



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**INSTRUMENTACIÓN DE UN SENSOR RESISTIVO DE TEMPERATURA PARA APLICACIONES EN
APARATOS CIENTÍFICOS**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Edwin Allán Lara Gómez

DIRECTOR DE TESIS

José de Jesús Agustín Flores Cuautle

CODIRECTOR DE TESIS

Gemima Lara Hernández

Fecha: abril 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, **26/marzo/2025**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. EDWIN ALLAN LARA GÓMEZ

Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

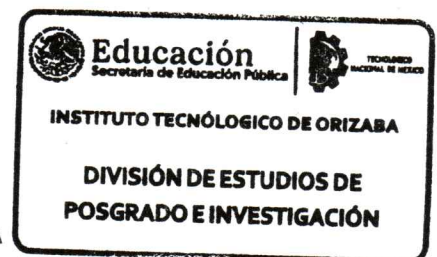
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**" INSTRUMENTACIÓN DE UN SENSOR RESISTIVO DE TEMPERATURA PARA
APLICACIONES EN APARATOS CIENTÍFICOS".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, 3/marzo/2025

Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

EDWIN ALLAN LARA GÓMEZ

La cual lleva el título de:

**"INSTRUMENTACIÓN DE UN SENSOR RESISTIVO DE TEMPERATURA PARA APLICACIONES EN
APARATOS CIENTÍFICOS"**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE

FIRMA

SECRETARIO: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

FIRMA

VOCAL: DRA. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. GEMIMA LARA HERNÁNDEZ

FIRMA

TA-09-18



AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar esta sección a quienes, de una u otra manera, contribuyeron en la realización de esta tesis. Al Dr. Carlos Manuel Hernández Mejía y la Dra. Margarita Reyes Sierra, a quienes les tengo especial cariño y respeto por su gran labor como docentes en mi formación como ingeniero y que por ellos tuve la primera idea de realizar un posgrado y que al día de este escrito ese sueño se está haciendo realidad, gracias por ser excelentes en su labor docente.

A mis padres Magdalena Gómez Acosta y Eleuterio Lara Portilla por creer en mí, por nunca dejar de animarme a realizar más allá de lo que yo consideraba mis límites, que gracias a ellos soy la persona que me define en carácter, educación y carisma. Mis padres son el pilar fundamental para lograr esta meta, por otro lado, otro gran pilar es mi hermana Leslie Nayeli Lara Gómez, que también es una inspiración y un honor ser su hermano menor, fungió como madre en una etapa de mi vida, se convirtió más que mi hermana, y también por ella y sus logros me inspiró a aspirar más que una licenciatura.

Al Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle por ser mi asesor y apoyarme en las dudas presentadas en la presente investigación, gracias por su paciencia que a pesar de mis dudas recurrentes siempre estuvo presente y buscó los medios para resolver las mismas. Es un honor tenerlo de asesor, su compromiso y pasión por el conocimiento es una fuente de inspiración, no hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por su guía, dedicación por la confianza. También a su esposa la Dra. Gemina Lara Hernández que fungió como co-asesora en esta tesis quien con la misma entrega y generosidad me acompañó en este proceso. Ambos han sido más que mentores para mí, son un ejemplo de dedicación y amor por la enseñanza, la preparación y el sacrificio que han realizado en su trayectoria es digna de admirar. También fuera de circunstancias académicas agradezco la confianza para convivir y compartir su vida personal, me siento afortunado de haber contado con su orientación y me llevaré las lecciones y anécdotas que me han brindado.

Al Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin Coordinador Académico del posgrado en Electrónica, quien siempre a todos los estudiantes del programa brindo su mano y ayuda independientemente de la circunstancia, personalmente gracias por escucharme en mis momentos de incertidumbre, me guio me brindó la ayuda necesaria y me canalizó con la ayuda profesional. Por otra parte, también es una persona admirable que con humildad canaliza conocimiento y es algo destacable que no cualquier docente más si hablamos en la ingeniería, se requieren más como usted con esa pasión y humildad por lo que tanto lo destaca.

A mis compañeros de Maestría Aramis, Bryan y Emmanuel que siempre me sacaron de un apuro con haciéndome reír e hicieron muchos momentos amenos. Me brindaron una mano y mucho aprendizaje, en ocasiones uno que otro trago amargo, pero parte del estrés de las materias, agradezco su paciencia con mi mal genio.

A mi mejor amiga María de Jesús Verdín Cordova , que aunque la distancia nos separe, nada ha cambiado entre nosotras. A pesar de los kilómetros, sigues siendo mi apoyo incondicional, mi confidente y la persona que siempre encuentra la manera de hacerme sonreír. La verdadera amistad no entiende de fronteras, y la nuestra es prueba de ello.

Gracias por estar presente, incluso desde lejos. Por cada mensaje, cada llamada, cada palabra de aliento en los momentos difíciles. Por demostrarme que la distancia no significa olvido, sino una nueva forma de fortalecer nuestra amistad.

Te extraño siempre, pero saber que cuento contigo hace que la distancia pese un poco menos. Este logro también es tuyo, porque sin tu apoyo y cariño, el camino habría sido mucho más difícil.

A mis otros compañeros y amigos que se convirtieron en mi segunda familia. Para muchas personas que nos encontramos en un lugar que no conocemos, que no tienes con quien compartir tus malos momentos, siempre encontramos esas amistades que se vuelven un pilar fundamental y que hoy en día también es por ellos que estoy terminando este sueño. Este agradecimiento un tanto especial es para: Bryan Vallejo Sánchez, compañero como tal de mi generación, pero que hoy en día lo considero mi mejor amigo, gracias por orientarme en todos mis problemas, por escucharme, y aunque muchas veces yo no fungí como ese amigo siempre tendrás alguien que te apoye esté donde esté; también para José Francisco Romero Lezama, compañero de laboratorio que casualmente también asesorado del Dr. Agustín, todo un personaje mi amigo y que me ayudó mucho en los procesos térmicos y con algunos programas, así como materias que se nos dificultaban, sigue siendo leal a tus amistades que eso te traerá todo lo bueno, gracias a ti conocí a otras dos personas más; a Elizabeth Huerta Flores quien siempre tiene anécdotas divertidas que contar, y aunque muchas veces no tiene filtros para decir tus verdades, muchas veces un golpe de realidad es lo que necesitamos, gracias por el apoyo que muchas veces me brindaste, las risas y las aventuras que viví contigo en este corto tiempo; también gracias Guadalupe Xolotzin Abad Galindo, eres una persona increíble que al principio de nuestra amistad no noté pero conforme nuestra amistad creció me di cuenta de lo especial que eras y lo necesario que eras para mí, gracias por tantos momentos increíbles a mi lado y que espero podamos seguir compartiendo. En fin, ellos cuatro se han convertido en una segunda familia que sin importar la circunstancia van a estar que no importa cual sea el problema, tienen una solución, que te animan a decir “si hazlo” cuando no tienes el valor o que en su defecto te detienen de hacer algo que pueda meterte en problemas, gracias de nuevo por estar ahí y espero que nuestra amistad perdure los años que la vida nos permita.

Contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
CAPITULO 1. GENERALIDADES	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PROBLEMÁTICA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 HIPÓTESIS	12
1.5 OBJETIVO GENERAL	13
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES	13
1.8 VINCULACION O IMPACTO SOCIAL	13
CAPITULO 2. ESTADOS DE LA TÉCNICA Y CAMPO	15
2.1 ESTADO DEL ARTE	15
2.2 ESTADO DEL CAMPO	20
CAPITULO 3. MARCO TEORICO	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.1 TERMISTOR TIPO INDUSTRIAL vs. SENSOR DE TEMPERATURA DIGITAL	30
3.2 ACONDICIONAMIENTO	31
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	33
4.1 DISEÑO DE PLACA DEL CI MAX31865	33
4.2 TECNICAS DE PLANCHADO DE PLACAS	34
4.3 DISEÑO Y DESARROLLO DE MAX31865EVKIT	39
4.4 DESARROLLO DE PLACAS DEL SENSOR DIGITAL TMP75 Y TMP125	46
4.5 COMUNICACIÓN DE ARDUINO Y ESP32 CON TMP75 Y TMP125	48
4.6 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	49

CAPITULO 5. RESULTADOS	51
5.1 MEDICIONES.....	51
5.2 COMPARACIÓN DE COMPLEMENTOS: KIT DE EVALUACIÓN DE MAX31865 vs. ARDUINO EN RESOLUCIÓN DE 8 BITS	55
5.3 CALIBRACIÓN DEL PT100.....	56
5.3.1 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL PT100.....	58
5.4 PRUEBAS CON EL ESP32	61
CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS.....	68
Apéndice 1.....	71
Lista de componentes para la placa de acondicionamiento	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la instrumentación necesaria para medir un termistor.....	23
Figura 2. Diagrama a bloques del puente de Wheatstone.....	24
Figura 3. Diagrama a bloques de un ADC.....	26
Figura 4. A) Vista principal y B) Vista trasera del Diseño propuesto del Circuito impreso de MAX 31865 Ev Kit.....	33
Figura 5. Diseño de placa del PCB que no incluye la parte que convierte USB a PIN Master.....	34
Figura 6. Transferencia del circuito por método de plancha con líneas de 0.4 mm de ancho de pista.	35
Figura 7. Transferencia del circuito por método de plancha con líneas de ancho de pista de 0.4 mm (placa del lado izquierdo) y 0.3 mm (placa del lado derecho).	35
Figura 8. Defectos presentados durante el planchado.	36
Figura 9. Defectos presentados durante el planchado en el cobre líneas 0.3mm.....	36
Figura 10. Defectos presentados en la transferencia del diseño al PCB, líneas 0.3 mm.	37
Figura 11. Acercamiento defectos presentados en la transferencia al PCB.	37
Figura 12. Efectos presentados en la muestra por falta de tiempo de exposición en ácido.	38
Figura 13. A) Vista superior de placa y B) vista inferior de MAX31865EVKIT.	38

Figura 14. MAX31865 EVKIT solo una cara.....	39
Figura 15. Fases de realización de PCB MAX31865 EVKIT.....	40
Figura 16. Problemas con el boardoutline en el programa Ultiboard.	40
Figura 17. Diseño del MAX31865 a doble cara.	41
Figura 18. MAX31865 EV KIT Esquemático parte 1 de 3.....	42
Figura 19. MAX31865 EV KIT esquemático parte 2 de 3.....	42
Figura 20. MAX31865 EV KIT Esquemático parte 3 de 3.....	43
Figura 21. Diseño en PROTEUS a dos caras.....	43
Figura 22. A) Vista superior y B) vista inferior de la PCB sin componentes del MAX31865EVKIT. ...	44
Figura 23. A) Vista superior y B) vista inferior del MAX31865EVKIT con componentes ensamblados.	45
Figura 24. A) Diseño en PROTEUS del sensor digital y B) PCB del TM125.....	46
Figura 25. A) Diseño en PROTEUS del sensor digital y B) PCB del TM75.....	46
Figura 26. PCB's de los sensores digitales A) TMP125 y B) TMP75, respectivamente.....	47
Figura 27. Mediciones con los cuatro dispositivos.....	50
Figura 28. Comparación de sensores TMP125 Y 75 VS. Termómetro TASI TA612c.....	52
Figura 29. Comparación de sensores TMP75 y TMP125 con termómetro TA612c en los primeros 15 segundos de medición.	53
Figura 30. Comparación de sensores TMP75, TMP125 con Termómetro TA612c durante 10 minutos.	54
Figura 31. Temperatura de referencia con termómetro TA612C.	57
Figura 32. Resistencia de PT100.....	57
Figura 33. Ajuste de la señal de la temperatura de referencia vs. la señal de la resistencia del PT100 (cuadros solidos de color negro) para la obtención de variables A y B de la Ec.3.	59
Figura 34. Ajuste de la señal de resistencia del PT100 (cuadros solidos de color negro) vs. la temperatura de referencia para la obtención de variables A y B de la Ec.3.....	60
Figura 35. Diagrama de pasos realizados en el código para la comunicación, lectura de datos con Arduino DUE, TMP75 y el cambio de resolución.	61
Figura 36. Esquema de colocación de sensores PT100 y TMP75, selección de convertidores analógico-digital (Arduino DUE o ESP32), cambio de resolución y registros de datos experimentales de temperatura.	62

Figura 37. Temperatura obtenida con Arduino DUE leídas con diferentes resoluciones y TMP75 con una resolución de 8 bits.	63
Figura 38. Temperatura obtenida con ESP32 con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 8 bits.	63
Figura 39. Temperatura obtenida con Arduino con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 12 bits.	64
Figura 40. Temperatura obtenida con ESP32 con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 12 bits.	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de comparación entre el sensor resistivo PT100 vs. los sensores digitales TMP75 y TMP125.	30
Tabla 2. Tabla de comparaciones de especificaciones de los termómetros TMP125, TMP75 y TA612c.	51
Tabla 3. Cambio de resolución TMP75.	55

RESUMEN

Dentro de las técnicas para la medición de conductividad térmica, una de las más conocidas es la técnica conocida como *Hot-Ball*, fue desarrollada por la Academia Eslovaca de Ciencias y aunque en su mayoría es principalmente utilizado por investigadores o en el desarrollo de nuevos materiales, es un método económico, sencillo y de tamaño compacto. En comparación con otras metodologías como *Guarded Hot Plate* el cual es más costoso, lento y requiere una mayor cantidad de pruebas, la precisión del método de *Hot-Ball* está en cierta parte condicionada por su instrumentación. El sensor de *Hot-Ball* está compuesto por un termistor, una resistencia y un cuerpo de cobre esférico para medir calor, y dado a su tamaño no requiere una muestra de estudio muy grande y permite evaluar distintos materiales.

Las afectaciones en la precisión de las mediciones de conductividad térmica directamente al que actualmente se enfrenta este método son en la parte de la calibración, la falta de uniformidad térmica y el mal acondicionamiento electrónico. Por tanto, resaltando la importancia de la instrumentación, en esta tesis se presenta el desarrollo de una electrónica adecuada para el acondicionamiento y lectura del sensor *Hot-Ball*, de tal manera que a futuro permita fabricar el sensor esférico homogéneo y facilitar su producción en serie o la comercialización de este.

Cabe resaltar que el rediseño del sistema de medición de termistores industriales permitirá obtención de un dispositivo con mayor precisión y funcionalidad, esto dará solución a una de las limitaciones que se presenta en el sensor de *Hot-Ball* y así contribuir al avance en la medición de conductividad térmica.

ABSTRACT

Among the techniques used to get thermal conductivity, one of the well-known is the so-called Hot-Ball, the Slovak Sciences Academy developed this technique, and despite it is used mainly by researchers or in the development of new materials, it is an economical, simple, compact size method. Compared to other techniques used as the guarded hot plate, which is costly, slow, and requires more measurements, the Hot-Ball precision is limited by its instrumentation. The Hot-Ball sensor is composed of a thermistor, a resistance, and a spherical copper body employed to measure heat. Because of its size, it does not require a considerable sample amount and allows for different sample evaluations.

The precision in the thermal conductivity measurements when using this method is limited by calibration, lack of standard manufacturing procedure, and bad electronic instrumentation. Because of the importance of electronic instrumentation, this thesis shows the development of adequate electronics for the signal conditioning and lecture of the Hot-ball sensor so, it can be manufactured and produced in the near future.

It is worth noting that the design of the industrial thermistor measuring will allow the obtention of a more precise device, giving a solution to one of the limitations that the Hot Ball sensor shows and, in that way, contributing to the advance in thermal conductivity measurement.

Keywords: Hot-Ball method, thermal conductivity, instrumentation, sensor calibration, thermal measurements, industrial thermistors, signal conditioning, mass production, commercial sensors.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El método de *Hot-Ball* para la medición de las propiedades termofísicas de los materiales es una técnica desarrollada en el Instituto de Física en la Academia Eslovaca de Ciencias [1]. Es utilizado en la determinación de conductividad térmica, sin embargo, su uso se limita a laboratorios de investigación. Una prueba de la necesidad de medir las propiedades térmicas, lo encontramos cuando las empresas investigan y desarrollan nuevos materiales donde es frecuente la necesidad de medir sus propiedades termofísicas con cualidades que demanda el mercado.

Es necesario aclarar que existen otras metodologías que cumplen una finalidad similar como la metodología llamada *Guarded Hot-Plate* (GHP, por sus siglas en inglés,) [2], el cual también es utilizada para medir la conductividad térmica, pero que, a diferencia del método de *Hot-Ball*, suele ser de alto costo, requiere más tiempo y muestras de mayor tamaño para ser llevada a cabo, es importante resaltar que el método de GHP es más preciso hoy día que el *Hot-Ball*, e incluso es considerado el método estándar para la medición de la conductividad térmica.

El método de *Hot-Ball* tiene como elemento clave al sensor de *Hot-Ball*, este sensor consta de una serie de componentes principales como un termistor, una resistencia y un cuerpo de esférico de cobre. Tanto la resistencia como el termistor se encuentran dentro del cuerpo esférico de cobre, donde la resistencia asume la función de fuente de calor y el termistor es el encargado de medir los cambios de temperatura. El método consiste en aplicar una corriente a la resistencia, el paso de dicha corriente provoca un incremento de temperatura en la resistencia. El calor de la resistencia se propaga por la esfera metálica hasta llegar a la frontera sensor-muestra, en este punto el incremento de la temperatura dependerá de la potencia aplicada a la resistencia, las dimensiones físicas de la esfera metálica, las propiedades térmicas del sensor y de la propia muestra. Si las propiedades térmicas del sensor y de sus dimensiones físicas son conocidas, es posible determinar la conductividad térmica de la muestra.

La configuración típica del método *Hot-Ball* [3] consiste en los siguientes elementos: Muestra, que se trata del material cuya conductividad térmica se desea medir. Dicha muestra debe tener una forma y tamaño adecuados para adaptarse a la configuración experimental. Otro elemento es el

sensor que se coloca en contacto directo con la muestra. Este sensor generalmente está hecho de un material con alta conductividad térmica. En esta configuración el primer paso es el calentamiento, donde aplica una fuente de calor (resistencia) para calentar el sensor a una temperatura constante y conocida. El sensor transfiere calor a la muestra por conducción, luego se miden las temperaturas en el sensor y en la muestra en puntos específicos y se registran durante un período de tiempo determinado. Por último, se realiza el análisis de datos que consiste en llevar a cabo las mediciones de temperatura y las propiedades geométricas tanto del sensor como de la muestra, se obtienen los datos experimentales y estos son ajustados a un modelo matemático para determinar la conductividad térmica de la muestra.

El análisis se basa en la ley de conducción térmica, que establece que la cantidad de calor transferido a través de un material es proporcional a la diferencia de temperatura y a la conductividad térmica del material [4]. La conductividad térmica de la muestra se calcula utilizando fórmulas y modelos específicos adaptados a la configuración de *Hot-Ball*.

Durante la presente investigación se analizarán diferentes configuraciones del sensor *Hot-Ball* con la finalidad de tener información suficiente y lograr un sensor de propiedades homogéneas que arroje una mayor precisión en las mediciones de conductividad térmica.

1.2 PROBLEMÁTICA

Aunque los sensores resistivos son ampliamente utilizados en el campo de la instrumentación, el acondicionamiento de este tipo de sensores puede llegar a disminuir la precisión del sensor empleado. Por otro lado, una buena instrumentación puede incrementar la precisión del sensor dentro de los límites de este.

