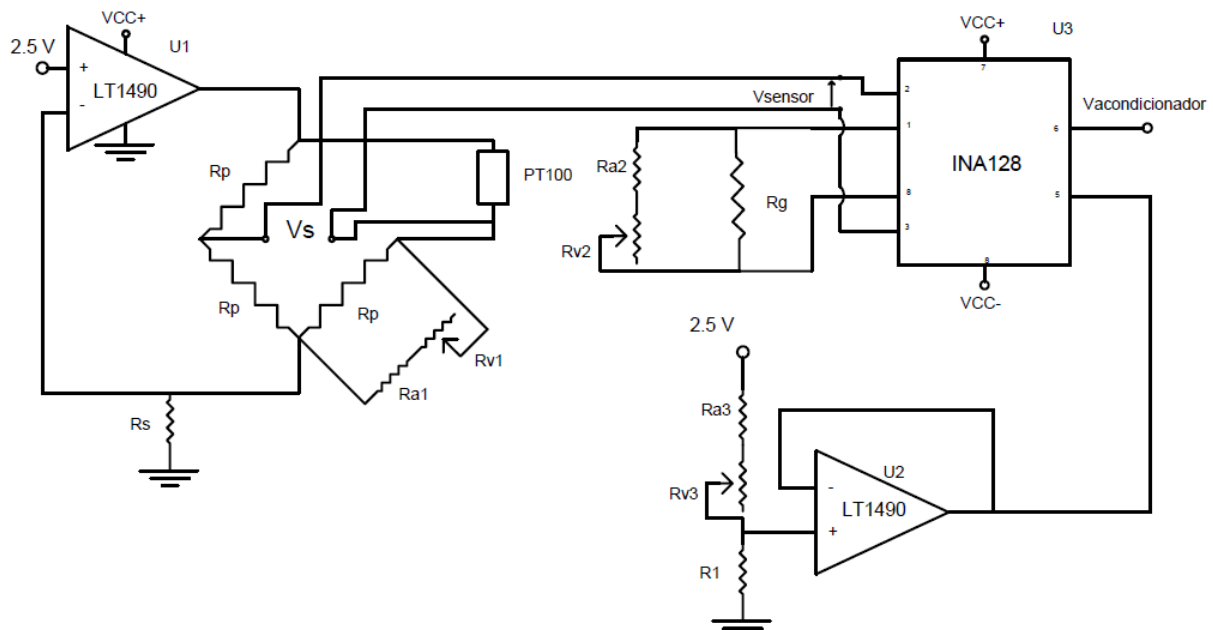


Figura 39. Diseño del prototipo



5.5.2 DISEÑO PCB

Una vez se tiene claro el esquema unifilar se procede a diseñar el PCB que posteriormente se va a fabricar. Al tratarse del prototipo se va a realizar en una cara para que así pueda ser fabricada a mano. El diseño se va a realizar con el software de ORCAD. En la Figura 40 se muestra el esquema unifilar implementado en CAPTURE.

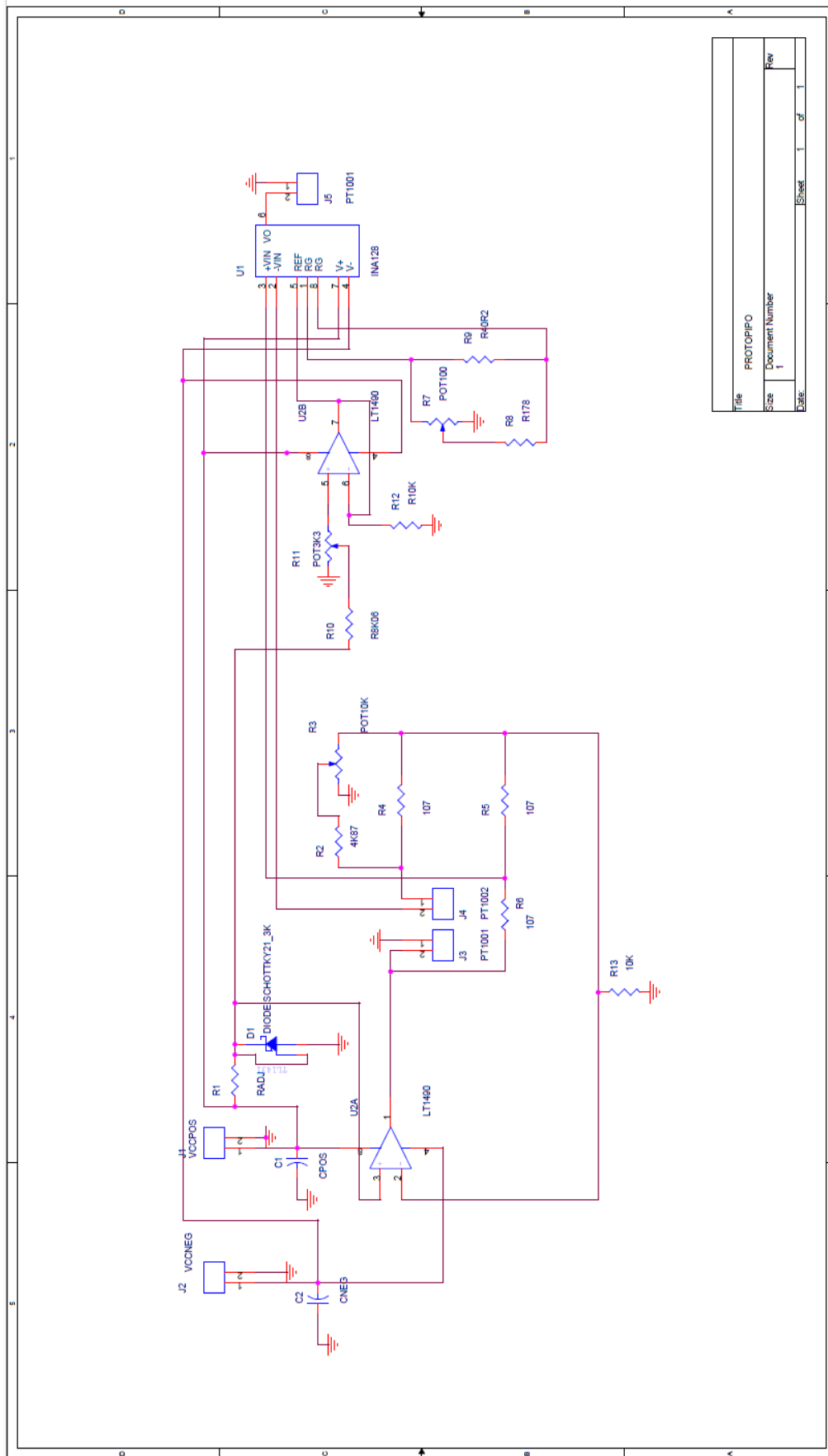


Figura 40. Esquema unifilar del prototipo implementado



Una vez realizado el unifilar, procedemos a diseñar el PCB con el software de ORCAD denominado LAYOUT. A continuación, en la Figura 41 se puede observar una imagen del PCB diseñado.

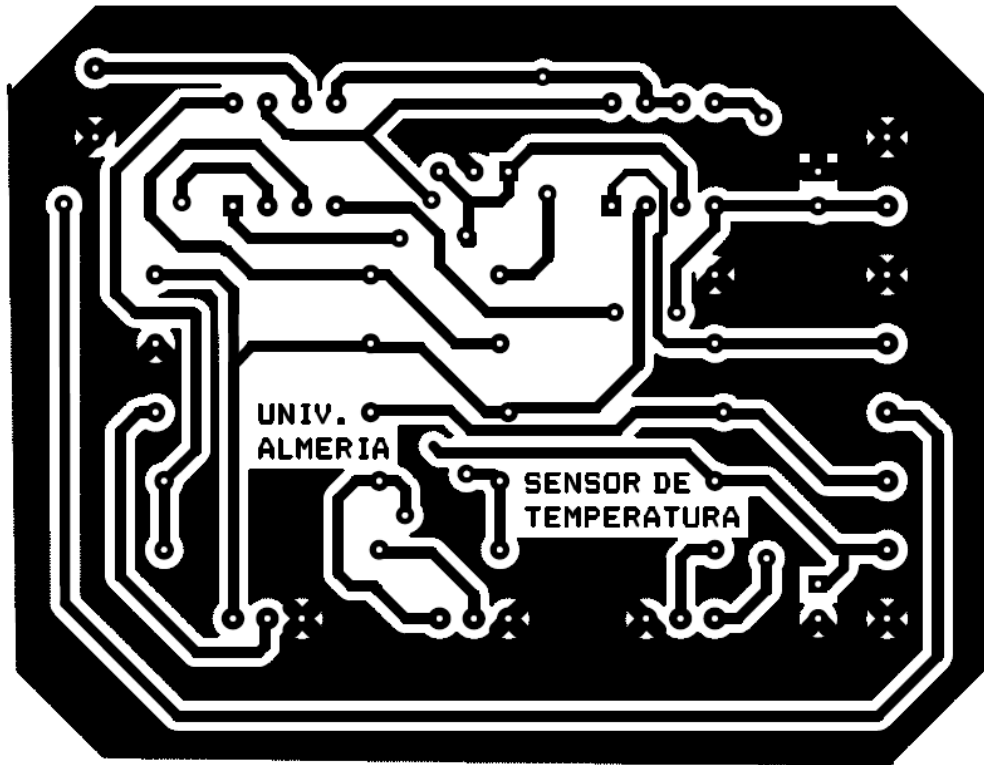


Figura 41. PCB del prototipo

+



5.6 DISEÑO DEL INSTRUMENTO ELECTRÓNICO

Se procede a diseñar el instrumento final. Para la inserción del LaunchPad al PCB se van a emplear los dos conectores macho 20x2 detallados en el apartado de materiales. Para el diseño del instrumento se ha empleado el software de ORCAD detallado en el apartado de métodos.