Los sistemas de mediciones deben contar con una debida calibración y tener una buena precisión. Para obtener mediciones precisas, es necesario calibrar adecuadamente el sistema experimental y tener en cuenta las fuentes de incertidumbre. En particular, el sistema de medición de conductividad térmica puede presentar limitaciones sin la debida precisión en las mediciones de temperatura, la falta de uniformidad de la esfera, la poca estabilidad de la fuente de calor, entre otros factores experimentales. Otra cosa por la que presenta limitaciones este sistema es debido a efectos no requeridos que se presenten en la instrumentación electrónica durante las mediciones.

Dadas estas limitaciones es comprensible requerir el diseño y construcción de un sensor *Hot-Ball* ideal, aunque existen diversas variables que están fuera del alcance de este trabajo. Habrá variables que podremos reducir a manera que las lecturas que se realicen sean lo más repetibles posible y de tal manera hacer que sean comparables con otras metodologías para mediciones de conductividad térmica. Una forma de reducir el error en las mediciones es en la parte electrónica mediante el acondicionamiento de la señal producida por este sensor.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La técnica conocida como *Hot-Ball* tiene una amplia variedad de aplicaciones como la caracterización de materiales aislantes, termo-conductores, hasta semiconductores. De manera general podemos decir que mediante esta técnica se pueden determinar la conductividad térmica de diversos materiales. Cabe destacar que el análisis a realizar será en la parte de la cantidad de calor que se transfiere de el sensor hacia la muestra que se determina mediante la medición de la temperatura en la interfaz sensor-muestra.

Una de las principales ventajas de esta técnica es la rapidez con la que puede evaluar las muestras y que estas muestras pueden ser materiales sólidos, líquidos o geles. Además de ser un método un tanto simple y económico para implementar, esto debido al tamaño de su sensor el cual se encuentra entre los 3 a 5 mm de diámetro y que no requiere una muestra tan grande como otros métodos.

Esta clase de sensores obtienen cada vez más relevancia, ya que puede utilizarse en gran variedad de aplicaciones, pero el problema recurrente en la mayoría de las investigaciones analizadas suele ser la necesidad de realizar una calibración del sensor antes de ocuparlo en el análisis de cada muestra, sumado a su fabricación de manera artesanal. Por esta razón es que se plantea el diseño de una instrumentación ad-hoc para este tipo de sensores, llevar a cabo su calibración y posteriormente que las mediciones se simplifiquen y sean repetibles.

1.4 HIPÓTESIS

Dada la manera artesanal en que son creados los sensores para la técnica de *Hot-Ball*, el propósito de esta tesis es contar con la electrónica necesaria para el acondicionamiento y lectura de los elementos que componen a un sensor *Hot-Ball*, lo que a su vez permitiría tener una electrónica de acondicionamiento lista para una producción en serie. Para poder mejorar la resolución del sensor *Hot-Ball* es necesario analizar los dos problemas principales de esta técnica, por un lado, la instrumentación para leer un termistor de tipo industrial, y en segundo lugar prevenir los problemas por las fugas de calor en el termistor a través de los cables mediante una electrónica “all in one”.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Estudiar de las variables que componen a un sensor *Hot-Ball* para el diseño de la electrónica en la etapa de acondicionamiento para la medición de termistores de uso industrial usados comúnmente en equipos de laboratorios.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hallar las inconsistencias o variaciones dentro de la instrumentación de este tipo de sensores.
- Realizar un diseño replicable apto para una eventual producción en serie
- Analizar los diferentes tipos de sensores de temperatura existentes en el mercado.
- Analizar las posibles fuentes de error en la medición de sensores de temperatura resistivos.
- Realizar pruebas con diferentes prototipos electrónicos con la finalidad de encontrar los parámetros adecuados.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta tesis está limitada a diseñar y elaborar la electrónica de instrumentación necesaria para poder tener medidas confiables de termistores de uso industrial, esto por medio de un diseño replicable. La elaboración del sensor tipo *Hot-Ball* queda fuera del alcance de esta tesis, debido a que el objetivo primordial es el diseño de la electrónica de instrumentación de sensores resistivos para ser empleados en una aplicación del tipo antes mencionado.

1.8 VINCULACION O IMPACTO SOCIAL

La metodología del sensor de *Hot-Ball* es tan amplia que cuando hablamos del impacto social, este suele ser muy variado. Entre los ámbitos de incidencia se pueden mencionar:

- Desde el punto de vista energético, al desarrollar materiales térmicos más eficientes, se reducen las variaciones de temperatura no deseadas y por lo tanto se emplea menos energía para mantener la temperatura dentro de los límites adecuados. De la misma manera

se contribuye a la conservación de recurso y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

- Como se había mencionado anteriormente, caracterizar materiales ayuda en el desarrollo de materiales avanzados y compuestos con mejor disipación de calor, lo cual es de gran importancia en el campo de la electrónica, en donde puede evitar sobrecalentamientos de algunos dispositivos y a su vez mejorar su rendimiento y durabilidad.
- Aunado al punto anterior, comprender las propiedades térmicas de los materiales puede tener un impacto significativo en la industria de seguridad y prevención de incendios. Evaluando materiales para resistir y retardar la propagación del calor, y que por lo tanto ayuden al desarrollo de materiales ignífugos y sistemas de protección contra incendios.
- Si hablamos de aislamiento térmico, que en sí tiene relación con los puntos anteriores, el estudio de las propiedades térmicas podría influir en la reducción del consumo energético debido a la climatización de edificios, lo cual tiene beneficios tanto económicos como ambientales.

CAPITULO 2. ESTADOS DE LA TÉCNICA Y CAMPO

2.1 ESTADO DEL ARTE

Para realizar un estudio del estado del arte se encontró una serie de artículos, entre los cuales se encuentran: El artículo “*Hot-Ball method for measuring thermal conductivity*” [5] que describe el uso de la técnica para analizar los factores que afectan la precisión en las mediciones, como las propiedades reales de la esfera, y la resistencia de contacto térmico entre la esfera y el medio que la rodea. Este trabajo se basa en una fuente de calor en forma de una pequeña esfera capaz de producir calor a una tasa constante y simultáneamente mide la respuesta de temperatura en la frontera esfera-muestra en función del tiempo. La respuesta de temperatura se estabiliza en un valor constante después de algún tiempo (T_m). Esta constante juega un papel importante dentro del modelo matemático para determinar la conductividad térmica de la muestra y del propio sensor. Además, llevan a cabo mediciones con sensores de distintos materiales y obtuvieron la conductividad térmica que corresponde al material de esta esfera. Entre los factores que influyen en la medición se pueden mencionar los siguientes: el efecto de las propiedades reales de la esfera caliente y el efecto de la resistencia térmica de contacto. Ambos efectos provocan una diferencia de temperatura entre la temperatura de la esfera; el volumen y la temperatura del medio a medir (muestra conocida), que conducen a un error de medición sistemático cuando se utiliza la ecuación de trabajo del método de medición.

Los autores de este trabajo mencionan que probaron la funcionalidad de un conjunto de sensores y realizaron la calibración tomando como muestras de referencias a cinco materiales como Arenisca, PMMA, hormigón, silicato de calcio y espuma fenólica de conductividades térmicas reportadas y con valores dispersos en un rango entre 0.06 a 1.9 $W/(m \times K)$, además de ser muestras con diferentes formas y tamaños como es el caso de la Arenisca y PMMA, que este último es de forma cilíndrica a diferencia del resto cuya forma fue de prisma rectangular.

En el trabajo “*Measurement Reliability and Accuracy Analysis of the Hot-ball Sensor*” [30] se encontró que los autores analizaron las limitaciones de la estructura del sensor considerando la incertidumbre de medición en busca de obtener un sensor que sea adecuado para el estudio de la conductividad térmica y su producción en masa de este tipo de sensor. Para calcular el intervalo de confiabilidad del método utilizaron como muestras de referencias Agua destilada y Glicerol, ya que

de ambas muestras se pueden encontrar sus conductividades térmicas a diferentes temperaturas en la literatura. En este trabajo se encuentra la descripción del método de *Hot-Ball*, el cual utiliza una pequeña esfera que genera un cambio transitorio de temperatura en el medio que rodea al sensor, se mide simultáneamente la temperatura. La temperatura final de la esfera es una medida de la conductividad térmica del material circundante (llamado también en este presente trabajo de tesis como medio o muestra).

En este trabajo los autores emplean la siguiente metodología de medición: Paso 1) Medir la temperatura de la muestra antes de comenzar la prueba, esta temperatura representa la línea de base. Paso 2) Se enciende la fuente de calentamiento, y al mismo tiempo, se monitorea constantemente la temperatura del sensor. Paso 3) Cuando la temperatura del sensor se estabiliza es posible obtener matemáticamente la conductividad térmica de la muestra. Con esta metodología concluyen que la tasa de repetibilidad de las medidas depende de la conductividad térmica y el periodo de equilibrio de temperatura para líquidos puede tomar desde un minuto hasta diecisiete minutos aproximadamente.

Los parámetros empleados en las pruebas son los siguientes: Se utilizaron seis potencias caloríficas de salida diferentes para mediciones en el rango de 2.5 a 16 mW. Se realizaron tres mediciones para cada potencia de salida de calor. El tiempo de estabilización entre dos mediciones toma alrededor de 2 horas. Se determinaron dos parámetros: el radio y la capacidad calorífica del sensor. Todas las medidas de calibración que realizaron fueron a 25°C, con una humedad ambiental de 30% en la cámara climática HPP 108. En este trabajo llegaron a las siguientes conclusiones: La conductividad térmica de la muestra de referencia con la que se realiza la calibración es un factor limitante para obtener datos confiables. Sugieren que se realice con muestras de referencia de un valor límite considerando en conductividad térmica cercano al Agua destilada, aunque si la muestra de referencia tiene una conductividad mayor a esta, nos enfrentaremos a un cambio de datos.

En el artículo "*Experimental comparison and validation of hot-ball method with guarded hot plate method on polyurethane foams*" [6] se encontró el procedimiento de comparación y validación experimental de la medición por el método de Hot-Ball, utilizando como referencia el método establecido GHP, empleando espumas de poliuretano, en seis densidades diferentes. De acuerdo con los autores, este método transitorio se basa en medir y evaluar la respuesta de la temperatura a la excitación del material medido por el calor. La fuente de calor tiene forma esférica que permite utilizar un modelo matemático analítico con simetría esférica para simplificar y acelerar los cálculos.

Para aumentar la practicidad de este método, la temperatura se mide dentro de la fuente de calor. Tal fuente de calor y el termistor se encuentran incorporados dentro de una esfera, la cual llaman sensor *Hot-Ball*.

El procedimiento que siguieron los autores se describe a continuación, primeramente, se colocó el sensor entre dos piezas de espuma, considerando que el sensor se encontraba en el centro de la muestra y que la muestra existente a su alrededor tiene 5 cm, seguido se colocó un peso de 200 g para hacer presión entre las muestras para garantizar un buen contacto entre el sensor y la muestra, finalmente la cámara termostática fue ajustada a 25°C y puesta con una potencia de calefacción 1 mW, con tiempo de respuesta 1800 s, periodo de muestreo 0.5 s.

Los autores refieren que entre los problemas que se aprecian en la técnica son las fugas de calor parásitas a través de los cables son significativos cuando se miden materiales de muy baja conductividad térmica. Por lo que, todos los valores de conductividad térmica se desplazan a números más altos que los valores medidos por GHP. Otra complicación es lograr un buen contacto térmico entre los componentes del sensor. Por otra parte, las condiciones mecánicas de los componentes del sensor no son exactas debido a que son muy pequeños, por lo que se necesita llevar a cabo estudios de repetibilidad. A manera de conclusión los autores mencionan que los resultados son prometedores para el método de *Hot-Ball*, en comparación de GHP solo hay una variación del 5%.

Otro trabajo que aporta al estado del arte de este trabajo de tesis es "*Monitoring of epoxy curing by a thermal-conductivity sensor based on the Hot-Ball transient method*" [7] donde presenta la metodología llevada a cabo en estudio del monitoreo del régimen higrorotérmico usando dos sensores de humedad colocados en la estructura porosa del pilar en la Basílica de Santiago en la ciudad de Levoča en Eslovaquia. Determinando el transporte de calor y humedad en el pilar dependiendo de la estación del año. Para ello emplearon un sensor del tipo *Hot-Ball*, el cual consta de dos componentes eléctricos: una resistencia y un termistor. Los componentes eléctricos se colocan dentro de la esfera, donde la resistencia se utiliza como fuente de calor para generar el campo de temperatura y el termistor mide la respuesta de temperatura a este calentamiento.

El procedimiento de medición que los autores llevaron a cabo consiste en medir la temperatura antes del calentamiento y después del periodo de calentamiento. Debido a que la medición de la temperatura antes del calentamiento indica la temperatura del entorno y proporciona una línea base; mientras que la medición durante el calentamiento es la base para determinar los parámetros

termofísicos. Cuando la temperatura del sensor alcanza un valor estable se detiene el calentamiento. Los autores mencionan que describen una nueva técnica para monitorear el régimen higratérmico, que se basa en medir la conductividad térmica local. El método de *Hot-Ball* se utiliza para medir la conductividad térmica. Los datos arrojados por el sensor fueron un alto nivel de humedad en los bloques de arenisca, un 36% a 10 cm y 60% a 40 cm. Así mismo los autores reportan efectos de congelación-descongelación en función de la temperatura ambiente. Además de flujos de calor identificados y transporte de humedad entre el centro del pilar a la capa del subsuelo del pilar.

Mientras que en el trabajo "*The use of the hot-ball method for observing the transport of moisture in porous stones*" [1] ayudó a este trabajo de tesis dando a conocer el transporte o difusión de agua en ciertas partes de muestras, utilizando sensores de *Hot-Ball*. En donde evaluaron la conductividad térmica y temperatura en diferentes puntos de una piedra porosa para llegar a saber la cantidad de presencia de agua.

Para llevar a cabo las mediciones, los autores usaron tres sensores *Hot-Ball* para determinar de manera cuantitativa el vapor y agua líquida. Conectaron dos dispositivos para recopilar datos (valores de la humedad adquirida al medir la cantidad de conductividad térmica). Los resultados obtenidos por los autores fueron validados por Porosimetría de mercurio y comparados con posibles mecanismos que miden de saturación de agua.

A manera de conclusión, los autores reportan que los experimentos y estudios realizados demuestran que la porosidad y estructura de los materiales afecta el proceso de saturación de agua y el comportamiento de los materiales. El método de *Hot-Ball* funciona independientemente del tipo de muestra a analizar y donde se encuentre, lo cual puede ser ventajoso si se requiere tener un seguimiento continuo de cambios de humedad en materiales rocoso, incluso cuando estas sean parte de monumentos históricos.

Otro trabajo revisado fue el artículo "*Wireless device for monitoring the temperature-moisture regime in situ*" [8], donde diseñaron un dispositivo electrónico que incluye un módulo inalámbrico. Llegando a obtener un dispositivo cubre todas las operaciones necesarias para llevar a realizar mediciones exitosas. Los autores de este trabajo analizado reportan la activación del sensor *Hot-Ball*, la medición de su respuesta, el almacenamiento de los datos obtenidos, la comunicación inalámbrica de datos y la posibilidad de carga solar.

Adicional a la medición de propiedades térmicas que realizaron con el método de *Hot-Ball*, los autores incluyeron un sensor de humedad. La muestra que utilizaron fue un cilindro de material poroso de 2 cm de altura donde le colocaron un sensor *Hot-Ball* en el centro. Este debe ser construido del material más parecido al de la muestra en lo que respecta a porosidad. Además, mencionan que el sistema de medición debe estar calibrado para muestras solidas en estados secos y saturados de agua [9], esto permite encontrar valores absolutos de contenido de humedad.

Con toda esta amplia revisión de literatura llevada a cabo se puede saber que existen ventajas de este sensor utilizado en el método de *Hot-Ball*, las cuales incluyen baja perturbación de la muestra, portabilidad, bajo costo para grandes cantidades, idoneidad para operación a largo plazo y tamaño pequeño. Así mismo, se encontró un trabajo donde reportan que se puede alcanzar características en el dispositivo de medición una comunicación inalámbrica para administrar la configuración y descarga de datos medidos, donde hacen uso de un puerto *I2C* para la conexión opcional del sensor de temperatura y humedad del aire, usando dos canales de medición para la conexión de dos sensores de *Hot-Ball*, obtienen un procesador de control más eficiente, memoria para almacenar datos medidos, protección de bajo voltaje de la batería, posibilidad de carga solar, el uso de una fuente de corriente para impulsar el calentador del sensor *Hot-Ball* que permite medir la potencia de calentamiento con precisión, capacidad de usar una o dos baterías de tamaño AA como fuente de alimentación, un circuito en tiempo real para reducir el consumo de energía mientras se mide el régimen de reposo y una interfaz gráfica de usuario más fácil de usar.

2.2 ESTADO DEL CAMPO

En la patente ES2805046T3 que lleva por título “*Elemento de calentador como sensor para control de temperatura en sistemas transitorios*” [10], se muestra un sistema de control que utiliza elementos resistivos como sensores, de tal manera que puedan determinar y controlar la temperatura en fluidos. Por otra parte, el controlador ajusta la potencia que suministra de acuerdo con las mediciones que obtiene del elemento resistivo. Esto destaca la importancia de instrumentación precisa y la posibilidad de rediseñar sistemas que ayuden a la mejora de precisión y control.

En la patente “*Method and apparatus for measuring the thermal conductivity and thermo-electric properties of solid materials*” [11] se menciona un método y a la vez un aparato para medir la conductividad térmica y propiedades termoeléctricas de materiales sólidos. El dispositivo utiliza una técnica similar al *Hot-Ball*, en donde se aplica calor y mide la respuesta térmica del material para determinar sus propiedades.

A grandes rasgos a comparación de un sensor de *Hot-Ball*, este solo utiliza una fuente de calor fija y sensores de temperatura en distintos puntos del material, en lugar de una sola esfera en contacto con el material o muestra. Por otra parte, este método solo está diseñado para sistemas sólidos, mientras que el *Hot-Ball* funciona tanto como para líquidos y gaseosos también. Cabe recalcar que un sensor de *Hot-Ball* puede medir fluidos con alta precisión sin necesidad de muestras de gran tamaño.

“*Method and apparatus for measuring thermal conductivity of small, highly insulating specimens*” [12] es una patente similar a la anterior. En esta se presenta un método y un aparato para medir conductividad térmica, pero de muestras pequeñas y altamente aislantes. El sistema está diseñado para proporcionar una buena precisión en mediciones en donde las técnicas convencionales pueden ser poco efectivas.

Al estar tan especializado en materiales altamente sensibles utiliza configuraciones de placa caliente y sensores sensibles, además que requiere pequeñas muestras y una preparación muy detallada, mientras que un sensor de *Hot-Ball* puede medir en medios grandes y heterogéneos. Dado a lo anteriormente mencionado podemos decir que el sensor de *Hot-Ball* es más versátil al medir diferentes tipos de materiales sin alterar la misma estructura, además de no requerir una preparación meticulosa o específica de las muestras.

En la patente “*Thermal conductivity measurement apparatus and related methods*” [13] se mencionan distintos métodos para la medición de la conductividad térmica. Su función se basa en evaluar las propiedades térmicas de distintos materiales utilizando técnicas que mejoren la precisión y repetibilidad de las mediciones.

Si bien este podría ser el dispositivo más cercano a nuestro propósito, en esta patente se utilizan una técnica de contacto con sensores distribuidos en la muestra, en lugar de un único punto de calentamiento, además de ser diseñado principalmente para materiales sólidos, siendo el *Hot-Ball*, más flexible.