5.6.1 DISEÑO UNIFILAR

Como se ha descrito anteriormente, el instrumento cuenta con tres puentes de medida y tres acondicionadores de señal, además de la etapa digital anteriormente mencionada. En la Figura 42 se muestra el diseño implementado en AUTOCAD.

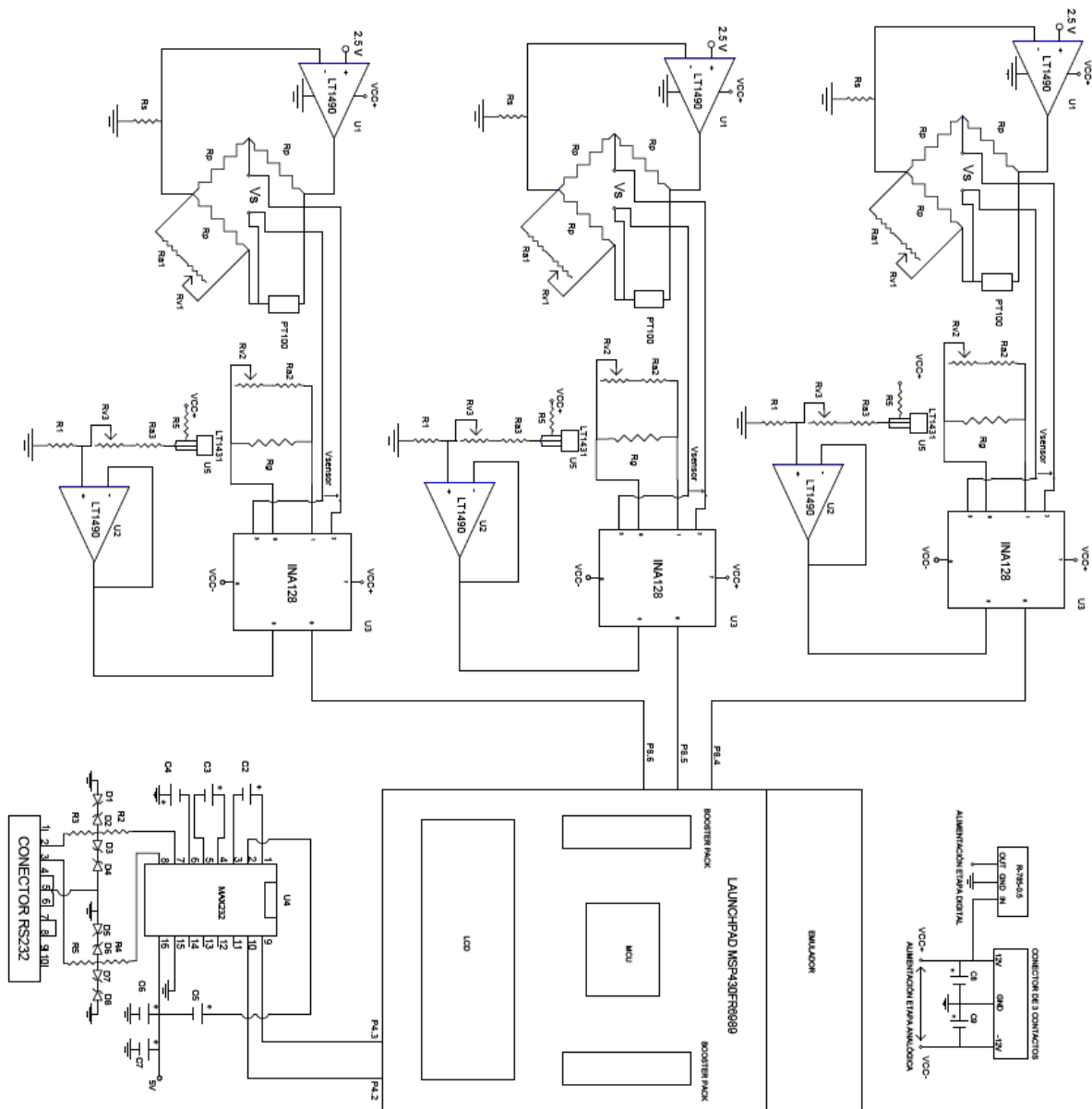


Figura 42. Esquema unifilar del instrumento electrónico



5.6.2 DISEÑO PCB

En esta sección se muestran los diseños realizados con el pack de software de ORCAD para la implementación física del circuito.

En la Figura 43 se puede ver el esquema unifilar diseñado en el programa CAPTURE.

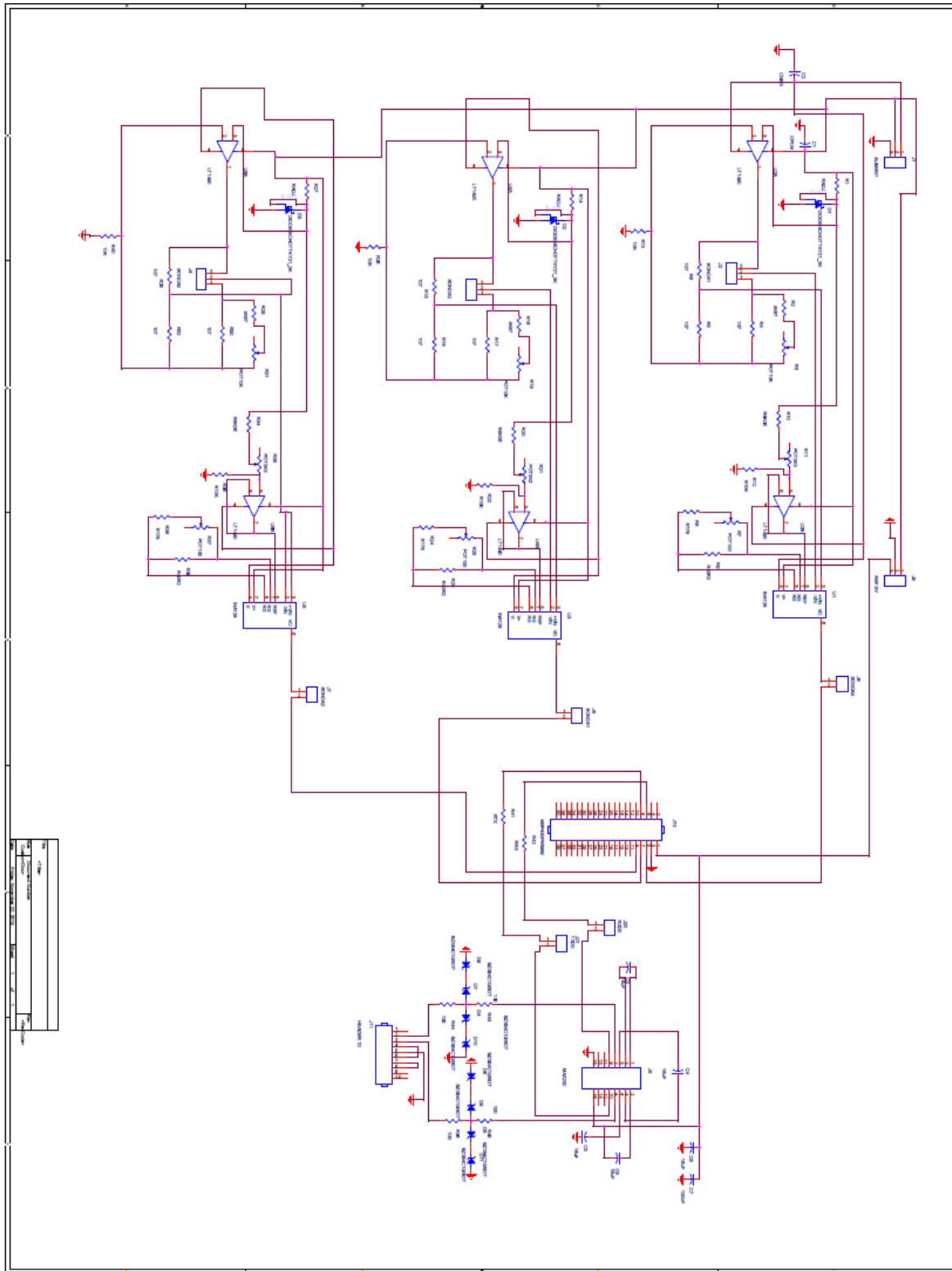


Figura 43. Esquema unifilar Capture del instrumento electrónico



5.6 DISEÑO DEL INSTRUMENTO ELECTRÓNICO

Una vez obtenido el diseño en CAPTURE se procedió a realizar el PCB con la herramienta LAYOUT. En la Figura 44 se muestra dicho PCB.