Algo importante es que en la metodología del *Hot-Ball* se pueden obtener datos en tiempo inmediato y con tiempos de respuesta más rápidos. Por otro lado, no requiere contacto físico con toda la muestra, reduciendo errores por interferencias mecánicas.

En la patente US6676287B1, la cual lleva por título “*Direct thermal conductivity measurement technique*” [14], se realiza una técnica directa para la medición de conductividad térmica, en esta técnica o método permite determinar de manera eficiente la conductividad térmica, esto al estudiar las fuentes de error que comúnmente se ven en otras técnicas.

Esta técnica se basa en mediciones de flujo de calor que pasan por el material, con sensores que están en contacto con la muestra, si bien aparentemente es altamente preciso para sólidos homogéneos, no es tan adaptable a medios líquidos o heterogéneos. A diferencia de este, el método de *Hot-Ball* es más dinámico permitiendo mediciones en otros medios sin requerir un montaje estructurado.

“*Thermophysical property measurement method and thermophysical property measurement apparatus*” [15] es el título de la patente US10088439B2 en la cual se describe un método y un aparato para la medición de propiedades termofísicas, incluyendo la conductividad térmica. Este sistema proporciona mediciones precisas y confiables de las propiedades térmicas de diversos materiales.

Este sistema además de la conductividad térmica también permite evaluar otras propiedades como la capacidad calorífica y la difusividad térmica. Está diseñado más para laboratorios, dada a su

caracterización avanzada, mientras que un sensor de *Hot-Ball*, además de ser más sencillo, portátil, puede aplicarse en campo, así como aplicaciones industriales.

En todas las patentes mencionadas anteriormente se comparan en relación al sensor de *Hot-Ball* dado, que lo que se pretende realizar como trabajo a futuro, y si vemos en rasgos generales es un tanto superior en el sentido de portabilidad, facilidad de uso y versatilidad en los medios líquidos gases y heterogéneos. Por otro lado, las patentes que se mencionan están más enfocadas a mediciones sobre todo en medios sólidos homogéneos y suelen requerir instalaciones complejas y de mayor preparación con relación a las muestras.

CAPITULO 3. MARCO TEORICO

3.1 INTRODUCCIÓN

Con toda la información obtenida del trabajo realizado en el capítulo anterior de esta tesis se plantea llevar a cabo la instrumentación necesaria para medir un termistor (ver Figura 1), para el cual se deberá de comprender cinco etapas.

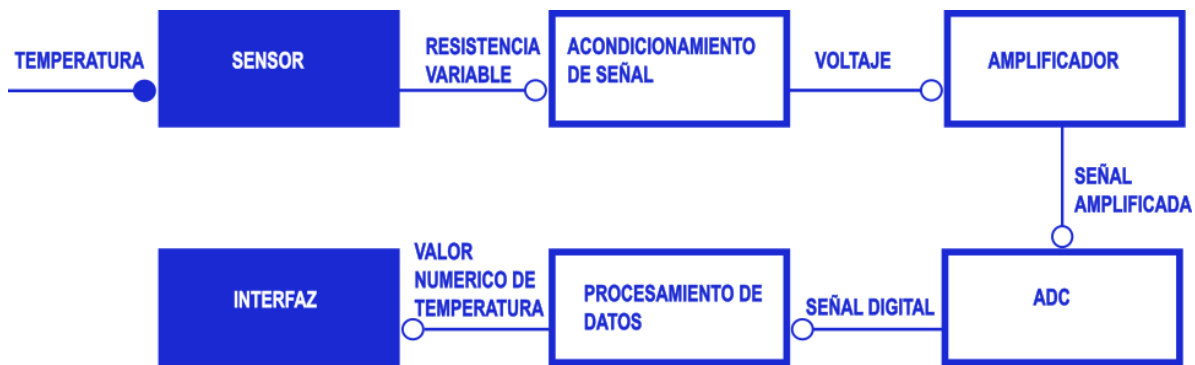


Figura 1. Diagrama de la instrumentación necesaria para medir un termistor.

La primera etapa es el Sensor termistor, que es un elemento sensible a la temperatura, este puede ser un termistor de Coeficiente de temperatura negativo (NTC, por sus siglas en inglés) o de Coeficiente de temperatura positivo (PTC, por sus siglas en inglés) [16], en el que la salida será la resistencia variable en función de la temperatura. La diferencia entre uno y otro es que el NTC su resistencia disminuye con el incremento de la temperatura, mientras que por otro lado los PTC incrementa su resistencia al incrementar la temperatura.

La segunda etapa es el Acondicionamiento de señal, para esta etapa se requiere una fuente de excitación que será la que proporcione corriente o voltaje al termistor y por otra parte un Puente de Wheatstone (PW), que será quien convierta el cambio de resistencia en una señal de voltaje. Y por tanto la salida de esta etapa será un valor en voltaje proporcional a la temperatura.

En la tercera etapa encontramos al Amplificador, que será el encargado de amplificar la señal de voltaje generada [17] en la etapa anterior para que pueda ser utilizada por el Convertidor Analógico-

Digital (ADC, por sus siglas en inglés), para ello se deberá tener a la salida del bloque una señal amplificada y limpia.

Para la cuarta etapa tenemos el ADC, como su nombre lo indica convierte la señal de voltaje en datos digitales para poder llevar la etapa de procesamiento de datos [18]. Al término de esta etapa se obtendrá una señal digital representando la temperatura. Que dará paso a la quinta y última etapa que es el Procesamiento de datos, en esta parte se transforman los datos digitales arrojados anteriormente en temperatura, dada en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) o bien en grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) si así se desea en algún momento. Por tanto, la salida de esta etapa será un valor numérico de la temperatura.

Ahora bien, cabe mencionar que dentro de algunas etapas existen más pasos a considerar como se indica en el diagrama de la Figura 2, en las cuales se observa a manera de bloques la forma en que interactúan internamente.

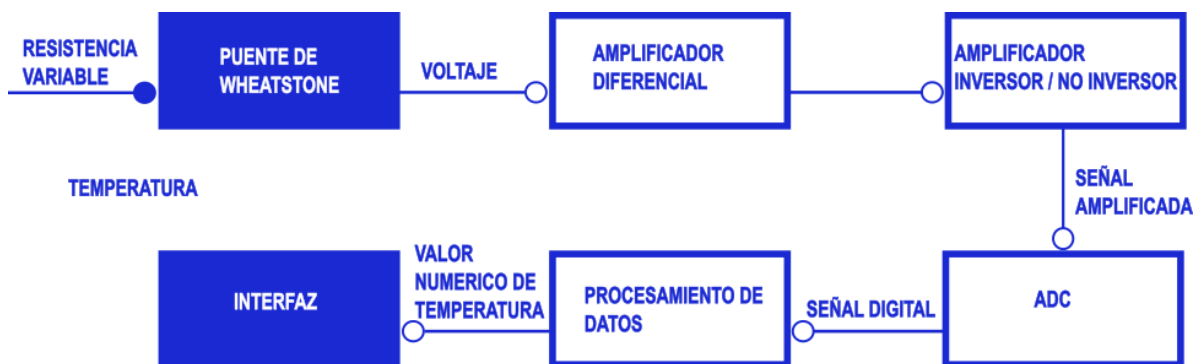


Figura 2. Diagrama a bloques del puente de Wheatstone.

Retomando la salida del sensor cuyo dato esta dado en la resistencia variable, este pasa por el puente de Wheatstone, el cual está dividido en cuatro ramas, dos resistencias fijas, una resistencia fija o variable y el termistor. Seguido a esto, se hace uso de un amplificador diferencial para amplificar la señal que viene del PW, precisamente mide la diferencia de potencial entre las salidas del PW y amplifica la diferencia mientras rechaza el ruido de las ramas, esto es muy práctico en entornos cuando hay interferencia, en otras palabras, mejora la relación señal/ruido.

Por otro lado, podemos observar un nuevo bloque que es el del amplificador inversor o en su defecto un amplificador no inversor. El amplificador no inversor por su parte es el encargado de amplificar la señal, esto para ajustar la señal al nivel requerido por el procesamiento. Por otro lado, el inversor amplifica la señal, pero invierte la polaridad de la señal, entonces es útil en situaciones donde se requiera hacer ese cambio de polaridad.

Aunque existen algunos problemas comúnmente asociados en el acondicionamiento de señal, como puede, ser desde el propio termistor al ser parte del PW, donde suele haber un autocalentamiento y por tanto modifica la medición. Esto se puede ajustar utilizando resistencias de mayor valor para limitar la corriente. También encontramos otro problema convencional suele ser la tolerancia de las resistencias, por ejemplo, las más comerciales tiene una tolerancia del 5 %, esto cambia el balance inicial del PW. Para dar solución a esto se optó por utilizar resistencia con la mejor tolerancia de ser posible de 1 % o menos, y en su defecto caracterizarlas para tener una mayor precisión.

Otro problema es el ruido eléctrico, este parámetro afecta a la precisión y/o medición de la temperatura, así como variaciones en la fuente de excitación. Para dar solución a esto, se pueden utilizar filtros pasa bajas en la salida [19], o usar una fuente de alimentación regulada y limpia.

Una vez habiendo considerado lo antes mencionado pasamos al ajuste o calibración del puente de Wheatstone. En primer lugar, se comienza con el balance el cual se logra cuando las corrientes de las ramas son igual a 0, es decir, no hay diferencia de potencial entre los nodos de salida. Para balancear se seleccionan resistencias con valores similares, si alguna de ellas es ajustable entonces se procede a ajustarla hasta que mida aproximadamente 0 V, todo esto bajo condiciones estándar como la temperatura ambiente, si no se llega a balancear quiere decir que las resistencias tienen una tolerancia mayor.

Posterior a ello viene el ajuste del rango dinámico, para esto se seleccionan resistencias de valores cercanos al rango que se espera del termistor para maximizar la sensibilidad [20]. Como ejemplo, si el termistor varía entre 5 K y 10 K las resistencias fijas también deberían estar entre ese rango.

Además de esto se puede ajustar la parte matemática de las ecuaciones de calibración en el microcontrolador si los valores no coinciden. Por otro lado, hay que considerar que la relación resistencia-temperatura del termistor no es lineal, entonces por tanto en ocasiones se opta por introducir una resistencia de compensación en serie o paralelo con el termistor, también se puede aplicar la Ec. 1 que se trata de la ecuación de Steinhart-Hart en su forma extendida.

En la Ec.1, T se refiere a la temperatura en grados Kelvin (K), R indica la resistencia que presenta en la temperatura T , mientras que A_i son los coeficientes de Steinhart-Hart y son características específicas del material semiconductor en un rango de temperatura de interés.

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 (\ln R)^2 + A_3 (\ln R)^3 \quad \text{Ec. 1}$$

Así como en el puente de Wheatstone existen etapas internas también sucede algo similar en los ADC, por tanto, las cuales se representan en la Figura 3 donde se muestra un diagrama a bloques de cómo sería el proceso desglosado.

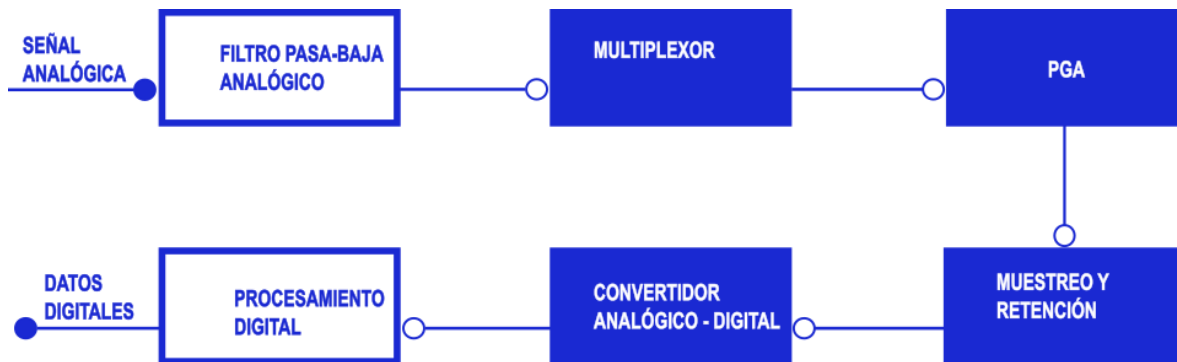


Figura 3. Diagrama a bloques de un ADC.

De manera más detallada se puede mencionar que la señal de entrada analógica es la que proviene del circuito de acondicionamiento, en este caso del puente de Wheatstone o de un amplificador.

Un Filtro Pasa-Bajas, también conocido como filtro anti-aliasing, es que elimina las altas frecuencias que podrían causar aliasing durante la conversión. En algunas ocasiones llevan un multiplexor que permite seleccionar entre múltiples canales de entrada analógica. El amplificador de ganancia programable (PGA) ajusta la amplitud de la señal para utilizar el rango completo del ADC [21].

En la etapa de Muestreo y Retención, también llamado como *Sample & Hold* se toma el valor instantáneo de la señal analógica y lo mantiene constante durante la conversión [22]. Posterior a este el convertidor analógico- digital que como su nombre indica convierte la señal analógica a un valor digital y el cual puede haber diferentes configuraciones las cuales serán más explicadas más adelante.

Y por último en el procesamiento digital se aplican filtro digitales o cálculos para optimizar la señal convertida para obtener por salida los datos digitales que se dirigirán al microcontrolador o a algún sistema de procesamiento.

Como se mencionó en párrafos anteriores, existen diferentes configuraciones del ADC, entre ellas se encuentra:

El Registro de Aproximación Sucesiva (SAR, por sus siglas en inglés), este se caracteriza por su bajo consumo de energía y su resolución de 8 a 16 bits. Además, se suele utilizar en la instrumentación en general.

También el Flash ADC que es muy rápido, pero tiene una resolución limitada de 8 bits. Este se utiliza sobre todo en procesamiento de señales de alta frecuencia.

Otro es el Delta-sigma, que tiene una gran resolución de hasta 24 bits, pero de velocidad baja. Los sensores de alta precisión son su mejor campo.

También el de Rampa o de doble pendiente, que tiene una gran precisión y bajo ruido, pero más lento. Dada su estabilidad se ve comúnmente en multímetros digitales.

También hay que considerar los problemas habituales en los ADC, tal como en el puente de Wheatstone, donde el ruido y las señales espurias afectan la precisión de conversión [23], para ello se usan filtros anti-aliasing y diseños de Placas de Circuito Impreso (PCB, por sus siglas en inglés) con buena protección del ruido [24].

Otro problema y que en nuestro caso es clave es la resolución, usualmente un ADC no puede captar pequeños cambios en la resistencia del termistor, por lo que habrá que buscar un ADC que tenga una resolución de 12 bits o más.

Como se mencionaba también en el puente de Wheatstone la no linealidad del termistor sigue teniendo un impacto considerable. Por otro lado, si la salida del puente de Wheatstone no se acondiciona correctamente, el ADC podría saturarse o no utilizar todo su rango, por lo que se requiere un PGA antes del ADC.

En términos generales retomando los problemas que suelen estar presentes en la instrumentación para medir un termistor podemos enlistar los siguientes:

1. Sensor (termistor)

- No linealidad
- Sensibilidad al autocalentamiento
- Errores por tolerancia
- Degradación con el tiempo

Referente a los dos últimos puntos hay que recordar que los termistores tienen una resistencia nominal que puede causar errores si no están bien calibrados. Por otro lado, la resistencia del mismo sensor puede cambiar si se expone mucho tiempo a altas temperaturas o a la humedad.

2. Fuente

- Inestabilidad del voltaje o corriente
- Ruido
- Corriente excesiva

En este apartado es importante recalcar el último punto dado que puede provocar el autocalentamiento del termistor, y esto recaería en los problemas antes mencionados.

3. Acondicionamiento de señal:

- Ruido en la señal
- Desbalance en el puente de Wheatstone

4. Amplificación

- Ganancia incorrecta
- Ruido
- Deriva térmica

Recalcando que un amplificador puede saturar la señal o dejarla demasiado débil, por otro lado, no son lo más ideales para las pequeñas señales del termistor por lo cual podría generarse ruido, aunado a esto la ganancia puede cambiar con la temperatura, lo cual también podría generar errores de medición.

5. ADC

- Resolución insuficiente
- Ruido digital
- Voltaje de referencia inestable

Como se mencionaba en el apartado de los ADC, la resolución de los ADC varía, entonces si no es la suficiente resolución no podrá medir los pequeños cambios de voltaje del termistor, también si no hay un correcto diseño de tierra las señales digitales pueden interferir con las señales analógicas. Hay que considerar que si hay fluctuación en el voltaje de referencia se afecta directamente la conversión.

6. Procesamiento de datos

- Errores de cálculo
- Falta de calibración
- Latencia

En caso de haber aplicado la ecuación de Steinhart-Hart, el error humano está presente y podría no implementarse de la manera correcta. Hay que recordar que cada termistor que se use requiere de una calibración previa para que las mediciones sean precisas [25], y en caso de tener muchas mediciones simultáneas el procesamiento puede generar retardos.

7. Interfaz

- Error en la comunicación serial
- Falta de actualizaciones rápidas

Es común que en interfaces como el Receptor/Transmisor Asíncrono Universal (UART, por sus siglas en inglés), existan errores de transmisión que pueden distorsionar los datos, también si no hay un sistema de suavizado las lecturas podrían parecer erráticas, además de que si el formato o resolución no es el adecuado hará más compleja la interpretación de los datos.

Otro dato de manera general que podría afectar en todas las etapas son las interferencias electromagnéticas también conocidas como EMI, por sus siglas en inglés. Ahora en términos generales habrá que ser especialmente cuidadosos con la calibración del termistor, usar fuentes reguladas para evitar ruido y fluctuaciones, utilizar filtros como pasa bajas y blindar cables y

componentes sensibles, considerar componentes de precisión como resistencias y amplificadores con baja tolerancia y deriva térmica por último el diseño adecuado del PCB evitará las interferencias causadas por problemas con la tierra.

3.1 TERMISTOR TIPO INDUSTRIAL vs. SENSOR DE TEMPERATURA DIGITAL

El grupo de los sensores de temperatura resistivos está conformado por un lado los sensores de temperatura resistivos (RTD, por sus siglas en inglés) y los termistores. Los RTD se basan en elementos resistivos y los termistores se basan en semiconductores.

Partiendo de lo anterior mencionado generalmente tenemos dos opciones por un lado los termistores que son ideales para rangos pequeños, con bajo costo y respuesta rápida, mientras que los RTD tienen buena precisión y una respuesta casi lineal en un rango amplio.

Tabla 1. Tabla de comparación entre el sensor resistivo PT100 vs. los sensores digitales TMP75 y TMP125.

Modelo	PT100	TMP75	TMP125
Tipo	RTD (analógico)	Sensor de temperatura digital	Sensor de temperatura digital
Rango de temperatura	-200°C a + 850°C	-40°C a +125°C	-55°C a +125°C
Precisión	Alta Clase A: $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ Clase B: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Salida	Analógica	Digital (I2C)	Digital (SPI)
Robustez ambiental	Resistente (ideal para ambientes industriales)	Baja, limitada por diseño digital	Baja, limitado por diseño digital
Tiempo de repuesta	Moderado	Rápido	Rápido
Costo relativo	Alto	Bajo	Bajo
Requiere calibración	Si Industrial, laboratorios, control ambiental	No Electrónica de consumo, sistemas HVAC	No Electrónica automotriz, dispositivos IoT

Un dato interesante y que puede afectar en mediciones muy específicas es que a pesar de que los RTD como el PT100 suelen considerarse como sensores de respuesta lineal por algunos manuales [26], en realidad no lo es como se puede observar en la Ec. 1., pero si aplicamos una linealización matemática junto con una regresión polinomial general como aprendimos en los cursos de matemáticas durante la licenciatura y maestría, se tiene una relación lineal entre resistencia y temperatura, sin embargo, considerando que una ecuación lineal de forma general es $Ax + b = 0$ y si verificamos la Ec. 2 que representa dicha relación (Ecuación de Callendar-Van Dusen).