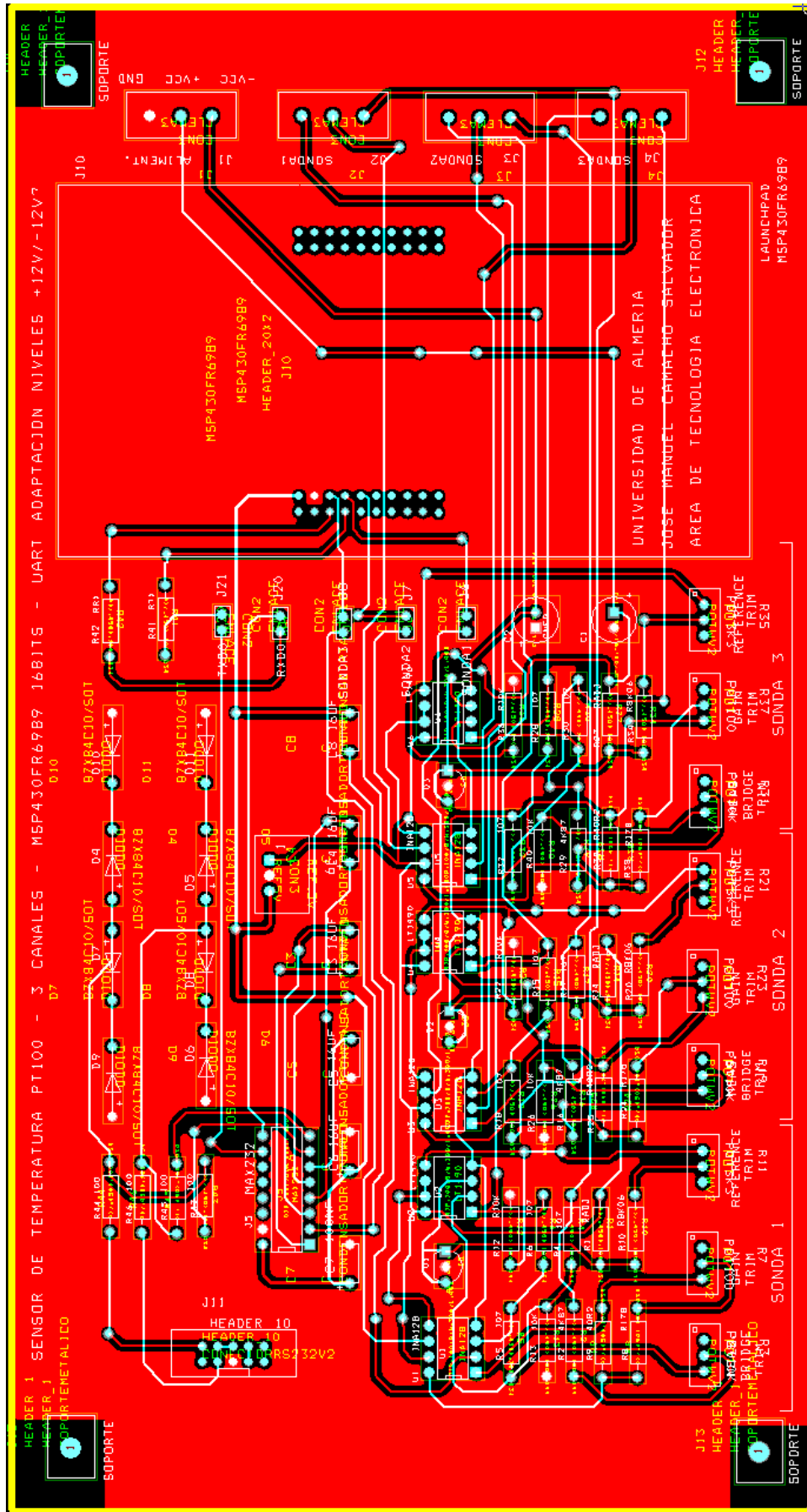


Figura 44. Diseño PCB del instrumento electrónico



5.6 DISEÑO DEL INSTRUMENTO ELECTRÓNICO

Se puede observar que el diseño se ha realizado a doble cara, es decir, pasan pistas tanto por la capa superior como la inferior. El diseño se realizó preservando la ergonomía y la armonía visual. La relación de aspecto es acorde a las tendencias actuales de diseño, se fijó el ancho en base a las dimensiones del LaunchPad, al lado derecho de este se encuentra el terminal de alimentación simétrica con tierra y los tres terminales de inserción de las sondas PT100 a tres hilos. A la izquierda del LaunchPad, en la parte inferior, podemos encontrar nueve potenciómetros de calibración, tres por cada canal de medida, se encuentra ordenados de izquierda a derecha del canal uno al tres, señalizados y acotados. Un poco más arriba se observan treinta resistencias, ordenadas en tandas de cinco. Están colocadas de tal manera que las pistas que entran y salen de ellas no dan vueltas innecesarias ni adquieren ángulos caóticos y nocivos para el funcionamiento del instrumento. Encima de las resistencias se encuentran los circuitos integrados que no son sensibles a incrementar su temperatura durante el funcionamiento. Encima de los integrados nos encontramos el circuito de adaptación de niveles del protocolo UART, gobernado por el dispositivo MAX232. Se observa una notable separación entre esta etapa y la anterior. Esta separación tiene dos motivos principales, por un lado, aliviar la densidad de pistas haciendo de esta separación una suerte de bus de pistas, y, por otro lado, separar la zona de adaptación de niveles, que como se ha descrito anteriormente corresponde a la etapa digital, de la zona analógica. A la izquierda se observa el adaptador RS232 a través del cual se comunicará el instrumento con el PC, colocado de manera deliberada en el extremo opuesto de las inserciones de entrada, es decir, alimentación y sondas de medida. En mitad de la circuitería UART se observa el regulador conmutado R-785-0.5. Se ha ubicado en esa situación, de baja densidad térmica, debido a que es un dispositivo que requiere disipar energía calorífica a través de su carcasa. Se observa también que entre el LaunchPad y el conjunto formado por la etapa analógica y la etapa de adaptación UART se encuentran, por un lado 5 puentes bipolares. Estos puentes se conectan los pines requeridos del MCU y se han diseñado para estar conectados en funcionamiento normal a través de enlaces, en caso de requerir emplear patillas del MCU diferentes a las programadas bastará con extraer el enlace y colocar un jumper hembra-hembra entre el puente y el pin correspondiente del LaunchPad. Encima de los puentes se observan dos resistencias que pertenecen al circuito UART, y debajo de dichos puentes se ubican los dos condensadores de alimentación.



CAPÍTULO 6. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR MSP430FR6989

En este capítulo se describe al lector la programación implementada en el microprocesador MSP430FR6989.

6.1 ESPECIFICACIONES DE PROGRAMACIÓN

En este apartado se enumeran las especificaciones del software implementado.

- Emplear la resolución máxima del ADC incorporado.
- Transformar correctamente el voltaje introducido en el ADC en datos de temperatura válidos.
- El dato final de temperatura se calculará promediando una serie de medidas previas.
- El usuario final del instrumento electrónico deberá poder observar las temperaturas de los tres canales de manera independiente.
- El usuario final del instrumento electrónico deberá poder escoger el canal que quiere visualizar a través de los botones incluidos en el LAUNCHPAD.
- El usuario final del instrumento electrónico deberá poder frenar el refresco de datos en el LCD, manteniendo el valor deseado pulsando un botón de los incluidos en el LAUNCHPAD.
- El LCD debe mostrar los datos de temperatura en grados Celsius, pudiendo cambiar una vista rotativa en la que muestre los valores máximos y mínimos de temperatura registrados desde que se arrancó el dispositivo, pulsando un botón de los incorporados en el LAUNCHPAD.
- El LCD debe mostrar texto en español.
- El instrumento debe leer el puerto RX del UART constantemente. Cuando reciba la instrucción correcta deberá interrumpir el proceso, enviar el dato de temperatura que se haya seleccionado, y regresar al proceso cuando haya concluido la comunicación.

Teniendo claras estas consignas de funcionamiento se procede a desarrollar un programa en CODE COMPOSER STUDIO. En la Figura 45. Diagrama de flujo de la programación implementada.



6.2 SOFTWARE IMPLEMENTADO

Como se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 45, el software que se ha implementado se compone de un programa principal y cuatro subprogramas a los que se accede mediante interrupciones.

El subprograma que se encuentra en el centro de la figura, en realidad representa tres subprogramas de igual estructura. Estos programas son los denominados “modo 1”, “modo 2” y “modo 3”. La estructura de estos modos es la siguiente, cuando se accede a ellos se muestra un texto indicativo en el LCD con el nombre del modo en el que se encuentran. Seguidamente y sin tener que interactuar con el instrumento comienza a mostrar datos de temperatura en el LCD, con una actualización de temperatura cada tres segundos.

Cabe destacar que la temperatura que muestra el LCD es una media aritmética obtenida al realizar n muestras. Este modo funcionará ininterrumpidamente a no ser que el usuario utilice alguno de los dos botones disponibles.

Si el usuario decide pulsar el botón de la izquierda, el LCD dejará de actualizar su valor, quedando fija la temperatura mostrada cuando se pulsó el botón. Para volver a refrescar los datos bastará con volver a pulsar el botón izquierdo.

Por el contrario, si el botón pulsado durante el funcionamiento normal del modo es el derecho, se mostrará en la pantalla la temperatura máxima y la mínima desde que se encendió el dispositivo. Para volver a refrescar los datos bastará con volver a pulsar el botón derecho.

El programa principal inicializa las entradas y salidas de propósito general (GPIO), el convertidor analógico – digital (ADC), el display (LCD) y el puerto serial de comunicaciones (UART). Una vez ha terminado la inicialización, se habilitan las interrupciones y se muestra un texto rotativo en el LCD con instrucciones al usuario sobre como cambiar el modo de funcionamiento.



La interrupción de cambio de modo se produce cuando el usuario pulsa los dos botones del LAUNCHPAD a la vez. Cuando se activa esta interrupción pueden producirse cuatro casos.

1. El programa se encuentra en el programa principal cuando sucede la interrupción. El programa pasa al modo 1.
2. El programa se encuentra en el modo 1 cuando sucede la interrupción. El programa pasa al modo 2.
3. El programa se encuentra en el modo 2 cuando sucede la interrupción. El programa pasa al modo 3.
4. El programa se encuentra en el modo 3 cuando sucede la interrupción. El programa pasa al modo 1.

La interrupción del puerto serie se activa cuando se detecta comunicación por el puerto RX. Cuando esta interrupción se activa, el programa deja de atender el proceso en el que se encuentre para pasar al programa del puerto serie. Una vez finalizado vuelve a retomar el proceso que dejó.

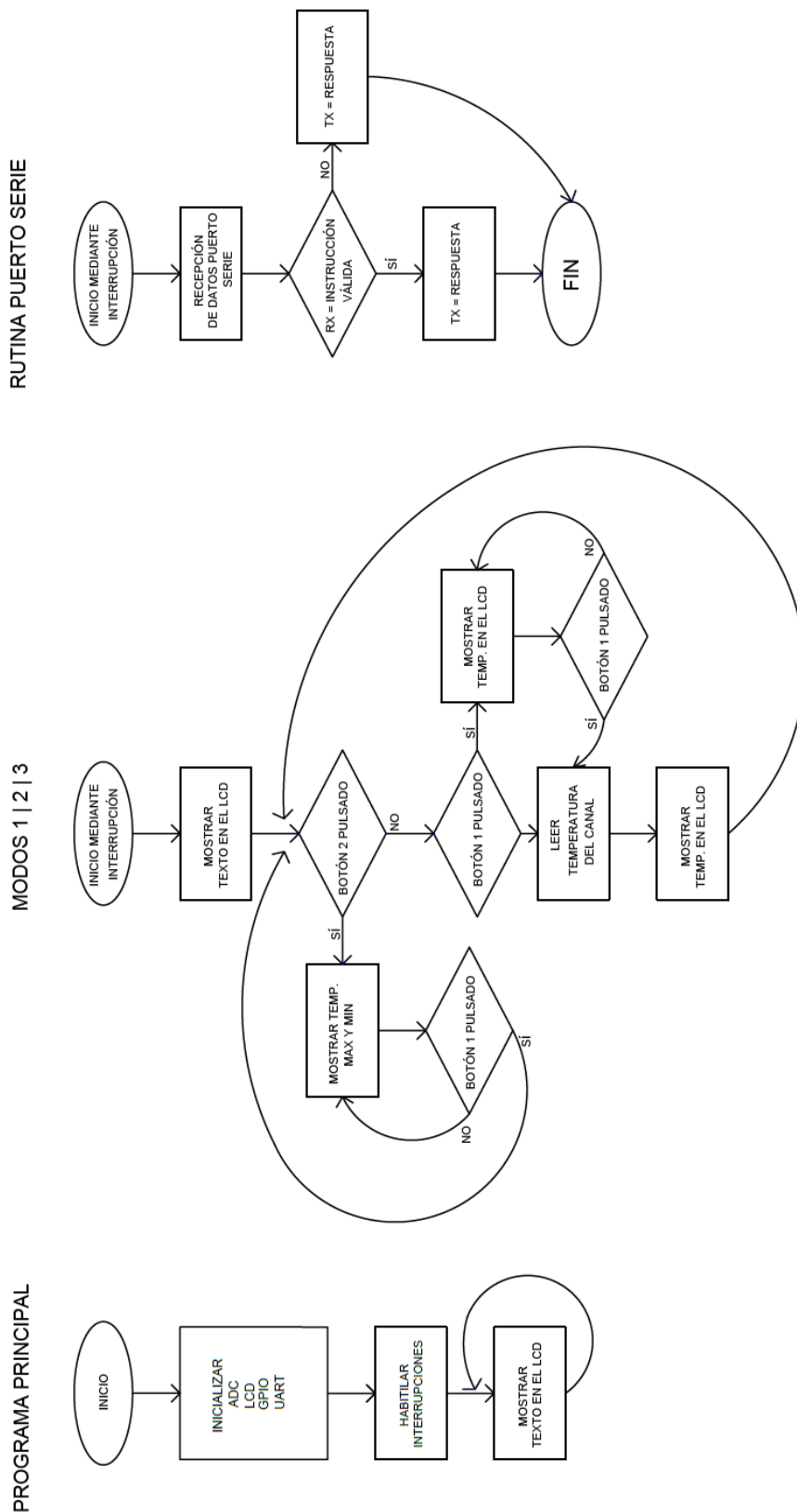


Figura 45. Diagrama de flujo de la programación implementada

CAPÍTULO 7. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los procedimientos y resultados obtenidos en laboratorio.

Para realizar los ensayos que se muestran en este capítulo, ha sido necesario fabricar un simulador PT100 [Figura 46], que consiste en una resistencia variable y dos fijas conectadas a tres hilos. De esta manera se simula el valor de un sensor PT100 en todo el rango de salida diseñado.

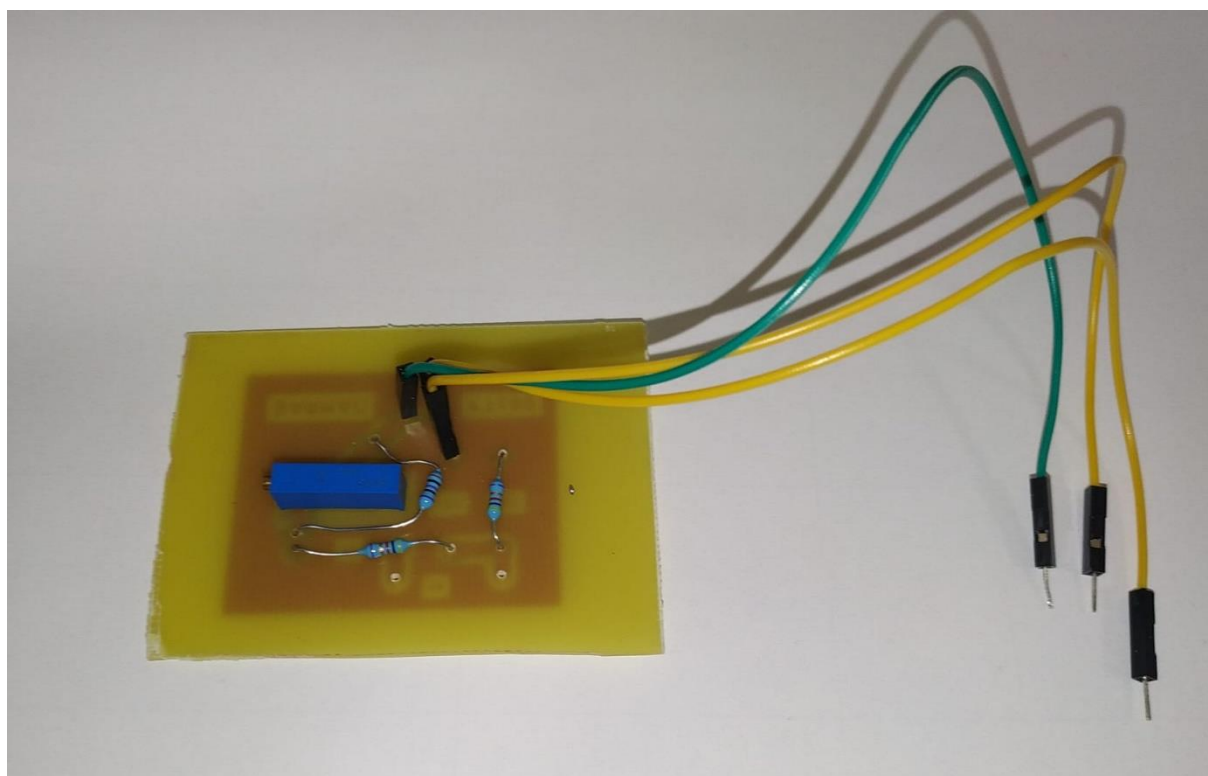


Figura 46. Simulador PT100



7.1 CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO

En primer lugar, se han ajustado las resistencias variables para calibrar el dispositivo, minimizando de esta manera el error de medida que se pueda cometer. La primera resistencia variable que se calibra es la del puente de medida [R_{V1}] [Figura 47].