Donde para $\{T_{RTD} \mid -200^{\circ}\text{C} < T_{RTD} < 0^{\circ}\text{C}, D \neq 0\}$ se usa la Ec.2

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + D(t - 100^{\circ}\text{C})t^3] \quad \text{Ec. 2}$$

Y para $\{T_{RTD} \mid 0^{\circ}\text{C} \leq T_{RTD} < 850^{\circ}\text{C}, D = 0\}$ se usa la Ec.3.

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad \text{Ec. 3}$$

Habiendo considerado lo anterior podemos afirmar que su comportamiento No es lineal, sin embargo, gracias a las matemáticas se puede trabajar bastante bien como si lo fueran, o bien, una parábola como lo sugiere la Ec. 3.

Retomando las diferencias de los sensores es necesario aclarar que, si buscamos velocidad y facilidad de implementación, habrá que optar por los sensores digitales, ya que el PT100 requiere circuitos adicionales para llevar a cabo el acondicionamiento [27].

Si requerimos precisión en un rango más extenso de temperaturas el PT100 será la mejor opción, teniendo en cuenta que generalmente son más caros que los sensores digitales.

3.2 ACONDICIONAMIENTO

Dentro de las opciones para el acondicionamiento de la señal de un termistor el circuito integrado MAX31865ATP+ esta entre las opciones, este circuito integrado está diseñado para acondicionar y convertir señales provenientes de sensores RTD como lo es el PT100 [28]. Generalmente se utiliza en ambientes industriales, de medicina y de monitoreo ambiental.

Este circuito se caracteriza principalmente por su compatibilidad con detectores de temperatura resistivos (RTD), de tipo 2, 3, y 4 hilos, que incluye la compensación de resistencia en caso de que se quiera utilizar RTD's de 3 y 4 hilos, de tal manera que se aseguran medición. Por realizar mediciones

precisas incluso con cables largos. Por su polarización del RTD, evita el autocalentamiento del sensor, las configuraciones típicas de corriente son de $250\mu A$, $500\mu A$, $1mA$ y $2mA$. Porque detecta errores monitoreando la continuidad del RTD, las fallas pueden ser de corto circuito en el RTD, así como la desconexión del mismo, incluso si existen fallas en el cableado.

Además, convierte la señal utilizando un ADC del tipo Sigma-DELTA y logra una resolución de 16 bits, además soporta un rango de resistencias típicas de 100Ω para el PT100 y de $1k\Omega$ para el PT1000. También porque incluye el protocolo SPI para la integración de microcontroladores y sistemas embebidos.

Por todo lo anteriormente mencionado, cabe aclarar que presenta ciertas ventajas en comparación de la instrumentación clásica, por ejemplo, combina etapas de la instrumentación, como es la polarización, la amplificación, ADC y la detección de errores en un solo chip, de tal manera que es un tamaño reducido en diseño y también reduce los componentes externos, además elimina ruido por los filtros integrado de alta precisión.

Por otra parte, ofrece la flexibilidad de ser integrado con múltiples configuraciones de RTD y a su vez de cableado, permitiendo ajustar parámetros como la corriente y el filtrado según las necesidades del usuario.

Así mismo, ofrece fiabilidad con la detección de fallas, de tal manera, que garantiza el monitoreo constante del sensor, beneficio crucial en aplicaciones de alta precisión como en la industria y la medicina.

Debido a las múltiples ventajas que ofrece este integrado, es empleado tanto en la industria dentro de controles de procesos de medición precisas y confiables de temperatura. En medicina en sensores de temperatura en dispositivos como incubadoras o equipos de diagnóstico. En automóviles en el monitoreo térmico en baterías, motores y sistemas de refrigeración. En materia de energía, la medición en turbinas, paneles solares y sistemas geotérmicos es su principal aplicación y por último también se utiliza en estaciones meteorológicas.

Las limitaciones del CI MAX31865ATP+ está en su alta especialidad ya que es exclusivo para RTD, y no adecuado para termistores o termopares, por otro lado, si se requiere una alta tasa de muestreo no es el más indicado y por último su costo si la aplicación no requiere la exigencia que puede proveer el CI, existen otras soluciones más simples para medir temperatura.

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO DE PLACA DEL CI MAX31865

Para poder adentrarse al tema de los sensores tan pequeños como son el de *Hot-Ball* es necesario poner en práctica habilidades tanto de diseño y realización de placas PCB y de esta manera ir puliendo los fallos al realizarlas.

Como se mencionaba al inicio, la idea es realizar un diseño similar al que se ofrece por la empresa Maxim Integrated, de tal manera que se alcance un diseño de placas PCB de tamaño reducido. El diseño que propone la empresa para el circuito integrado MAX31865 se puede ver en la Figura 4, donde se muestra ambas vistas del diseño propuesto del propio software.

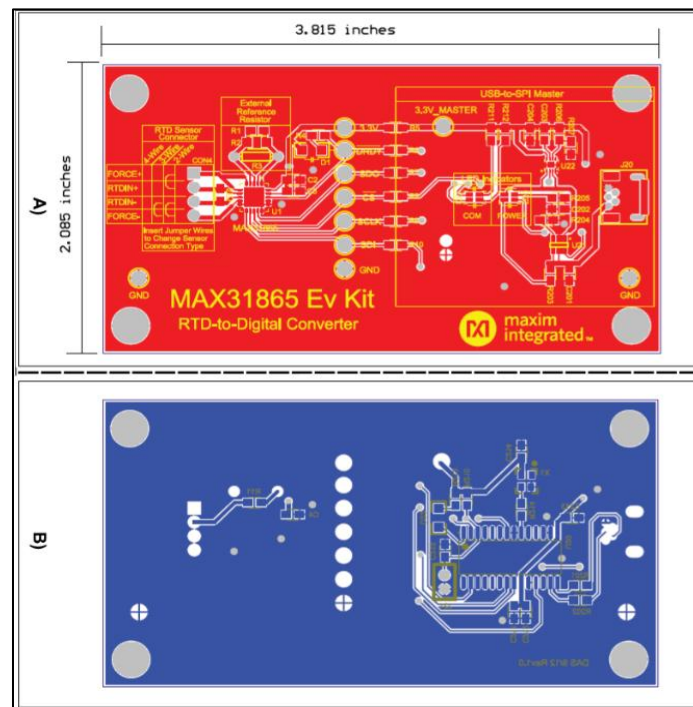


Figura 4. A) Vista principal y B) Vista trasera del Diseño propuesto del Circuito impreso de MAX 31865 Ev Kit.

Aunque la placa cumple con su objetivo, en este trabajo de tesis se analiza y determina que se puede ahorrar algo de espacio reacomodando los componentes. Algo importante a mencionar es que

durante las primeras pruebas que se realizaron, una de las partes del PCB, no se considera necesario incluir la parte que convierte USB a PIN Master (ver Figura 5).

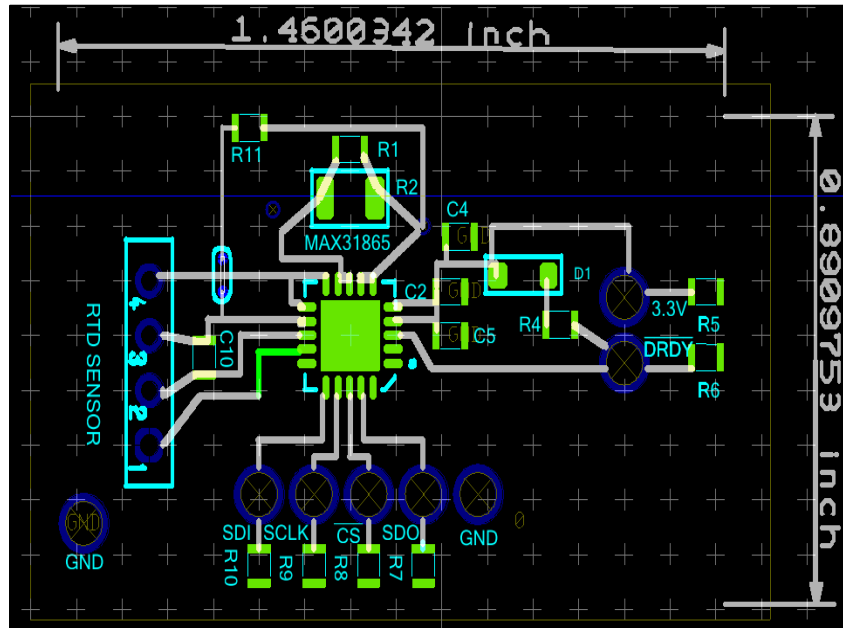


Figura 5. Diseño de placa del PCB que no incluye la parte que convierte USB a PIN Master.

Con esta propuesta, si bien se corrigieron algunos errores de diseño en los que algunas pistas se juntaban, y a diferencia del fabricado por Maxim Integrated este diseño es en una sola cara. Podemos observar que, si bien no se mejoró mucho en cuestiones de tamaño de largo, pero si se obtuvo una reducción significativamente a lo ancho.

4.2 TECNICAS DE PLANCHADO DE PLACAS

Para poder transferir el diseño a una placa PCB es necesario realizar una serie de pasos de los cuales uno de los más importantes es el planchado, es decir, la manera en que se transferirá el diseño a la placa para posteriormente pasar la placa al ácido férrico.

Este paso es muy importante dado que al ser una placa pequeña el más mínimo error puede representar deformaciones en las líneas, contactos indeseados o en su defecto que no se transfiera bien y por lo tanto no exista continuidad en alguna línea.

El método tradicional con una plancha fue el que resultó más práctico, aunque más difícil de perfeccionar. A diferencia de la técnica de la enmicadora en la que la máquina proporciona el calor adecuado y presión necesaria para que se transfiera el dibujo, durante las pruebas realizadas no fue posible incluso que se transfiriera el dibujo a la placa por lo que, a pesar de las recomendaciones de compañeros y profesores, se tuvo que desistir de la técnica optando por buscar perfeccionar la técnica con plancha.

Con la técnica donde se hizo uso de Plancha se obtuvieron los siguientes resultados que se pueden observar en las Figuras 6 y 7.



Figura 6. Transferencia del circuito por método de plancha con líneas de 0.4 mm de ancho de pista.

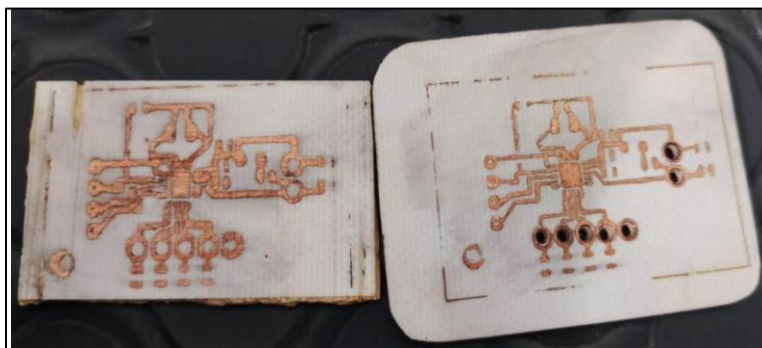


Figura 7. Transferencia del circuito por método de plancha con líneas de ancho de pista de 0.4 mm (placa del lado izquierdo) y 0.3 mm (placa del lado derecho).

Aunque en la figura 7 se puede ver que la placa ha sido impresa con éxito. Al llevar a cabo una examinación rigurosa se puede observar que existen discontinuidades en las pistas en la impresión de la placa, como se observa en la figura 8. Otra parte para tomar en cuenta es que se presentaron defectos con este método y que representan cortes en el cobre líneas 0.3mm, como se puede ver en la Figura 9.

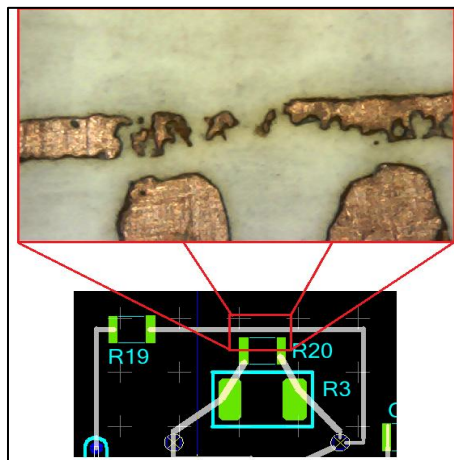


Figura 8. Defectos presentados durante el planchado.

Además de las discontinuidades, también se presentaron continuidades que no deben estar presente, ya que no son propias del diseño (ver Figura 9).

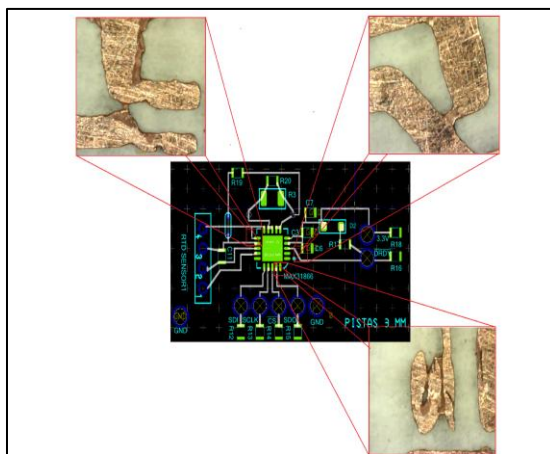


Figura 9. Defectos presentados durante el planchado en el cobre líneas 0.3mm.

Con la técnica donde se hizo uso de Enmascaradora se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 10, donde se observa que existe varias discontinuidades a simple vista.

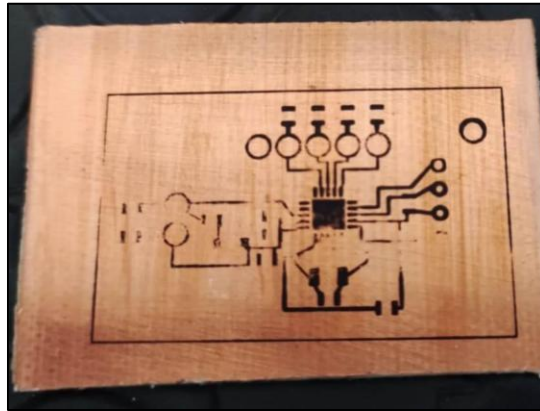


Figura 10. Defectos presentados en la transferencia del diseño al PCB, líneas 0.3 mm.

Realizando un acercamiento en partes donde a simple vista existía una buena transferencia, se encontraron que también se presentaron debido a una mala transferencia al PCB (ver Figura 11).

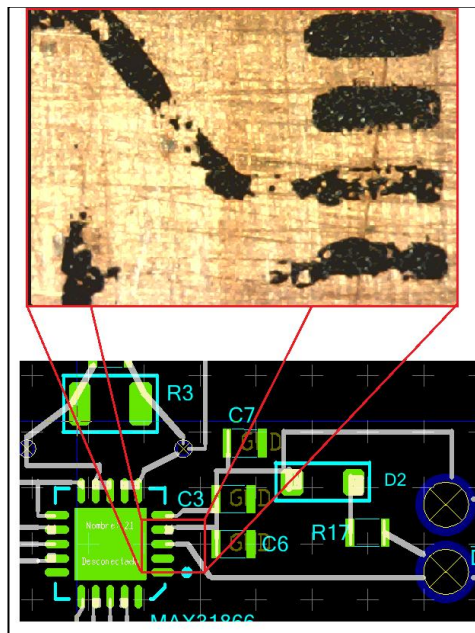


Figura 11. Acercamiento defectos presentados en la transferencia al PCB.

Con estos resultados se necesitó realizar más pruebas donde hubo algunas complicaciones como cortes en el ácido ya sea por mucho tiempo en el ácido o por no delimitar bien o quitar bien el papel

que queda para que el ácido pueda hacer bien su trabajo, por tanto, había partes en las que hacía más efecto que en otras, es decir no era uniforme la acción del ácido (ver Figura 12).

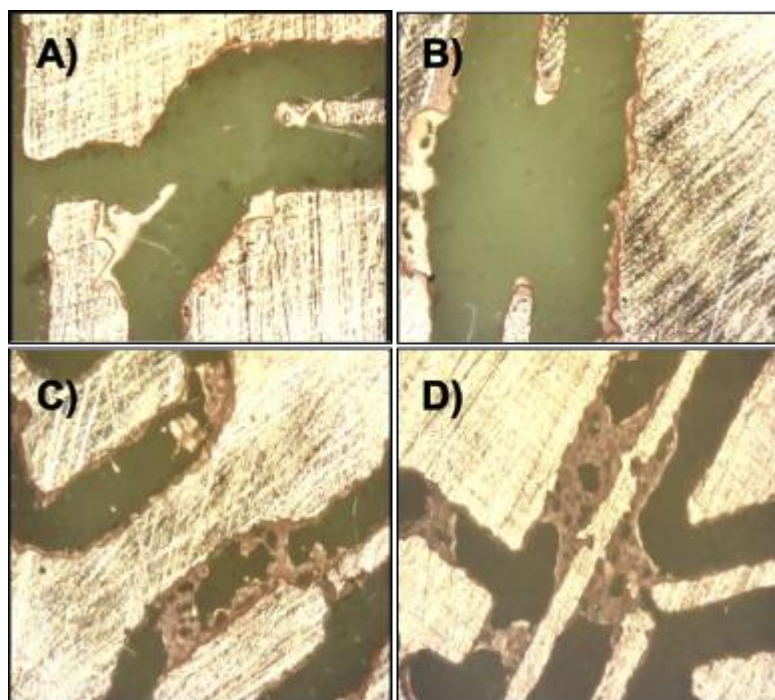


Figura 12. Efectos presentados en la muestra por falta de tiempo de exposición en ácido.

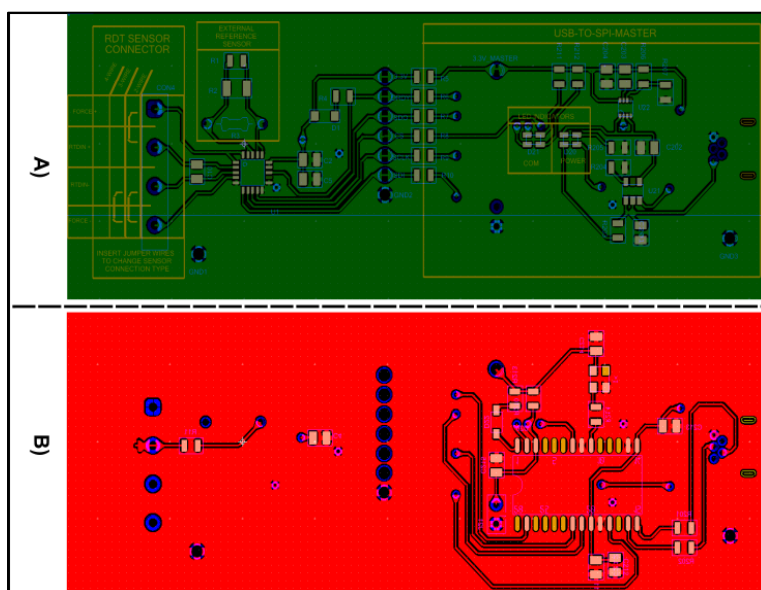


Figura 13. A) Vista superior de placa y B) vista inferior de MAX31865EVKIT.