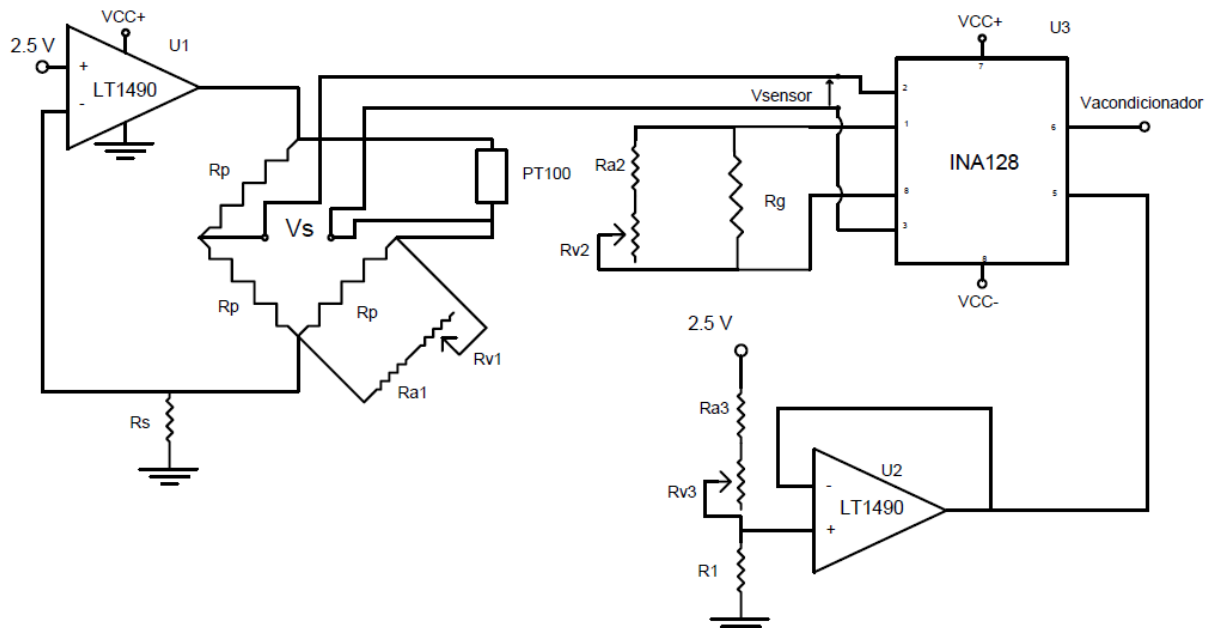


Figura 47. Ajuste del puente de medida

Para este ajuste se ajusta el simulador PT100 para el valor del centro del rango, 105.24Ω , se coloca el multímetro de tal manera que marque el voltaje de salida del puente de Weathstone [V_{SENSOR}] [Figura 39] y se ajusta [R_{V1}] hasta que [V_{SENSOR}] sea cero.

Siguiendo con el mismo valor del simulador PT100, se coloca el multímetro de tal manera que mida el voltaje de salida del INA128 [$V_{\text{ACONDICIONADOR}}$] [Figura 39]. En este caso se ajusta [R_{V3}] [Figura 39] hasta obtener en el multímetro el parámetro [$a = 1295.971 \text{ mV}$] calculado en el apartado de diseño [5.3].

Para el último ajuste, se coloca el simulador PT100 en 100Ω , manteniendo el multímetro en la salida del INA128 [$V_{\text{ACONDICIONADOR}}$] [Figura 39]. Se ajusta [R_{V2}] hasta que [$V_{\text{ACONDICIONADOR}}$] sea 752mV .

De esta manera queda calibrado el prototipo de pruebas.

7.2 RESULTADOS

Tras calibrar el prototipo, se procede a conectarlo con el LAUNCHPAD MSP430FR6989 debidamente programado. Además de la temperatura mostrada por pantalla, se van a tomar muestras del valor de salida del INA128 [$V_{\text{ACONDICIONADOR}}$] [Figura 47]. En el ANEXO DE FOTOGRAFÍAS se recogen las fotografías realizadas durante los ensayos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

RESISTENCIA PT100 [Ω]	VOLTAJE ACONDICIONADO R TEÓRICO [mV]	VOLTAJE ACONDICIONA DOR REAL [mV]	TEMPERATURA TEÓRICA [$^{\circ}\text{C}$]	TEMPERATU RA REAL [$^{\circ}\text{C}$]
92.64	46	54	-19.35	-19.54
96.63	431.5	436	-9.17	-9.07
102	939.4	946	4.55	4.60
105.2	1235	1241	12.72	12.67
105.8	1296	1296	14.43	14.54
112.2	1872	1876	30.85	30.91
118.7	2438	2450	45.57	47.67

Tabla 6.Resultados de laboratorio



Para sacar conclusiones se procede a procesar los datos y calcular los errores absolutos y relativos de medidas. Los valores obtenidos son aplicables a los tres canales de medida. Para cada grupo de valores se calculará error relativo y absoluto máximo, mínimo y promedio. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

RESISTENCIA A PT100	VOLTAJE ACONDICIONADOR TEÓRICO	VOLTAJE ACONDICIONADOR PROTOTIPO	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	TEMPERATURA TEÓRICA		TEMPERATURA REAL		ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO
					°C	°K	°C	°K		
92.94	46	54	8	0.32	-19.35	253.65	-19.54	253.46	0.19	0.27
96.63	431.5	436	4.5	0.18	-9.17	263.83	-9.07	263.93	0.1	0.14
102	939.4	946	6.6	0.264	4.55	277.55	4.6	277.6	0.05	0.07
105.2	1235	1241	6	0.24	12.72	285.72	12.67	285.67	0.05	0.07
105.8	1296	1296	0	0	14.43	287.43	14.54	287.54	0.11	0.15
112.2	1872	1876	4	0.16	30.85	303.85	30.91	303.91	0.06	0.08
118.7	2438	2450	12	0.48	47.47	320.57	47.67	320.67	0.1	0.14
		MAXIMO	12	0.48				MAXIMO	0.19	0.27
		MÍNIMO	0	0				MÍNIMO	0.05	0.07
		PROMEDIO	5.87	0.23				PROMEDIO	0.09	0.13

Tabla 7. Análisis estadístico de los resultados



El acondicionador comete un error absoluto máximo de 12 milivoltios, teniendo en cuenta que el multímetro con el que se han realizado las mediciones es un aparato básico, de escala manual se concluye que el acondicionador cumple satisfactoriamente los objetivos iniciales. El error relativo máximo cometido por el acondicionador es de 0.48%, un porcentaje inferior al 1% y que satisface los objetivos de diseño. El error absoluto promedio es de 5.87 mV, mientras que el error relativo promedio es de 0.23%. El error mínimo que comete el acondicionador es de 0 mV, es el punto en el cual anteriormente se calibró el prototipo [7.1 CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO].

En cuanto a la temperatura observamos un error absoluto máximo de 0.27°C, y un error relativo máximo de 0.19%. El error absoluto medio es de 0.09°C, es decir, inferior al decígrado. Son valores de una precisión considerada y que cumplen los objetivos de diseño. El error en temperatura será incluso más pequeño al usar una sonda PT100 real caracterizada en la programación.

Para obtener una precisión mayor sería necesario recurrir a un ADC de más bits, bien adquiriéndolo por separado, o bien implementado un MCU que lo incorpore. Además, se podría recurrir a materiales de menor tolerancia. Estos cambios aumentarían significativamente el coste del instrumento.

A la vista de los resultados obtenidos podemos validar el diseño realizado, así como la programación implementada.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

Este capítulo final recoge las conclusiones extraídas por el autor de este Trabajo Fin de Grado, conclusiones tanto técnicas como personales.

8.1 VALORACIÓN DEL TRABAJO TÉCNICO

Para valorar adecuadamente este trabajo técnico hay que remontarse a sus inicios. Para ello es conveniente revisar los objetivos que se marcaron inicialmente.

Tras revisarlos, se puede concluir que el instrumento diseñado cumple los objetivos preestablecidos. Además, los resultados extraídos en las pruebas de laboratorio [7.2 RESULTADOS].

8.2 MEJORAS EN EL FUTURO

En este apartado se exponen las mejoras de futuro que se pueden implementar en el instrumento diseñado.