Ahora con la masa común ajustamos la versión anterior y además añadimos la parte que es de USB a SPIN-MASTER, dado que no se había considerado en la versión anterior. Adicionalmente, se añadieron las debidas etiquetas y se consideraron las hojas de datos de cada uno de los elementos que componen al MAX31865EVKIT con la finalidad de minimizar errores al momento de realizar la placa (ver Figura 13). De la misma manera para mantener la uniformidad del kit se mantuvo con doble cara.

4.3 DISEÑO Y DESARROLLO DE MAX31865EVKIT

Una vez notado las complicaciones y las soluciones planteadas en la sección anterior se procedió a realizar la placa de tamaño completo, como solución y para facilitar el trabajo se diseñó todo en vista superior como se ve en la Figura 14.

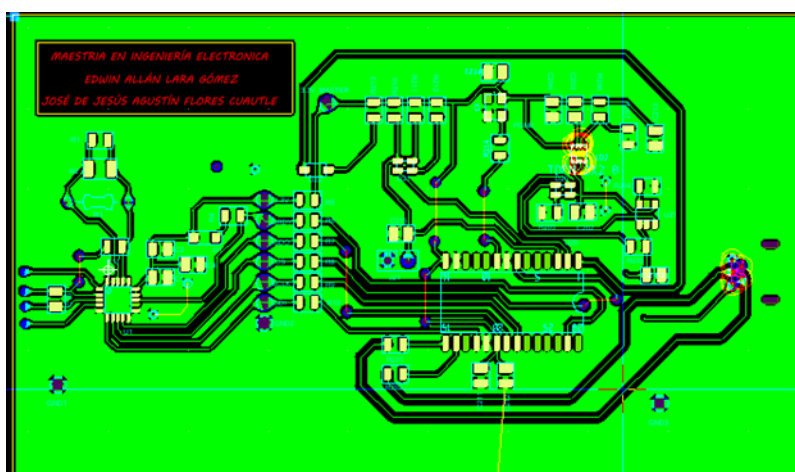


Figura 14. MAX31865 EVKIT solo una cara.

Como se mencionó anteriormente, para la mejora continua de la placa se intentó realizarla a dos caras, pero dado a la complejidad para realizarlo, se optó por fabricarlo con nuestro diseño a una sola cara, agregando una mejora en cuanto espacios (ver Figura 15), costos y reubicación de algunos componentes, dado que algunos de los componentes utilizados en el diseño original ya son obsoletos. Pero al adentrarnos más en este proceso, hasta el momento estábamos utilizando el programa llamado Ultiboard, desafortunadamente había un problema con el fabricante, y es que el

diseño arrojado por Ultiboard marcaba un *BoardOutline* mucho más grande que el diseño planteado, este borde es el que la maquina respetaría, por lo tanto, no se reducen las dimensiones.

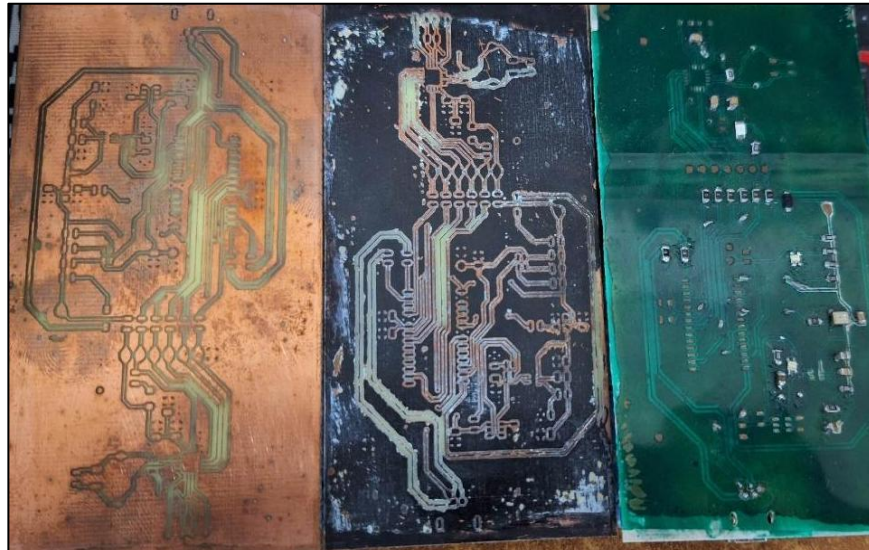


Figura 15. Fases de realización de PCB MAX31865 EVKIT.

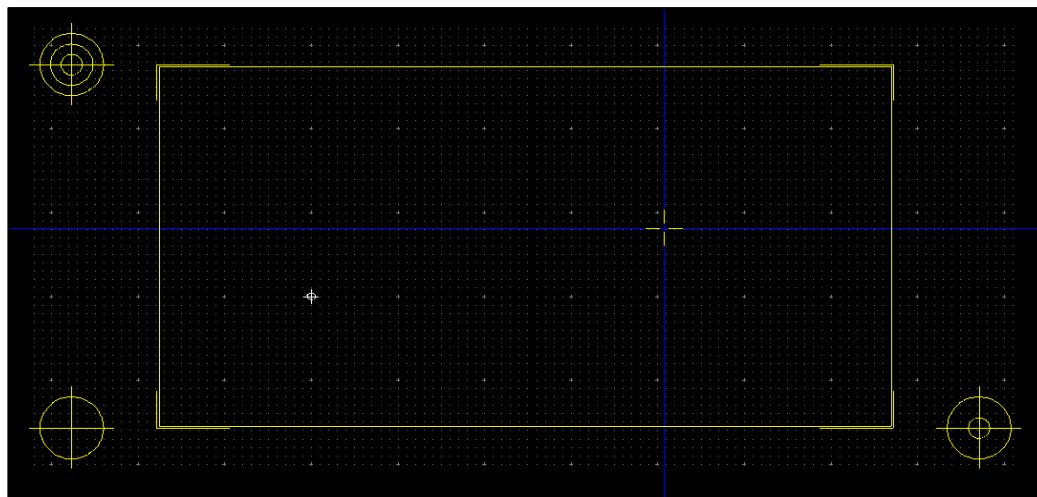


Figura 16. Problemas con el boardoutline en el programa Ultiboard.

En la Figura 16 se muestra los puntos de referencia del boardoutline, el cual se requería quitar para mandar a hacer la placa de manera industrial y por tales motivos se volvió a realizar en un nuevo diseño a dos caras.

Se volvió a realizar, pero ahora en doble cara con la finalidad de reducir el tamaño de la placa y verificar si con ello no rebasaba los 10 *cm* de longitud, y aunque en diseño mide 8.6 *cm* de longitud y 4.7 *cm* altura aún con los puntos de referencia del boardoutline, no fue suficiente para no pasar los 10 *cm* debido a que la máquina CNC considera también dichos puntos (ver Figura 17).

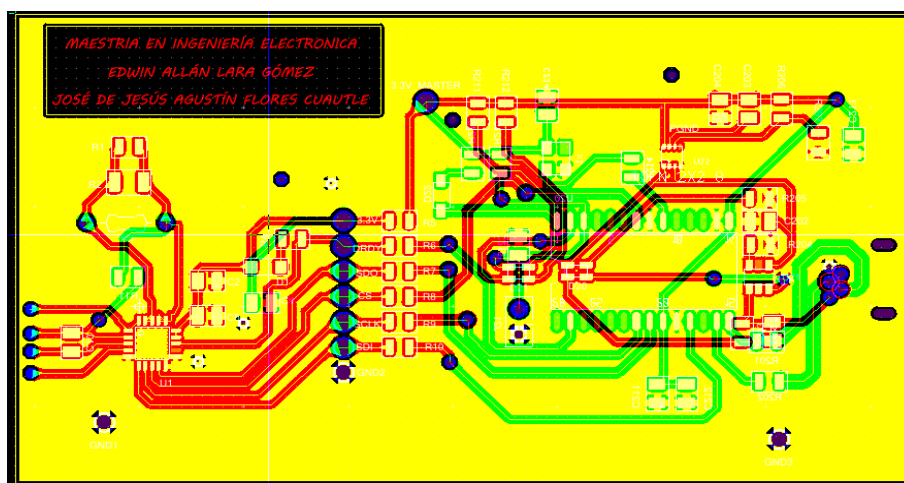


Figura 17. Diseño del MAX31865 a doble cara.

Dado a la problemática de los puntos de referencia que realiza ULTIBOARD, se optó por realizar el diseño en una nueva plataforma, ahora en PROTEUS.

El diseño del MAX31865 se compone de tres partes fundamentales, la primera parte que es la parte que se encarga de la medición y que consta de un convertidor de resistencia a digital que es precisa y fiable. La información que lee este convertidor es de un conector donde se conecta el RTD (ver Figura 18)

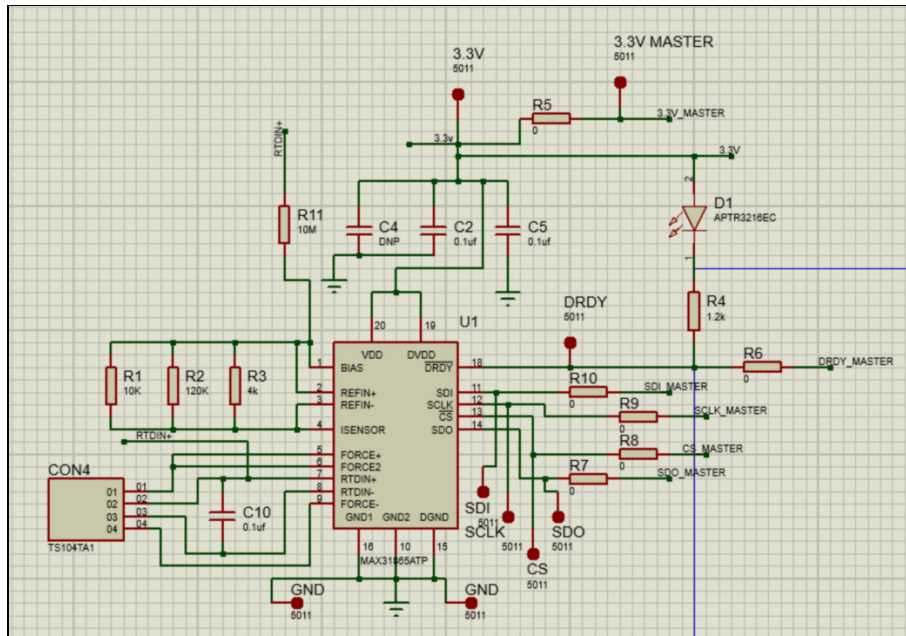


Figura 18. MAX31865 EV KIT Esquemático parte 1 de 3.

En la Figura 19 se observa la interfaz que conecta a la sección de medición con la sección de comunicación digital y cuya alimentación está compuesta por un circuito integrado de regulación de corriente y uno de regulador de voltaje, se usa un indicador led.

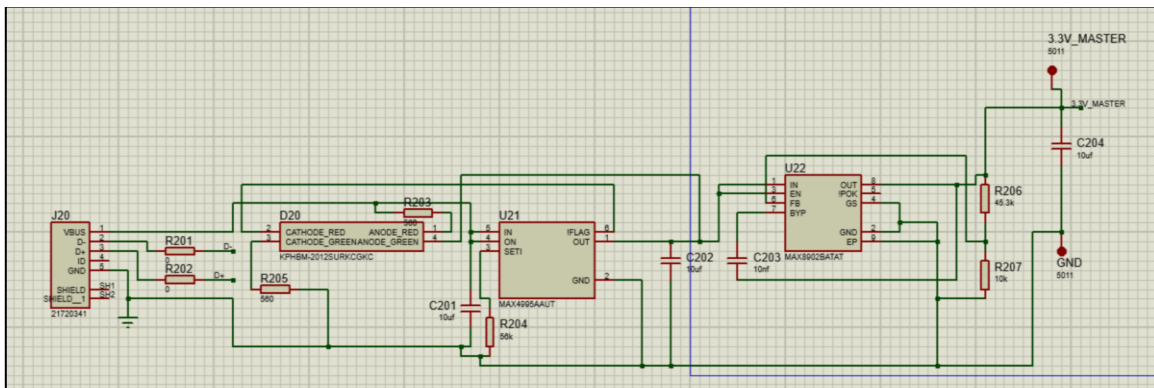


Figura 19. MAX31865 EV KIT esquemático parte 2 de 3.

En la Figura 20 se tiene el bloque de comunicación digital que permite emplear una interfaz USB. Esta sección consta de un Oscilador de cuarzo con compensación de temperatura, un microcontrolador de 8bits, la compensación de temperatura en el oscilador de cuarzo es necesaria para prevenir problemas en la transmisión de datos debido a una falta de sincronía.

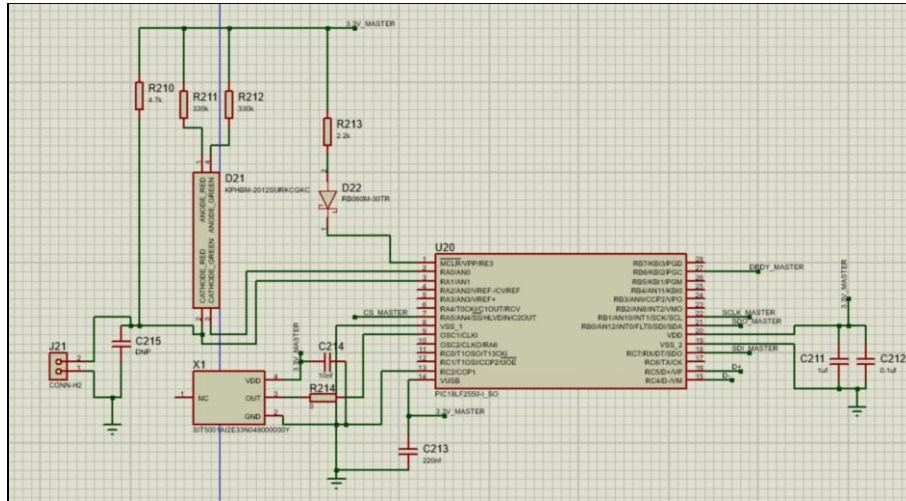


Figura 20. MAX31865 EV KIT Esquemático parte 3 de 3.

Una vez realizado el esquemático en el software Proteus se realizó una vez más la placa a doble cara, logrando reducir aún más el diseño, cabe recalcar que el tamaño original de la placa era de 5.29 cm de altura con 9.69 cm de longitud. El tamaño final resulto en 4 cm de alto con 8 cm de longitud, como se puede observar en la Figura 21.

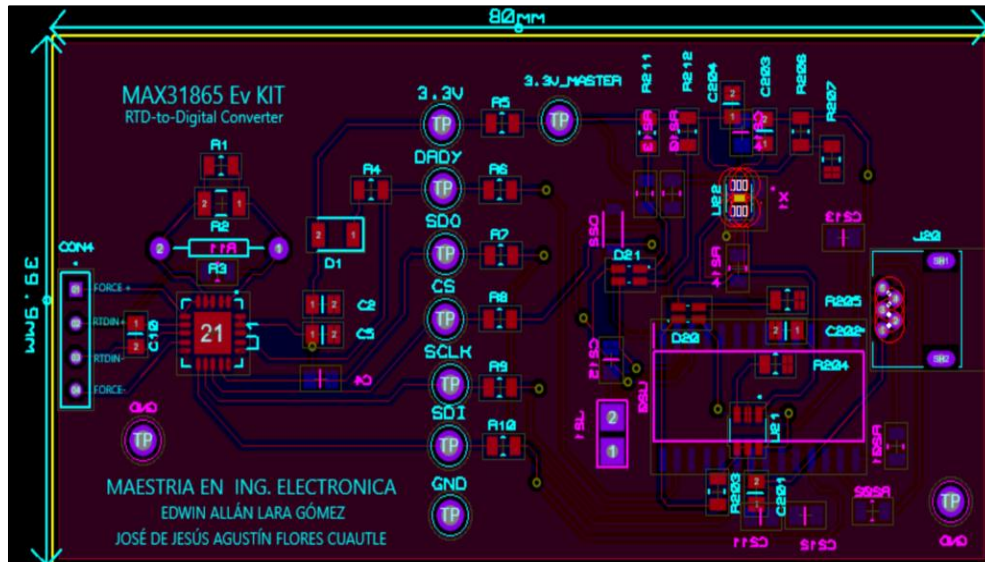


Figura 21. Diseño en PROTEUS a dos caras.

Este nuevo diseño ya se logró fabricar de manera profesional y con una mejora considerable como se puede ver en la Figura 22.

Entre las especificaciones del diseño del MAX31865 Ev KIT se tiene que el espesor de las pistas es de 0.1524 mm , esto debido a que algunos componentes requieren ese tamaño de pista. En el caso del regulador Maxim MAX8902BATA+ requiere un espesor de pista de 0.23 mm , tamaño mayor a 6Th el programa considera errores entre los pads.

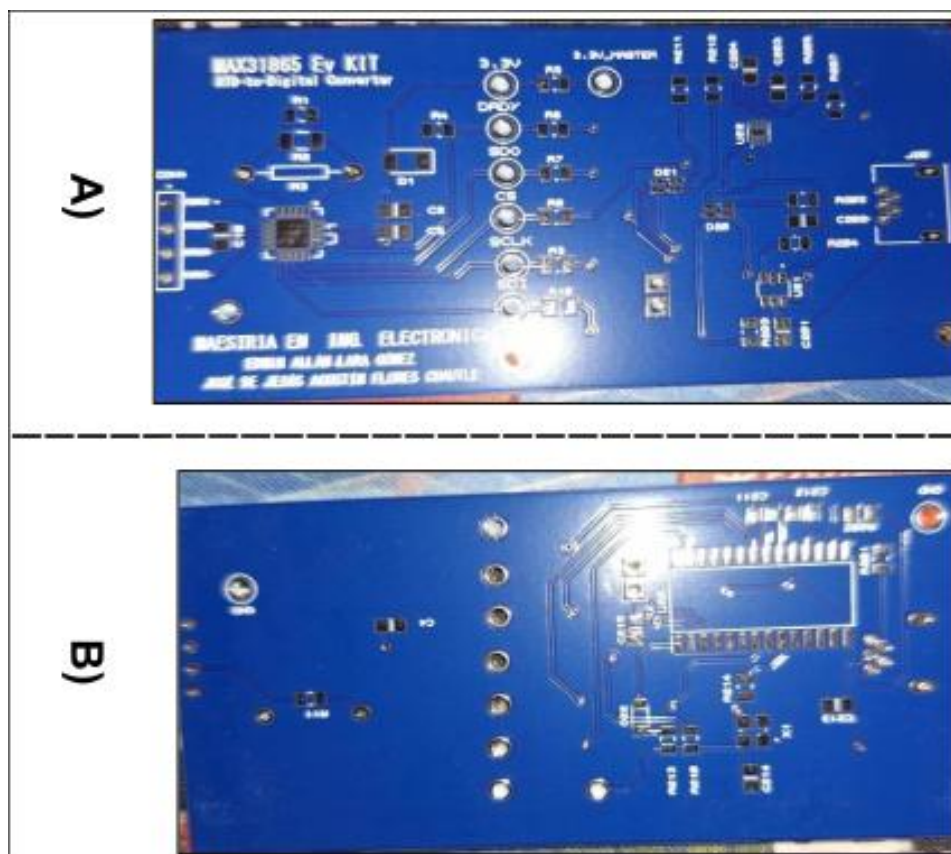


Figura 22. A) Vista superior y B) vista inferior de la PCB sin componentes del MAX31865EVKIT.

La mayoría de las resistencias y capacitores son de tamaño 0805 a excepción de algunos elementos como R2, D1 que son de medida 1206. Por otra parte, las vías son de tamaño de 0.762 mm de diámetro y el agujero de 0.381 mm de diámetro.

Entre otros elementos a destacar están el Maxim MAX31865ATP+ este tiene un tamaño de 5 mm de altura y 5 mm longitud, es el principal elemento dentro de la PCB dado que es el convertidor optimizado para detectores de temperatura de resistencia de platino (RTDs).

Para la solución de la mala soldadura con estaño, dado que muchas veces es difícil soldar los pequeños SMD, la soldadura en pasta presenta una excelente solución para esos pequeños componentes, para esto se hizo uso de una estación de soldar con pistola de calor, la cual se fija a la temperatura de 230°C con un flujo de aire moderado para evitar mover el SMD.

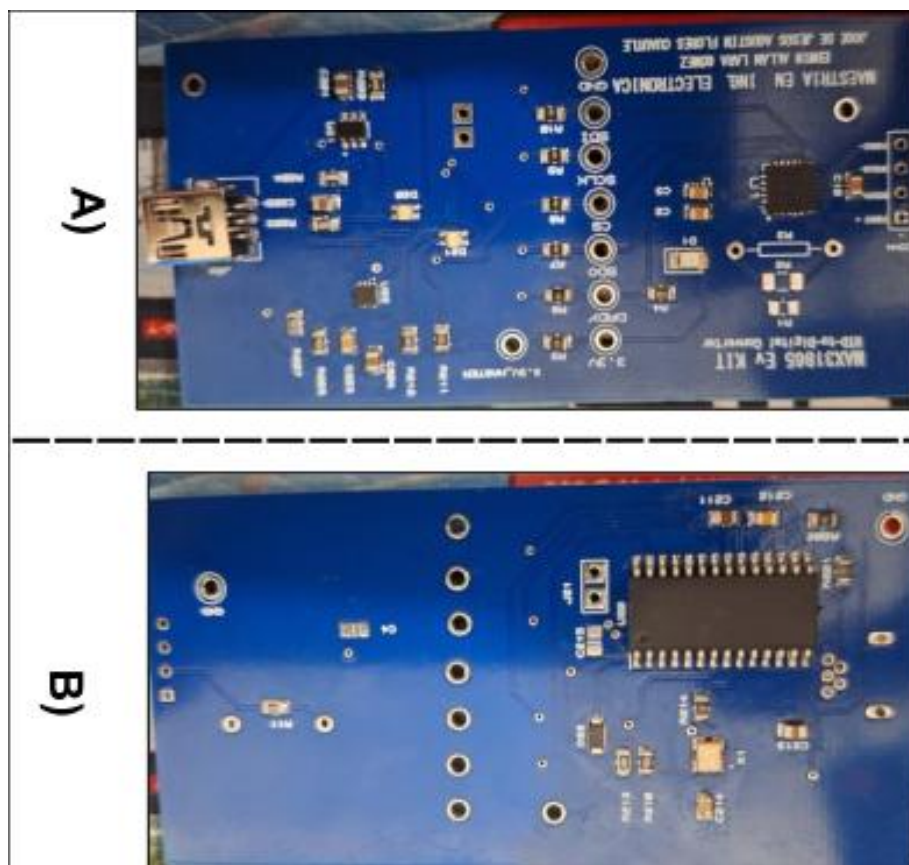


Figura 23. A) Vista superior y B) vista inferior del MAX31865EVKIT con componentes ensamblados.

4.4 DESARROLLO DE PLACAS DEL SENSOR DIGITAL TMP75 Y TMP125

Dada la experimentación previa que se tuvo en desarrollo de la placa del MAX31865EVKIT, fueron tomadas en cuenta para la realización de las placas del sensor TMP125 y TMP 75, en esta parte del trabajo hubo complicaciones a la hora de crear la comunicación con Arduino, sobre todo la comunicación SPI.

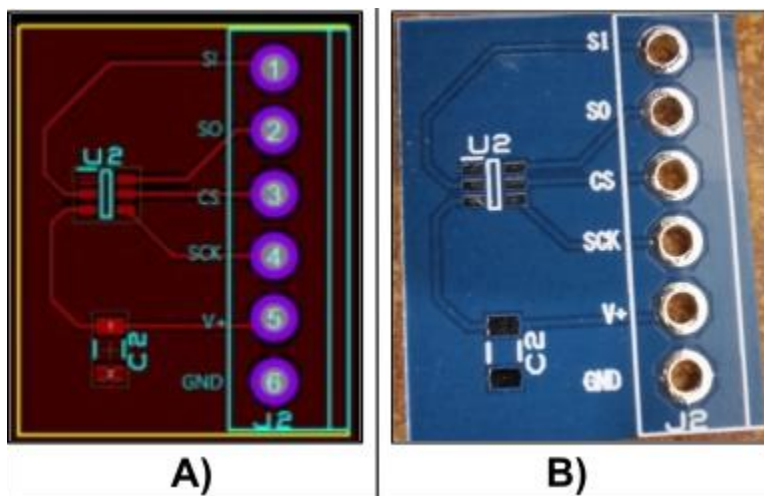


Figura 24. A) Diseño en PROTEUS del sensor digital y B) PCB del TM125.

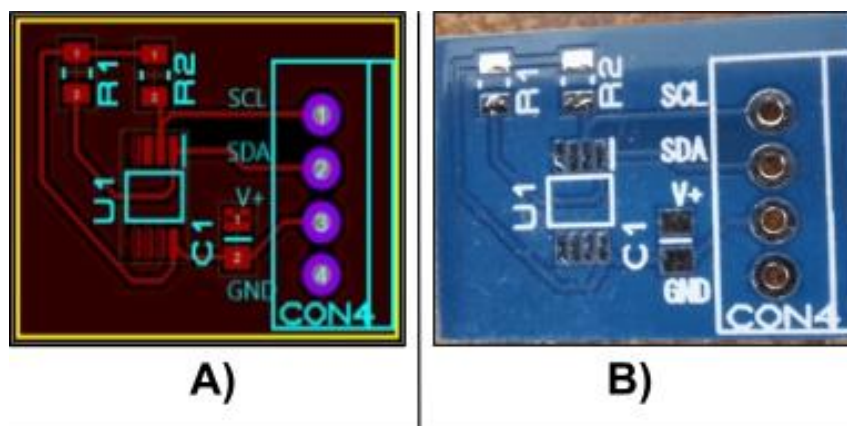


Figura 25. A) Diseño en PROTEUS del sensor digital y B) PCB del TM75.

Los componentes para el sensor digital de temperatura TMP75 constan de un Sensor de temperatura digital TMP75 (SOIC 8), un Capacitor de $0.01\mu F$ (0805) y 2 resistencias de $4.7k\Omega$ (0805)

En los componentes para el sensor digital de temperatura TMP125 son un Sensor de temperatura digital TMP125 (SOT23-6) y un Capacitor de $0.1\mu F$ (0805)

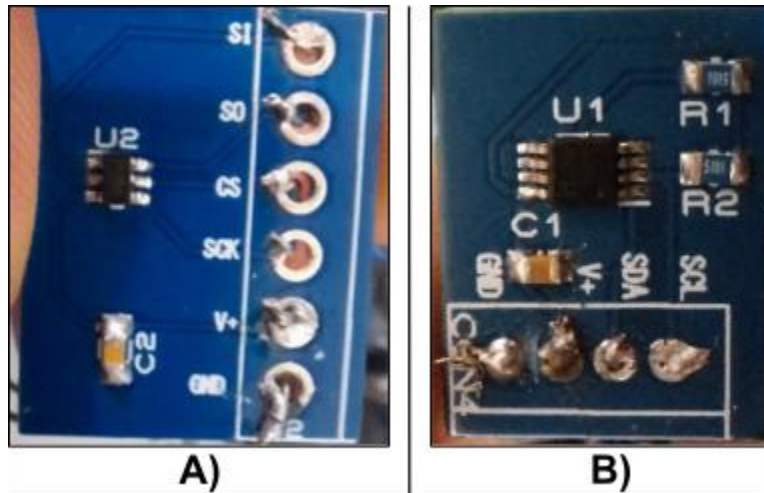


Figura 26. PCB's de los sensores digitales A) TMP125 y B) TMP75, respectivamente.

Estos sensores fueron realizados para tener más de una referencia de la precisión en la temperatura del MAX31865EVKIT, de tal manera que para realizar las mediciones se utilizó un Arduino DUE, y también con un ESP32, esto por la experimentación futura con los ADC que disponen en cada uno.

La conexión física del TMP75 con el Arduino DUE está dado por:

$V+ \rightarrow 3.3V$

$GND \rightarrow GND$

$SCL \rightarrow SCL (D21)$

$SDA \rightarrow SDA (D20)$

La conexión física del TMP125 con el Arduino DUE está dada por:

$V+ \rightarrow 3.3V$

$GND \rightarrow GND$

$MOSI \rightarrow MOSI(D75)$

$MISO \rightarrow MISO(D74)$

$SCK \rightarrow SCK (D76)$

$CS \rightarrow D10$

La conexión física del TMP75 con el ESP32:

$V+ \rightarrow 3.3V$

$GND \rightarrow GND$

$SCL \rightarrow SCL (GPIO\ 22)$

$SDA \rightarrow SDA (GPIO\ 21)$

La conexión física del TMP125 con el ESP32:

$V+ \rightarrow 3.3V$

$GND \rightarrow GND$

$MOSI \rightarrow MOSI(GPIO\ 23)$

$MISO \rightarrow MISO(GPIO\ 19)$

$SCK \rightarrow SCK (GPIO\ 18)$

$CS \rightarrow GPIO\ 5$

4.5 COMUNICACIÓN DE ARDUINO Y ESP32 CON TMP75 Y TMP125

Por la comunicación de los dos sensores, uno siendo por SPI (TMP125) e I2C (TMP75) se realizó todo desde el mismo Arduino. La idea es, sumado a esto comparar las temperaturas y precisiones de cada sensor, aunado al MAX31865EVKIT. Así mismo verificar un posible error que provoca el cambio de resolución en el Arduino DUE, por lo que se conectará a un divisor de voltaje con un PT100 para saber que tan significativo es el error. Por ello en el código se considera lo siguiente:

- Configuración de la comunicación SPI para el sensor digital TMP125
- Configuración de la comunicación I2C para el sensor digital TMP75
- Especificar la inicialización y acciones en el void setup
- Dentro del void loop mandar a llamar las funciones declaradas para la lectura de temperaturas.
- Declarar la función de lectura del TMP125 esto incluye

- Seleccionar el CS bajo
- Leer los datos del TMP125 por SPI.transfer (0x00)
- Deseleccionar el CS alto
- Combinar los 16 bits y mantener los 10 relevantes
- Convertir datos negativos en complemento a dos
- Convertir a grados Celsius.
- Declarar la función de lectura para el TMP75 que incluye:
 - Un arreglo para la lectura de los bytes
 - Inicio de la comunicación y el registro de temperatura
 - Leer los dos bytes al TMP75
 - Leer el bit más significativo y el menos significativo
 - Combinar los datos y calcular temperatura
 - Convertir a grados Celsius.

En ambos casos de los códigos se consideran los ajustes necesarios para el ESP32 como ajustar los pines I2C, donde se define “SDA_PIN 21” (Que es el GPIO 21) y “SLC_PIN 22” (Que es el GPIO 22).

4.6 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Una vez lograda la comunicación del Arduino con ambos sensores digitales el TMP75 y el TMP125, se realizaron las pruebas de funcionamiento, que a grandes rasgos constaba de lo siguiente:

En primer lugar, tendríamos 4 dispositivos que medirían la temperatura:

- TMP125
- TMP75
- MAX31865EVKIT
- TA612C

Este último como referencia de la temperatura real dado sus especificaciones es un instrumento de medición de temperatura altamente preciso. Posterior a tener todo conectado por Arduino y la placa del MAX31865EVKIT con su respectivo termistor PT100 procedimos a medir dentro de una cámara de temperatura controlada, esto con cada de uno de los sensores tocando una placa metálica para mejorar la precisión de todos los sensores.



Figura 27. Mediciones con los cuatro dispositivos.

Si bien hay resultados muy parecidos en las mediciones más adelante hablaremos de lo que representan estas mediciones para la investigación, y como afecta en la precisión de la medición.

CAPITULO 5. RESULTADOS

5.1 MEDICIONES

Para las tres muestras que se muestran en las Figuras 28, 29 y 30 los sensores estaban dentro de un refrigerador marca Cooluli, con capacidad de calentar y enfriar bajando hasta 4°C y un máximo de 65°C , el cual fue conectado al inicio de la primera prueba que duró 35 min con muestreo cada segundo, la segunda prueba duró 15 s para observar el estado transitorio de los sensores con muestras cada 100 ms y la última prueba duró 10 min con una muestra de datos cada 10 s .

Durante las tres pruebas los sensores y los termopares del termómetro TA612C estaban sujetos por dos placas de metal, esto dado a las propiedades físicas del material que ayudarían a mantener condiciones más estables térmicamente, no se cambiaron de posición. Por otro lado, el canal 1 del termómetro TA612C siempre estuvo puesto en una placa de metal a temperatura ambiente, solo como referencia de como bajaba la temperatura del refrigerador.

Tabla 2. Tabla de comparaciones de especificaciones de los termómetros TMP125, TMP75 y TA612c.

Especificaciones	Termopares		
	TMP125	TMP75	TA612C
Precisión	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2\% + 0.7^{\circ}\text{C}$
Resolución	10 bits, 0.25°C	seleccionable 9-12 bits, 0.0625°C	0.1°C , 0.1°F
Rango de operación	-25°C a 85°C	-40°C a 125°C	-200°C a 1372°C
	-40°C a 125°C		

Para llevar a cabo las mediciones, partimos de que el canal 1 del termómetro TA612C estaba en temperatura ambiente y el canal 2 dentro del refrigerador, a su vez también los sensores digitales TMP125 y TMP75 se encontraban dentro de este refrigerador. Tanto los termopares como los sensores estaban en una placa metálica, dado que esto ayudaría a mantenerlos en condiciones más

estables, como una buena conductividad térmica, una mejor distribución de temperatura, protección contra interferencias, esto gracias a las mismas propiedades físicas del material.

La primera parte de las mediciones que se ve en la Figura 28, se muestra el comportamiento de los sensores TA612, TMP125 y TMP75, esta prueba se realizó con un muestreo por segundo y durante 35 min, obteniendo un total de 2167 datos, partiendo en dicho experimento de que el refrigerador estaba a temperatura ambiente al momento de iniciar las pruebas, esto con la finalidad de observar el comportamiento de los sensores vs. los termopares en las mismas condiciones en las que la temperatura dentro del refrigerador baje uniformemente.

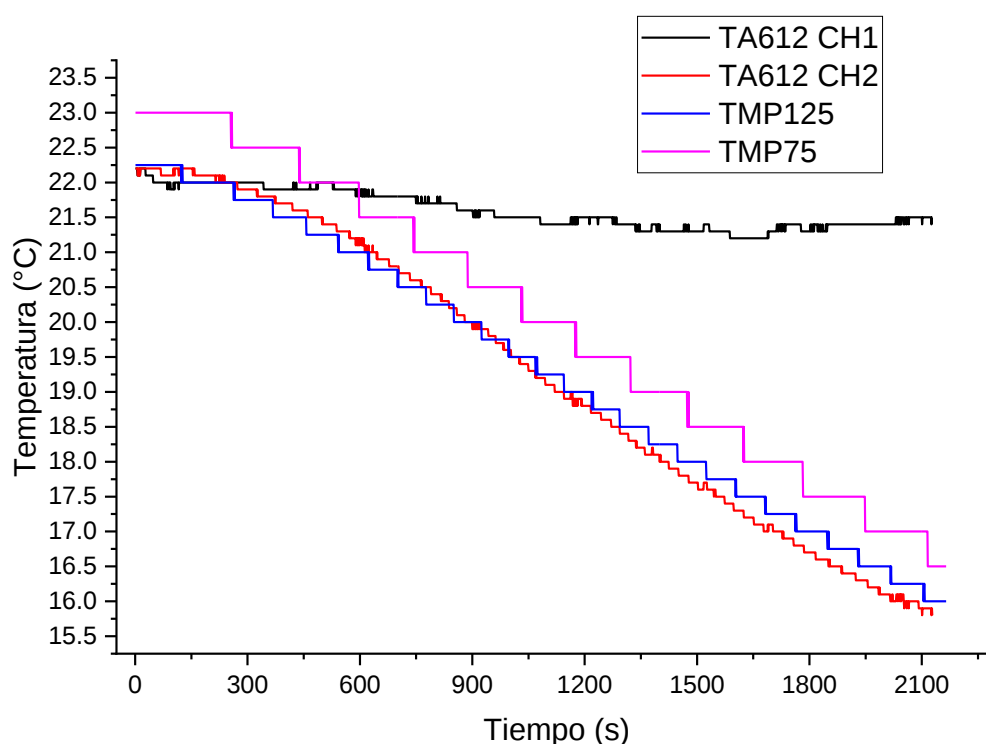


Figura 28. Comparación de sensores TMP125 Y 75 VS. Termómetro TASI TA612c.

Cabe señalar que el sensor TMP75 se encontraba seleccionado con una resolución de 10 bits. Con lo señalado en la Tabla 2, aunque se especifica que el TMP75 cuenta con mayor resolución y precisión que el TMP125, en las condiciones que se encontraba el TMP75 es quien más se asemeja

al TA612. Además, también se observa que tanto el TA612 como los sensores TMP125 y TMP75 se comportan de la misma manera conforme el refrigerador empieza a disminuir su temperatura.

Otra medición que se realizó fue la comparación del estado transitorio de los sensores TMP75 Y TMP125, así como del termómetro TA612C. Dichos datos fueron obtenidos durante los primeros 15 s, para observar el comportamiento en estado transitorio. La adquisición de datos fue con un muestreo de cada 100 ms (para todo este trabajo de tesis y con el objetivo de que todas las mediciones sean repetibles, se hace uso del mismo refrigerador, con la misma placa de metal y a la misma distancia que las anteriores pruebas) los datos son presentados en la gráfica de la Figura 29, el cambio de temperatura inicial es dado que con el paso del tiempo entre la pasada (Figura 28) y esta medición el refrigerador seguía en el proceso de enfriamiento. En esta medición se obtuvieron un total de 170 datos, y como se puede observar a pesar de ser desconectados para notar algún posible cambio, se nota la estabilidad con la que dichos sensores cuentan.