Durante la lectura de esta memoria, se hace referencia a las posibilidades de expansión de este instrumento. Resulta muy interesante la posibilidad de implementar una estación meteorológica que mida valores de temperatura, humedad, velocidad del viento, y dirección del viento. Aprovechando los tres puentes de medida para PT100 se implementaría un sistema de medición de velocidad y dirección del viento basado en sensores RTD [31]. Este sistema consiste en colocar los sensores RTD dentro de un émbolo caliente y, analizando como varía la distribución térmica a lo largo de los distintos transductores, calcular la velocidad y dirección del viento. Este sistema es el que implementa el vehículo no tripulado ROVER MSL en su exploración por el Planeta Rojo.




Otra mejora que se puede realizar es emplear materiales de fabricación SMD, reduciendo el tamaño de diseño. Además, se podría montar el microcontrolador sin necesidad de utilizar el LAUNCHPAD.

8.3 VALORACIÓN PERSONAL

La realización de este Trabajo Fin de Grado ha supuesto un salto cualitativo en mi desempeño en esta maravillosa profesión que es la de Ingeniero/a. Durante el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial se dota al alumno/a de los conocimientos teóricos y las competencias necesarias para el desempeño de la profesión. Además, con las numerosas prácticas se incrementa la destreza del alumno/a al aplicar sendos conocimientos. Pero no es hasta que el/la alumno/a se enfrenta a un problema de diseño “real” cuando se pone en tela de juicio todo lo aprendido. Es el momento de plasmar lo que se ha aprendido. Durante el transcurso de este Trabajo Fin de Grado han sido numerosos los inconvenientes surgidos, y se han resuelto con mayor o menor rapidez dependiendo del grado de dificultad encontrado. Esto es, a mi entender, ser Ingeniero/a. Un/a Ingeniero/a es una persona dotada de los conocimientos y habilidades necesarios para resolver problemas.

Por todo lo descrito en este apartado me siento plenamente satisfecho con el trabajo realizado y plenamente agradecido con las personas que lo han hecho posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Taking Temperature Measurements with RTDs: How-To Guide - National Instruments. (2019). Retrieved 28 November 2019, from <http://www.ni.com/tutorial/7115/es/>
- [2] Objetivos y Competencias - Grado en Ingeniería Electrónica Industrial (Plan 2010) - Universidad de Almería. (2019). Retrieved 11 November 2019, from <http://cms.ual.es/UAL/estudios/grados/objetivos/GRADO4310>
- [3] Rodríguez, L. (2014). *PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA II DIAGRAMA DE GANT* [Ebook] (1st ed.). Retrieved from <https://www.enp.edu.uy/>
- [4] TEXAS INSTRUMENTS. from <http://www.ti.com/>
- [5] INSTRUMENTS, T. (2015). MSP430FR6989 LaunchPad  Development Kit. Datasheet.
- [6] DIL SOCKETS. (2019). [PDF].
- [7] RS PRO. "5mm Pitch Low Profile Terminal Block". Datasheet.
- [8] MOLEX. "KK 100 HEADER ASSY FLAT VERTICAL BREAKAWAY". Datasheet.
- [9] RS PRO. "Female Straight Black Closed Top, Handle Pull 2 Way 1 Row 2.54mm Pitch". Datasheet.
- [10] RS PRO. "2.54mm Pitch 20 Way 2 Row Straight PCB Header, Solder Termination". Datasheet.
- [11] TYCO ELECTRONICS. "Precision Metal Film Fixed Resistors". Datasheet.
- [12] BOURNS. "3296 - 3/8" Square Trimpot® Trimming Potentiometer". Datasheet.
- [13] PANASONIC. "Aluminum Electrolytic Capacitors/ NHG". Datasheet.
- [14] MURATA. "MLCC radial lead type with epoxy coat (RDE Series)". Datasheet.
- [15] AVX. "Dipped Radial Capacitors". Datasheet.
- [16] NEXPERIA. "BZX79 series". Datasheet.
- [17] LINEAR TECHNOLOGY. "LT1490A/LT1491A Dual/Quad Over-The-Top Micropower Rail-to-Rail Input and Output Op Amps". Datasheet.



- [18] TEXAS INSTRUMENTS. "TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier". Datasheet.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. "INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers". Datasheet.
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. "MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers". Datasheet.
- [21] ST LIFE. AUGMENTED. "TL1431 Programmable Voltage Reference". Datasheet.
- [22] INNOLINE. "R-78-0.5". Datasheet.
- [23] MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico. from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [24] ORCAD. from <https://www.orcad.com/>
- [25] CODE COMPOSER STUDIO. from <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- [26] TEXAS INSTRUMENTS. "MSP430FR698x (1), MSP430FR598x(1) Mixed-Signal Microcontrollers". Datasheet
- [27] AUTOCAD. from <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview>.
- [28] MICROSOFT WORD. from <https://products.office.com/es-es/word>
- [29] JLCPC. from <https://jlcpcb.com/>
- [30] Fernández, M., & Gázquez, J. (2017). TEMA 4. PUENTES DE MEDIDA [PDF]. Retrieved from https://aulavirtual.ual.es/bbcswebdav/pid-675997-dt-content-rid-1810283_1/courses/COURSE_0000012123/TEMA_4_2_puentes_MFR%281%29.pdf
- [31] M. Dominguez, V. Jimenez, J. Ricart, L. Kowalski, J. Torres, S. Navarro, J. Romeral L. Castañer ' A hot film anemometer for the Martian atmosphere, Planetary and Space Science, 56(2008), pp. 1169-1179.

ANEXO DE FOTOGRAFÍAS

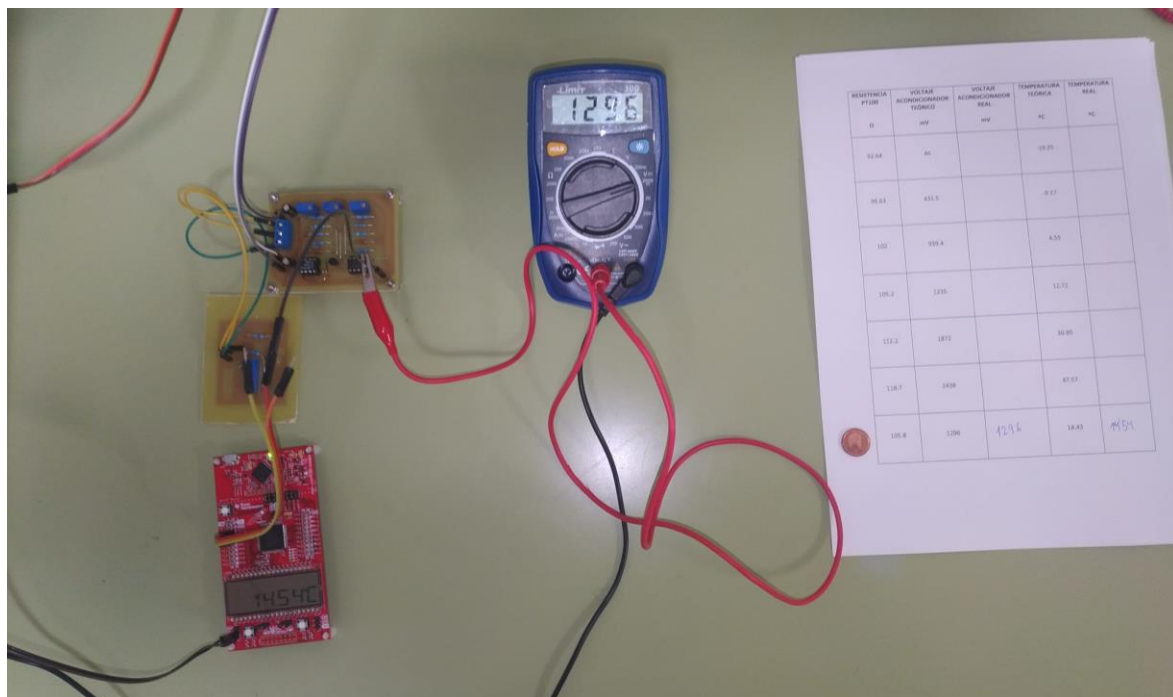


Figura 48. Ensayo a 105.

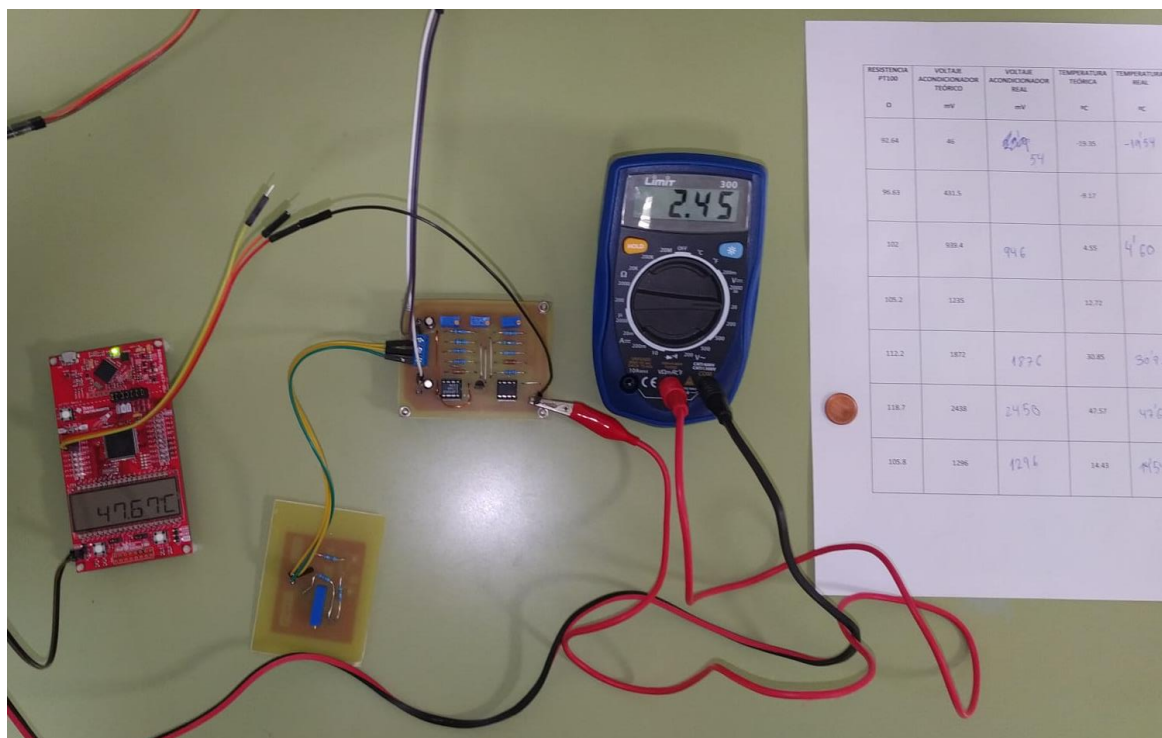


Figura 49. Ensayo a 118.7Ω

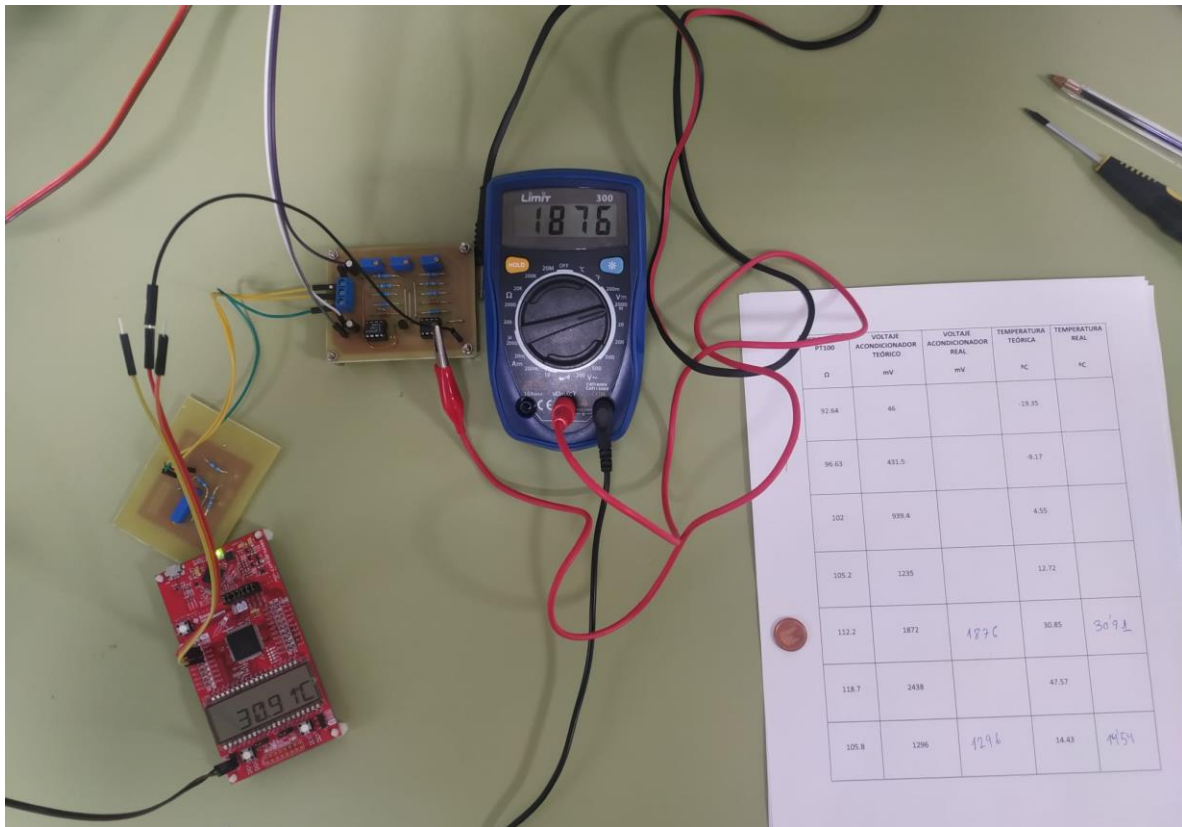


Figura 50. Ensayo a 112.2Ω

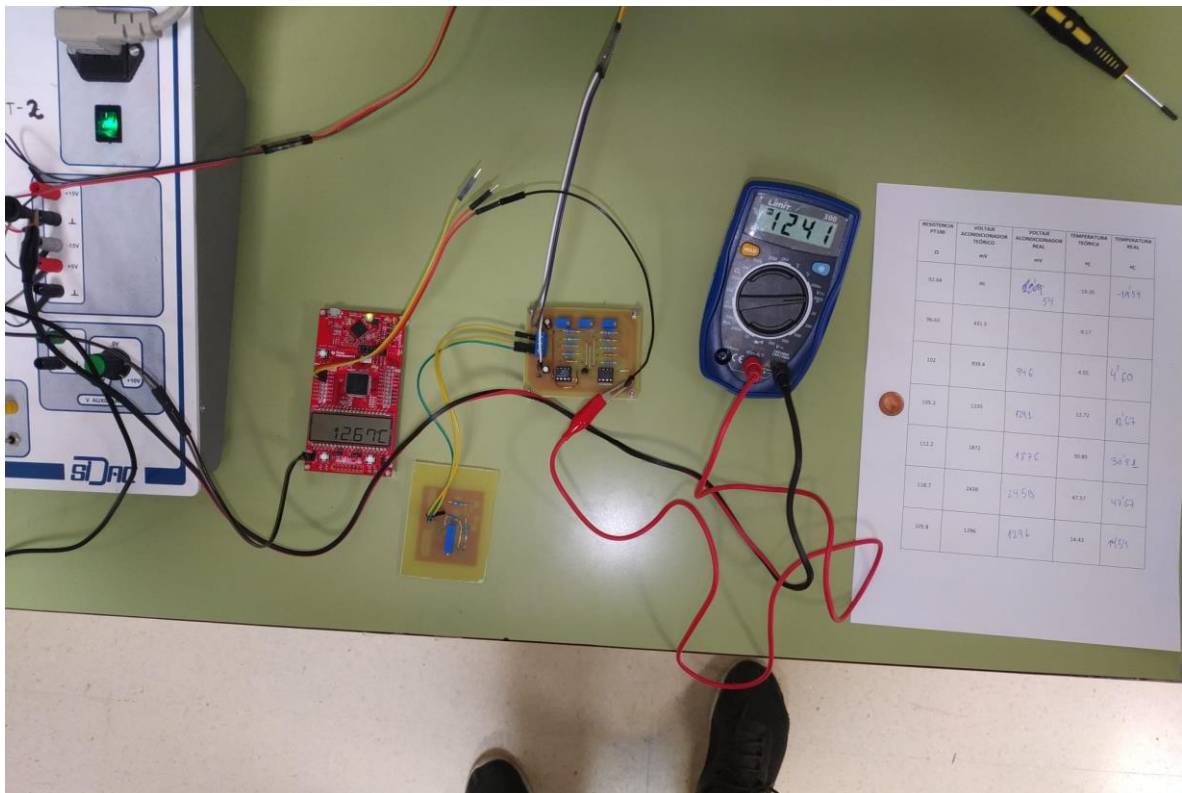


Figura 51. Ensayo a 105.2Ω