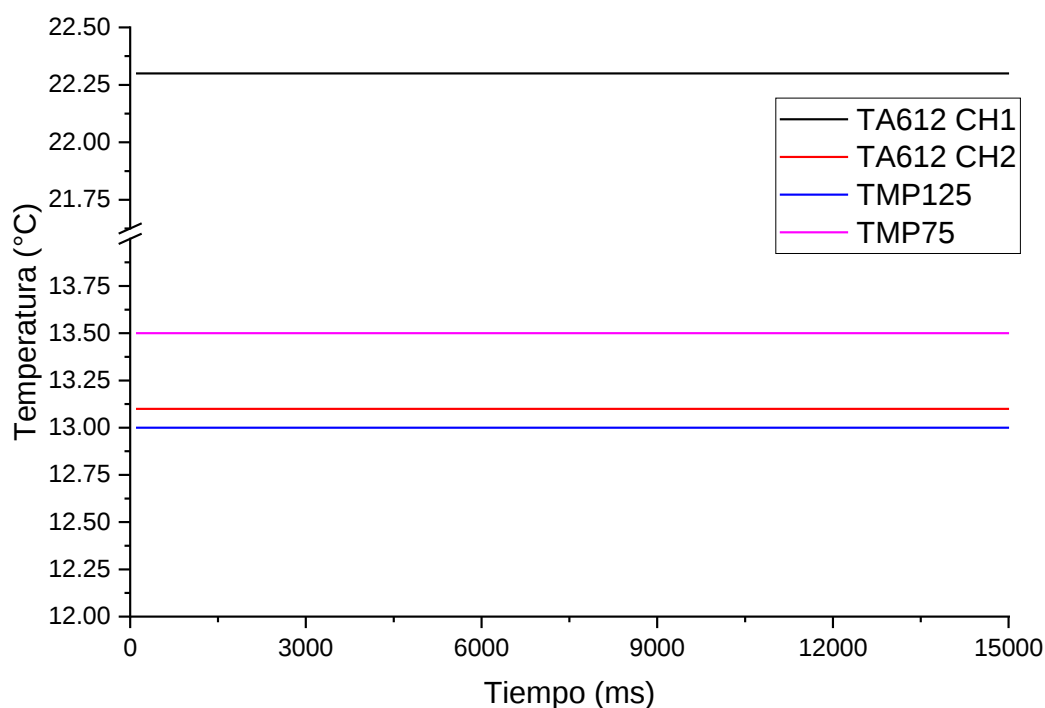


Figura 29. Comparación de sensores TMP75 y TMP125 con termómetro TA612c en los primeros 15 segundos de medición.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y partiendo de que se tiene una temperatura estable dentro del refrigerador (habiendo pasado las mediciones de las Figura 28 y 29). Se procedió a realizar una medición con un muestreo de 10 s durante un periodo de 10 *min*, obteniendo un total de 60 datos mostrados en la gráfica de la Figura 30.

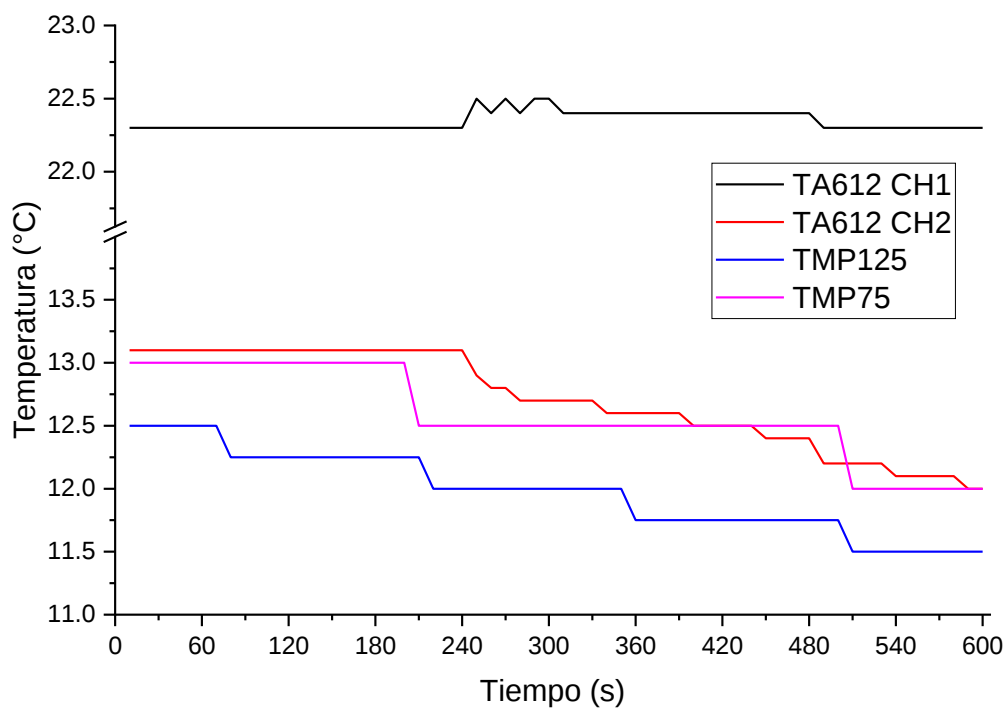


Figura 30. Comparación de sensores TMP75, TMP125 con Termómetro TA612c durante 10 minutos.

Donde se puede observar que todos los datos obtenidos son lo suficientemente estables en la medida de sus especificaciones dado que su resolución varía entre uno y otro, llevando a cabo la comparación entre ambos sensores de temperatura TMP75 Y TMP125 vs. el termómetro TA612C dado que este último cuenta con mejor resolución, se tiene que el TMP75 se acerca a las medidas del TA612C.

5.2 COMPARACIÓN DE COMPLEMENTOS: KIT DE EVALUACIÓN DE MAX31865 vs. ARDUINO EN RESOLUCIÓN DE 8 BITS

Entre las opciones que se evaluaron se trabajó con Arduino UNO, MEGA y DUE, este último mencionado es capaz de cambiar la resolución del convertidor, por lo que para los estudios en esta tesis se utilizó como referencia el Arduino DUE.

La manera en que se realiza este cambio de resolución es con la instrucción `AnalogReadResolution` (8), donde el número que se encuentra dentro del paréntesis establece la resolución del ADC a 8 bits. Otra consideración que se realizó fue el de leer los 8 bits de los sensores dado que el TMP75 cuenta con una resolución de 10 bits y el TMP125 se puede seleccionar entre 9 y 12 bits entonces se podría leer solo los 8 bits, descartando los menos significativos.

Aunque el Arduino MEGA y el Arduino UNO tienen una resolución fija de 10 *bits*, pero se podría trabajar dividiendo el valor leído por 4. También es posible cambiar la resolución de los sensores, como es el caso del TMP75 donde es posible cambiarlos entre 9, 10, 11 o 12 *bits*, pero esto conlleva a tener un impacto directo en la velocidad de conversión (tasa de cambio). En la Tabla 3 se tiene el tiempo de conversión que hay que considerar en la parte del muestreo dependiendo de la resolución que se elija.

Tabla 3. Cambio de resolución TMP75.

Resolución	Incremento (°C)	Tiempo de conversión
9	0.5	27.5 ms
10	0.25	55 ms
11	0.125	110 ms
12	0.0625	220 ms

En este punto del trabajo de tesis se planteó la necesidad de utilizar un ADC externo, con la finalidad de obtener una mayor precisión como lo es un ADS1115, con el que pudiese mejorar la resolución de las muestras, pero consideramos la hipótesis que al utilizar el Arduino DUE será suficiente para reafirmar o negar las posibles alteraciones cambiando la resolución del convertidor del Arduino.

5.3 CALIBRACIÓN DEL PT100

Para la toma de mediciones y a su vez la calibración o caracterización del termistor PT100, se optó por realizar las mediciones con un muestreo de 1 s durante 10 *min*, de lo cual el encargado de medir la temperatura de fue el termistor PT100 (que cuenta con una relación de resistencia en Ω con la temperatura), conectado a un multímetro UNI-T UT117C y de la temperatura la referencia el termómetro TA612C, de esta manera se tiene una temperatura de referencia y los datos que se obtienen con el Arduino DUE. Para la graficas se utilizó el software OriginLab Pro, además con este mismo software se pudo obtener las variables del modelo que define la relación entre la temperatura y resistencia del PT100 planteadas en la Ec.1.

El medio dentro del cual se realizaron las mediciones fue en un refrigerador capaz de enfriar y calentar, en este caso se optó por la función de calor, tanto el TP100 como el termopar tipo K del termómetro TA612C se colocaron en un bloque metálico asegurando que ambos sensores se encuentran a la misma temperatura, y al mismo tiempo evitar problemas de inercia térmica.

Considerando que por parte del multímetro UNI-T UT117C cuenta con las siguientes características específicas para la prueba:

- Monitor digital de hasta 60,000 cuentas (lecturas).
- Precisión de $\pm (0.5 \% + 5)$ en resistencia.

Teniendo esto en consideración, la gráfica obtenida de los datos es presentado en la Figura 32.

Por otro lado, hablando del TA612C referente de la muestra en temperatura, tenemos:

- Precisión de $\pm (0.2 \% + 0.7 ^\circ C)$.

Teniendo esto en consideración, la gráfica obtenida de los datos es presentado en la Figura 31.

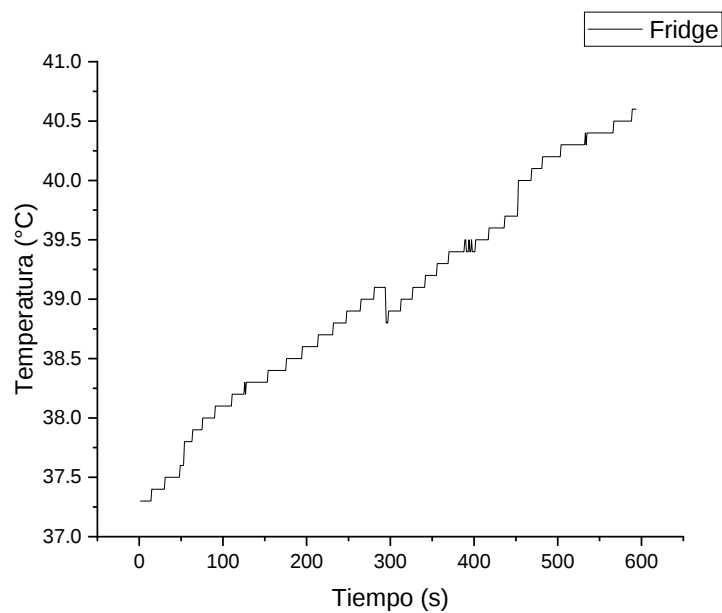


Figura 31. Temperatura de referencia con termómetro TA612C.

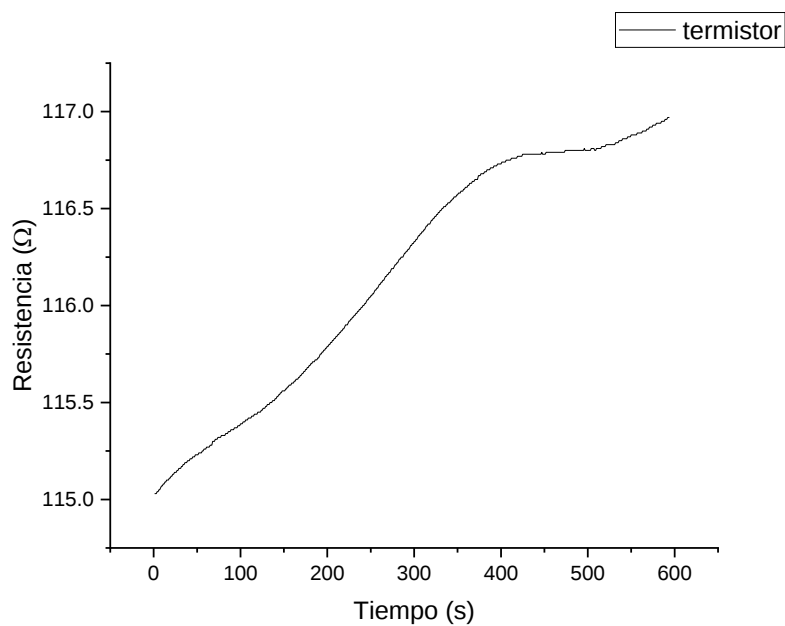


Figura 32. Resistencia de PT100.

De acuerdo con las especificaciones del PT100 el modelo es el mismo, pero los valores de los coeficientes A_0 , A_1 y A_2 también hay que calcularlos, por ello la importancia y necesidad de caracterizar el PT100. Obtenido esto podremos pasar el siguiente paso que es tener las temperaturas con el Arduino DUE.

5.3.1 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL PT100

Para obtener el modelo matemático del PT100 es necesario llevar a cabo mediciones experimentales, esto para poder tomar en cuenta las resistencias parasitas debidas a los cables, soldaduras y demás componentes electrónicos conectados al sensor de temperatura.

Para poder medir la resistencia del PT100 mediante un microcontrolador, es necesario transformar los cambios de resistencia en cambios de voltaje [29], para ello se tuvo que realizar un divisor de voltaje en cual se conforma por una resistencia de referencia conectado a un voltaje fijo, después de la resistencia de referencia estará el punto de conexión de irá al pin analógico del convertidor $A0$, del mismo punto partirá el PT100 conectado a tierra. De dicho punto se obtiene un valor de voltaje que será interpretado para saber la temperatura.

Para los divisores de voltaje donde utilizan al PT100 conectado a tierra (R_{PT100}) y la resistencia de referencia (R_R) el voltaje de salida está dado por:

$$V_{out} = \frac{R_{PT100}}{R_R + R_{PT100}} V_{cc} \quad Ec. 4$$

Siendo los valores de:

$$R_R = 100 \, \Omega,$$

$$R_T = PT100 \text{ (la cual es la que varía conforme la temperatura) y}$$

$$V_{cc} = 3.3.$$

Estos valores analógicos adquiridos son llevados a la conversión a voltaje digital multiplicando este último valor por ($V_{cc}/1023$ en caso de 10 *bits*) en el Arduino DUE.

En la Figura 33 podemos observar los valores de resistencias experimentales las cuales son obtenidas con el PT100 vs. la temperatura de referencia fue obtenida con el termómetro TA612 C.

Ahora bien, usando los primeros dos términos de la Ec.3 podemos encontrar los valores de R_0 , A , siendo el producto de estos dos términos la pendiente de la recta obtenida de un ajuste lineal, la Figura 33 muestra el ajuste lineal indicada con una línea continua de color roja, dicho ajuste lineal se realizó tomando cada uno de los datos adquiridos,

$$R_0 A = \frac{R_{100} - R_0}{100} \quad \text{Ec. 5}$$

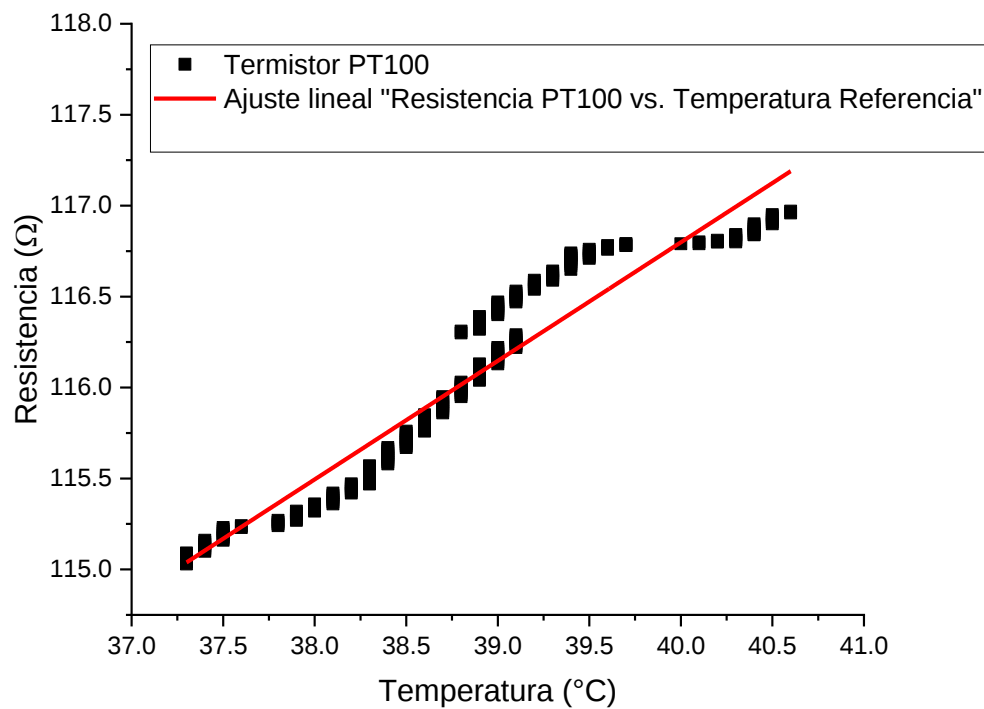


Figura 33. Ajuste de la señal de la temperatura de referencia vs. la señal de la resistencia del PT100 (cuadros solidos de color negro) para la obtención de variables A y B de la Ec.3.

De la misma relación de la Figura 33, pero esta vez usando los ejes invertidos y usando los primeros tres términos de la Ec. 1 podemos ajustar una ecuación de una parábola donde obtenemos los valores de los coeficientes A_0 , A_1 y A_2 . Ya obtenidos estos coeficientes podemos calcular el valor de temperaturas que son obtenidas con los valores experimentales de las resistencias con el PT100.

Tanto los valores de las temperaturas calculadas con los valores de A con el ajuste lineal de la Ec.3 y con la relación de la Ec.5 que se presentan en círculos vacíos de color rojo en la Figura 34, como con los valores calculados de A_0 , A_1 y A_2 de la ecuación cuadrática que se muestran en círculos vacíos de color azul en la Figura 34, las graficamos junto con la relación de la señal de referencias vs. la señal de temperatura de referencia obtenidas con el termómetro TA612C.

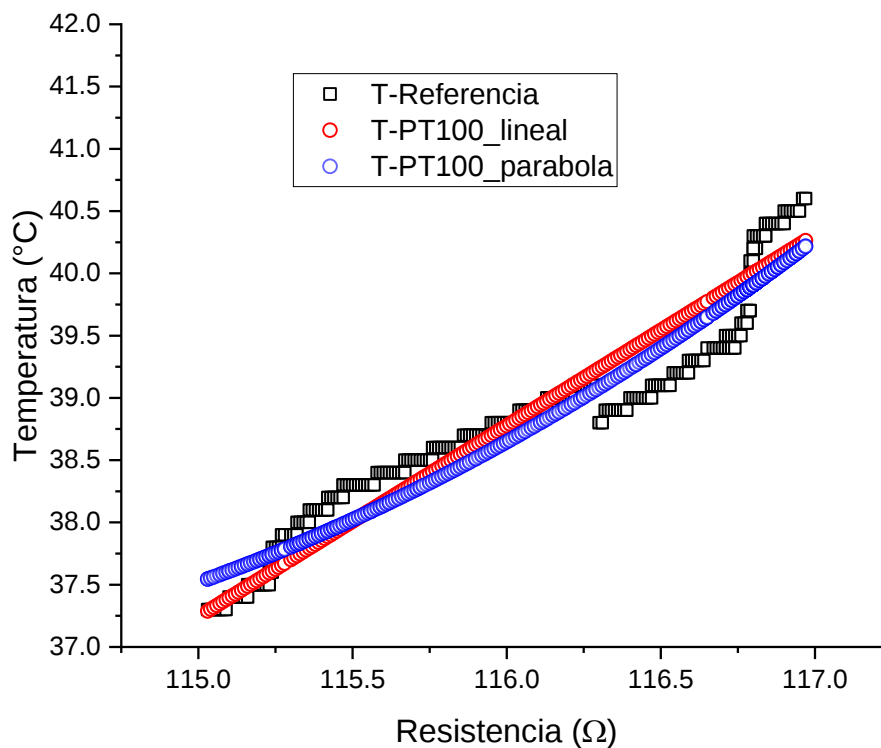


Figura 34. Ajuste de la señal de resistencia del PT100 (cuadros solidos de color negro) vs. la temperatura de referencia para la obtención de variables A y B de la Ec.3

5.4 PRUEBAS CON EL ESP32

Para comparar que pasa cuando al Arduino Due se le cambia la resolución, se llevaron a cabo mediciones con el ESP32 el cual tiene un convertidor de 9 a 12 *bits* y que puede ser ajustado bajo el comando de *AnalogReadResolution()*; y a la par con el MAX31865 EVALUTION KIT con Arduino DUE su mínima resolución de 8 bits y en su máxima resolución de 12 bits.