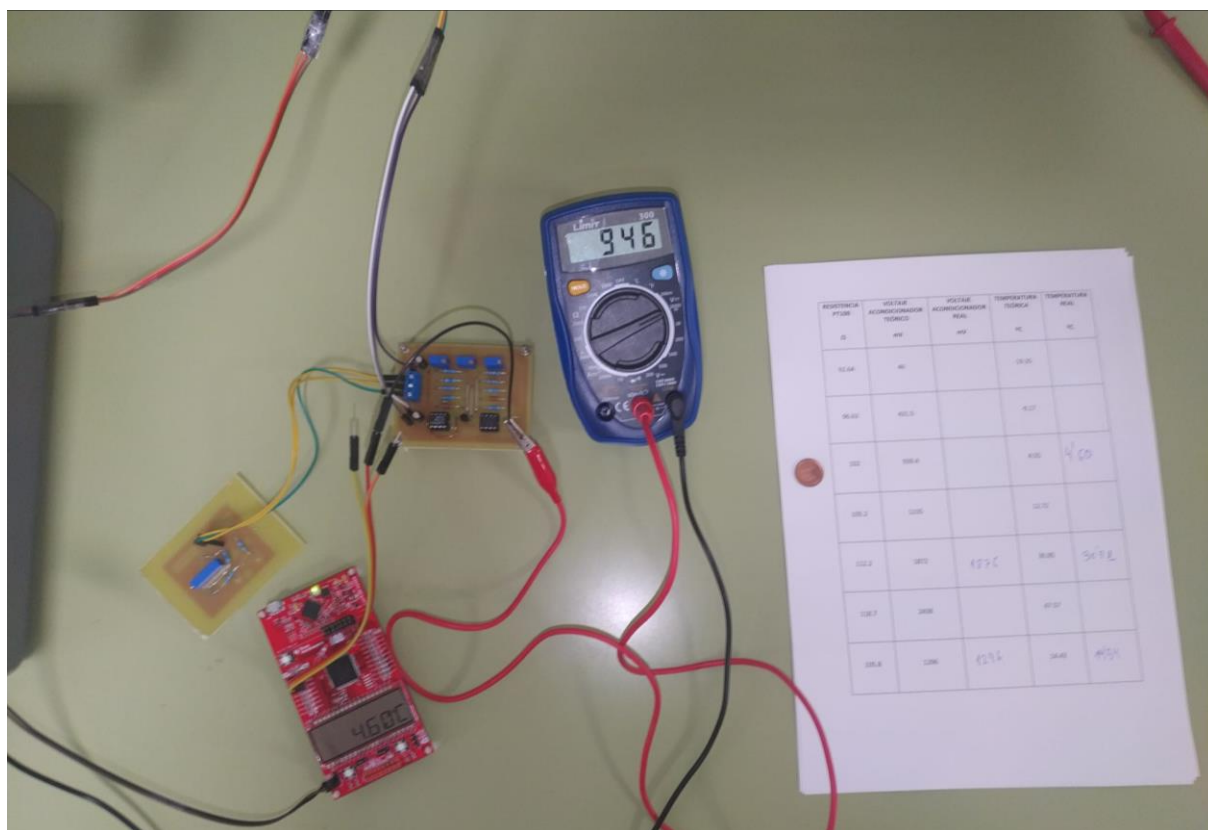


Figura 52. Ensayo a 102Ω

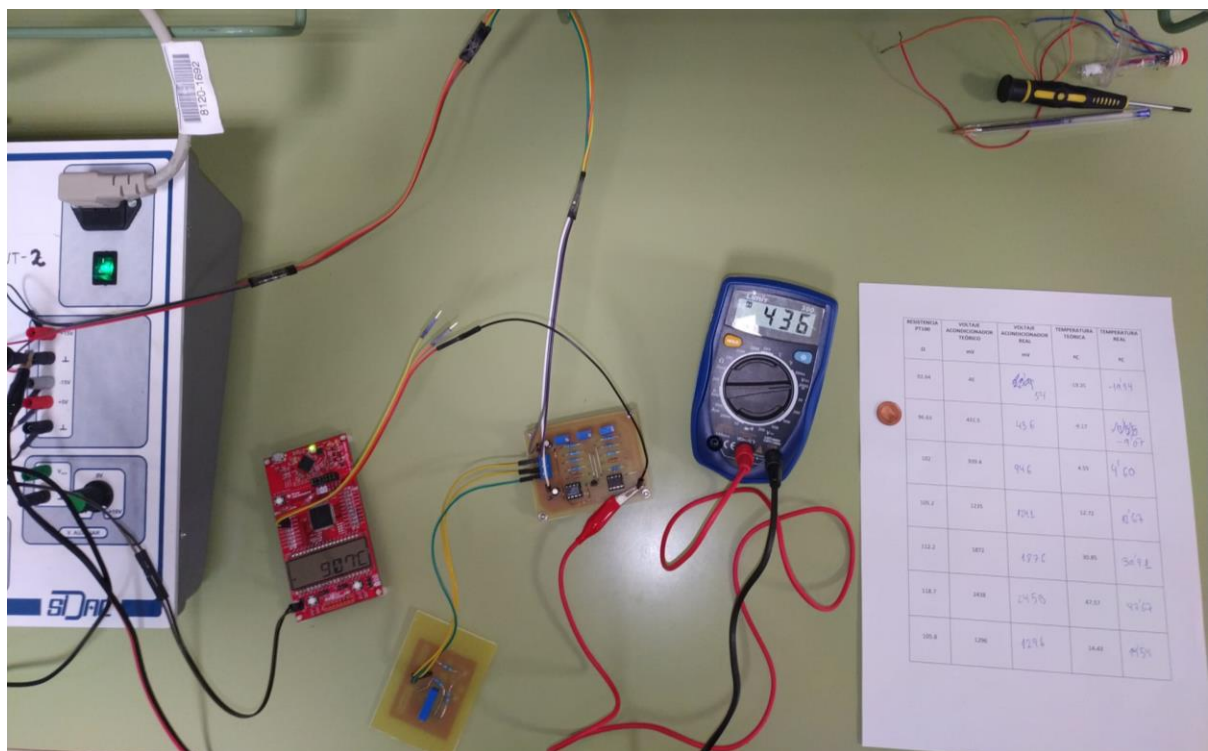


Figura 53. Ensayo a 96.63Ω

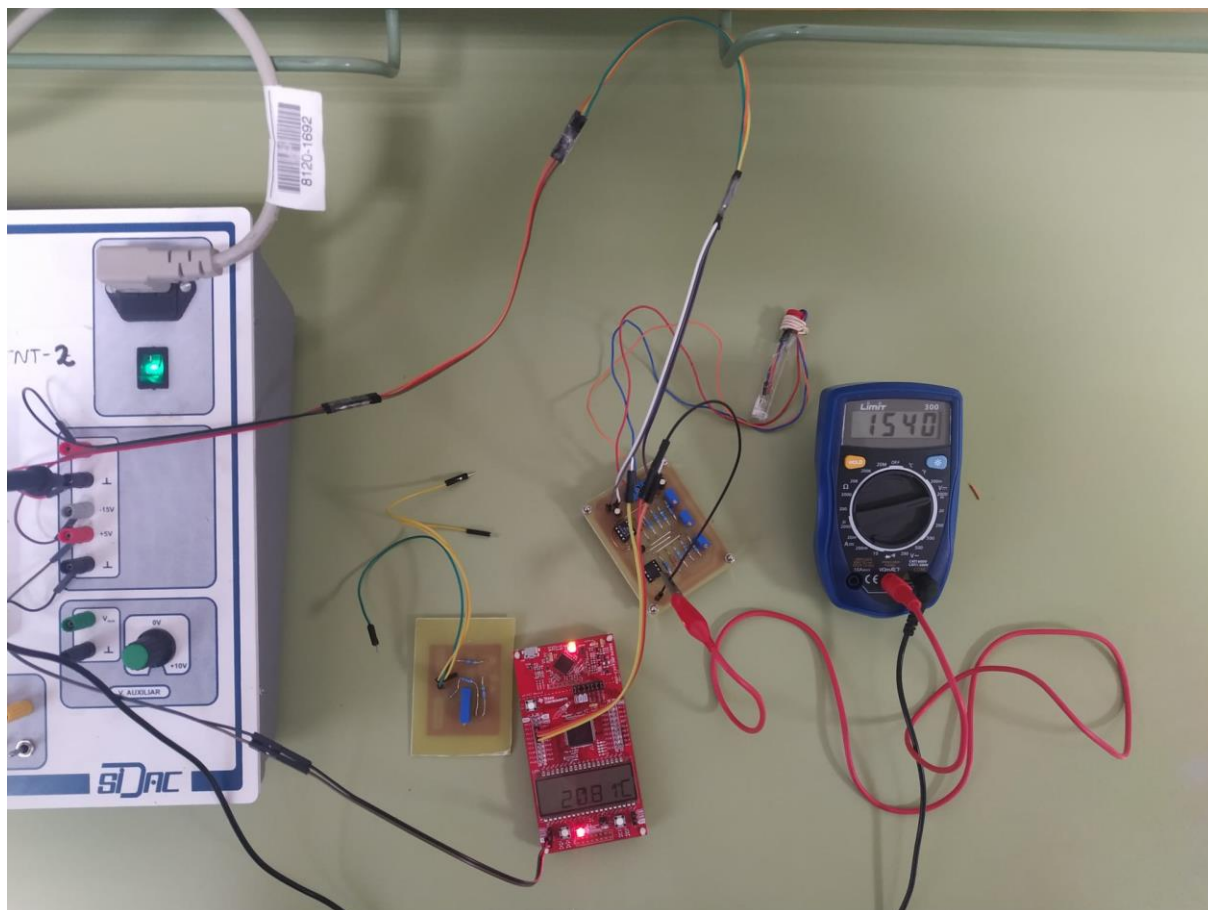


Figura 54. Ensayo con PT100 a temperatura ambiente