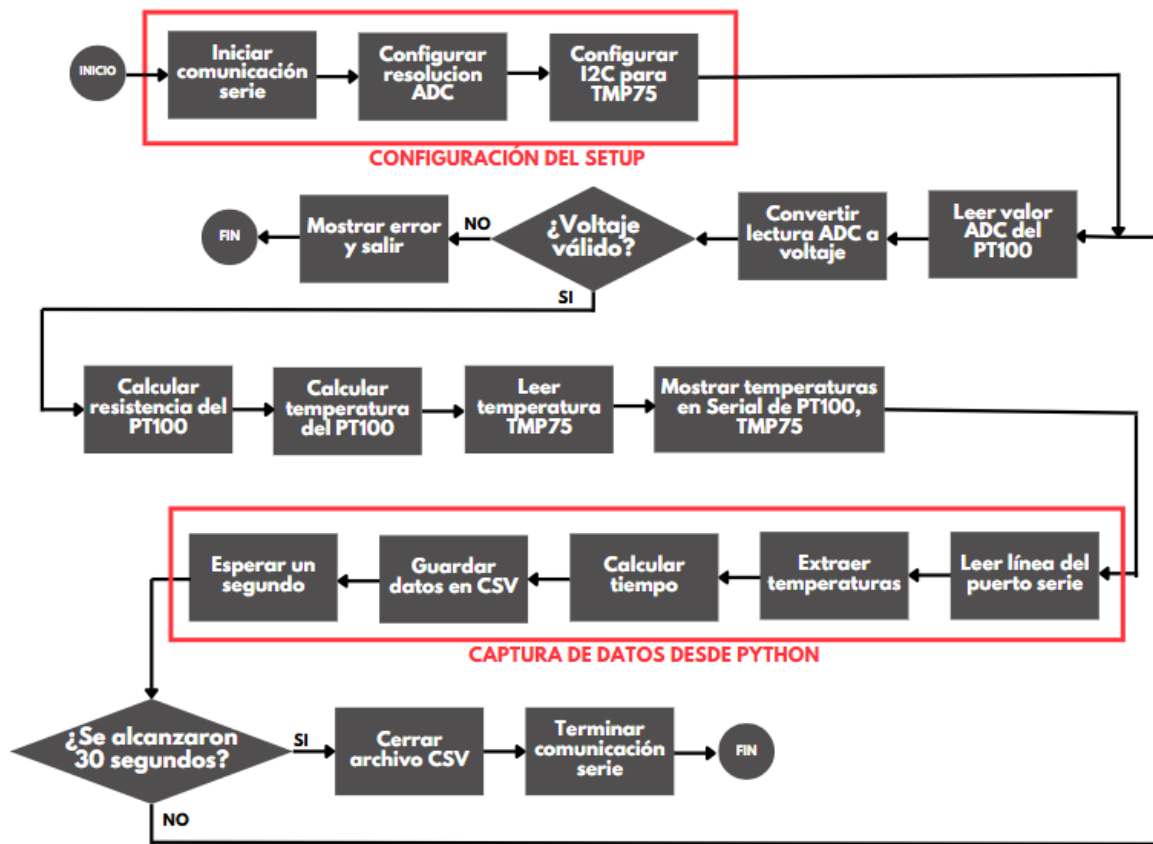


Figura 35. Diagrama de pasos realizados en el código para la comunicación, lectura de datos con Arduino DUE, TMP75 y el cambio de resolución.

El diagrama de la Figura 35 muestra cómo se realizó la lectura de manera serial, se comenzó configurando el convertidor analógico- digital para que proporcione un ADC de 8 bits (o la que se especifique cuando sea el Arduino DUE o el ESP32) y se configura la comunicación I2C para el sensor digital TMP75 como se mencionó en el capítulo anterior de este trabajo de tesis. Luego se procede a leer el valor del TMP75 por 30 s y a la vez la resistencia del PT100 que se convirtió a valores de

temperatura por los mismos 30 s, para luego cambiar la resolución y nuevamente llevar a cabo la medición. Este cambio también se puede ver en la Figura 36, además de que resoluciones se puede seleccionar.

Para llevar a cabo las mediciones con los pasos mostrados en la Figura 35, se introdujeron y fijaron los sensores TMP75 y el PT100 en la cámara controlada que fue usada anteriormente, con el objetivo de existiera la menor interferencia externa o vibraciones, se procedió a la lectura del TMP75 y del PT100. El PT100 fue conectado a un Arduino DUE y al ESP32, para poder elegir con cual es comparado (como se puede observar en el esquema mostrado en la Figura 36), todos los datos fueron registrados para luego graficarlos en OriginLab Pro.

Cabe mencionar que para conectar el PT100 se utilizó un divisor de tensión como lo reportamos anteriormente, esto se hizo tanto para trabajar con el Arduino DUE como con el ESP32.

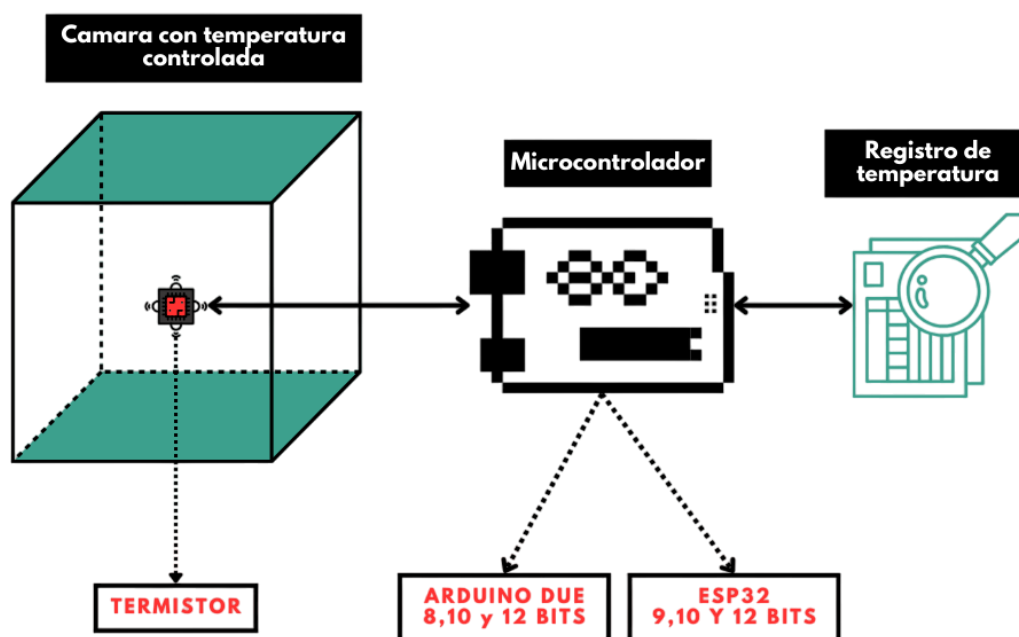


Figura 36. Esquema de colocación de sensores PT100 y TMP75, selección de convertidores analógico-digital (Arduino DUE o ESP32), cambio de resolución y registros de datos experimentales de temperatura.

Se realizaron mediciones usando el Arduino Due con PT100 que son mostrados en la Figura 37, con Arduino DUE configurado en 8 bits (línea rosa continua), 10 bits (línea azul punteada que es el

promedio de los datos adquiridos), 12 bits (línea roja punteada que es el promedio de los datos adquiridos) y la línea negra continua es el TMP75 configurado a una resolución de 8 bits.

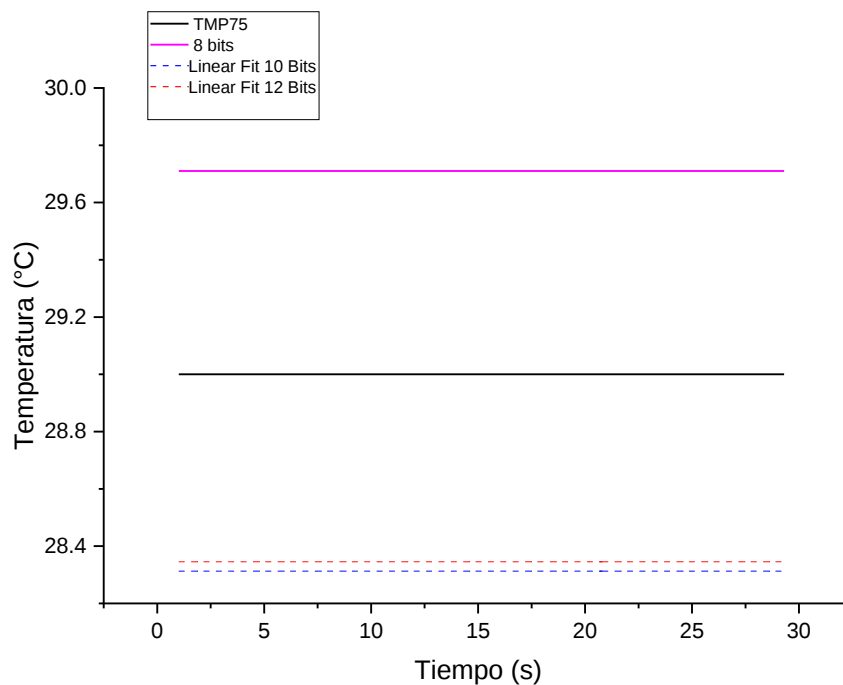


Figura 37. Temperatura obtenida con Arduino DUE leídas con diferentes resoluciones y TMP75 con una resolución de 8 bits.

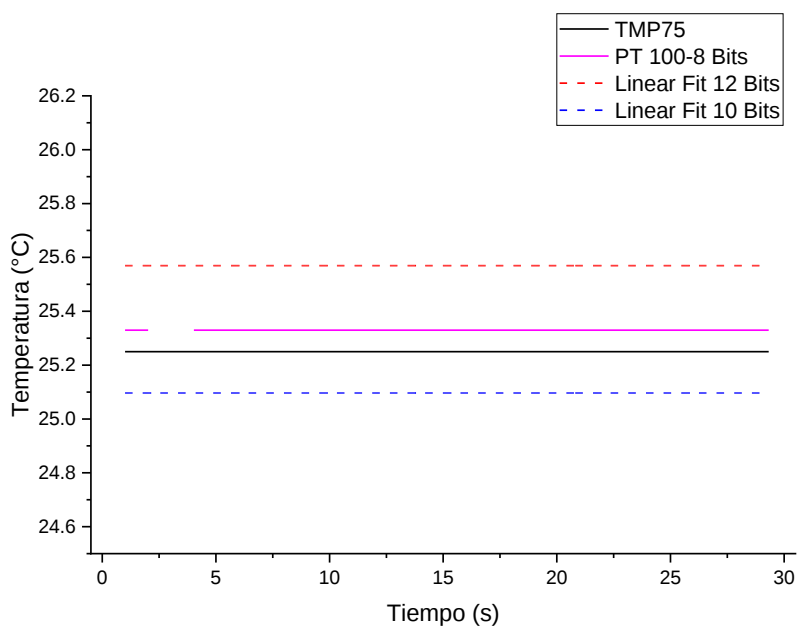


Figura 38. Temperatura obtenida con ESP32 con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 8 bits.

Las mediciones usando el ESP32 con PT100 son mostrados en la Figura 38, con ESP32 configurado en 9 bits (línea rosa continua), 10 bits (línea azul punteada), 12 bits (línea roja punteada) y la línea negra continua es el TMP75 configurado a una resolución de 8 bits.

Los datos de temperatura obtenidos del Arduino Due con PT100 son mostrados en la Figura 39, con Arduino configurado en 8 bits (línea rosa continua), 10 bits (línea azul continua), 12 bits (línea roja punteada que es el promedio de los datos adquiridos) y la línea negra punteada que es el promedio de los datos adquiridos es el TMP75 configurado a una resolución de 12 bits.

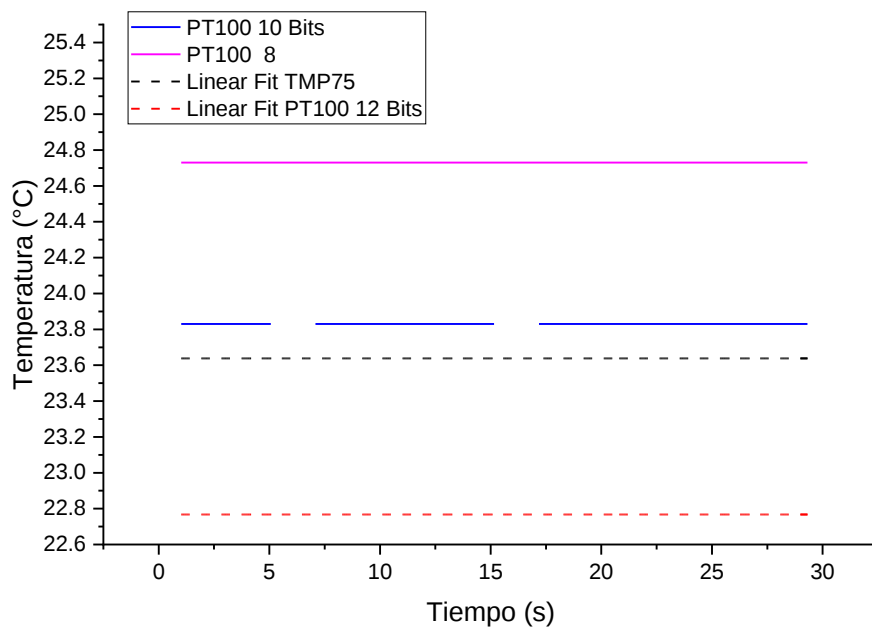


Figura 39. Temperatura obtenida con Arduino con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 12 bits.

Los datos de la temperatura usando ESP32 con PT100 son mostrados en la Figura 40, con ESP32 configurado en 9 bits (línea rosa continua), 10 bits (línea azul punteada que es el promedio de los datos adquiridos), 12 bits (línea roja punteada que es el promedio de los datos adquiridos) y la línea negra continua es el TMP75 configurado a una resolución de 12 bits.

Donde se observa que el TMP75 a su máxima o mínima resolución, el PT100 conectado a ESP32 en su mínima resolución es la que más se acerca al sistema de referencia.

La opción más conveniente conectando un PT100 usando Arduino DUE es tener en su configuración de 10 bits. a pesar de que el Arduino y el ESP32 tienen convertidores analógico digital con resoluciones similares, las mediciones indican que el valor obtenido en el ESP32 es más cercano al valor de referencia comparado con el del Arduino.

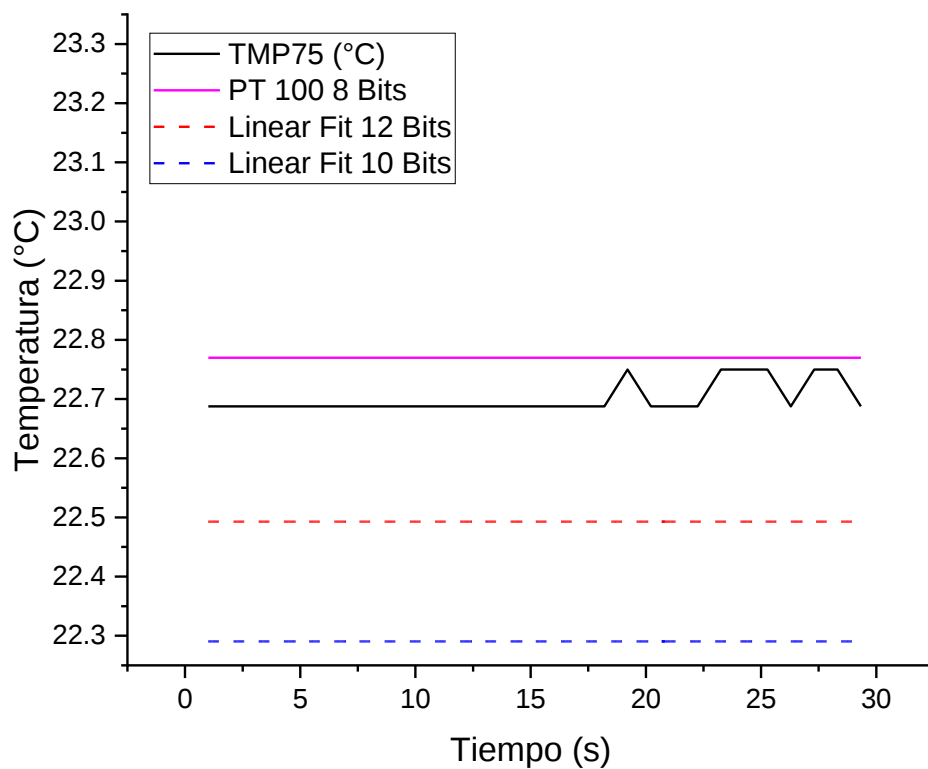


Figura 40. Temperatura obtenida con ESP32 con diferentes resoluciones y TMP75 con resolución de 12 bits.

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se muestran las variables que influyen en el comportamiento de un sensor de Hot-Ball, esto fue la base para el diseño de la electrónica de acondicionamiento para la medición precisa de termistores de uso industrial, con la finalidad de que sean empleados en equipos de laboratorio. Se centró en el estudio de las posibles causas que generan las inconsistencias y variaciones que se presentan en la instrumentación de esos sensores, lo que permitió identificar las fuentes que afectan o disminuyen la precisión de las mediciones de temperatura usando sensores resistivos, dando como resultado un diseño electrónico que minimiza los errores y genera la confiabilidad de las lecturas.

Por otra parte, también se analizaron diferentes tipos de sensores de temperatura que existen actualmente en el mercado, con la finalidad de comparar las características dadas por los fabricantes, ventajas y limitaciones. Además, se realizaron distintos prototipos electrónicos y que finalmente ayudaron a la selección de componentes para la etapa de acondicionamiento eléctrico en función de desempeño y compatibilidad que presentaron. Con esto se buscó cumplir con el objetivo de tener un diseño replicable apto para una eventual producción en serie, lo cual establece una base sólida para futuros desarrollos en la medición de temperatura con sensores resistivos.

Aunado a esto, se realizaron pruebas con diferentes con dos diferentes ADC con la finalidad de encontrar los parámetros adecuados dependiendo donde sea puesta y usada toda la instrumentación.

De este trabajo de tesis también se concluye el TMP35 consta de una buena resolución y que cuenta con las características del fabricante, además de tener la característica de que con su acondicionamiento resulta en un tamaño pequeño comparado el resto con los que fue comparado.

Otra parte que fue útil estudiar es la influencia de la configuración de las resoluciones que se colocan en al trabajar con Arduino DUE y con ESP32. Llegando a la conclusión que se puede trabajar con ESP32 en su mínima resolución, además de simplificar los diseños, necesita baja tensión para trabajar y ser capaz incluso de manejarse de manera inalámbrica.

También se estudió como tomando diferentes consideraciones en los modelos matemáticos para realizar la conversión de la resistencia obtenida experimentalmente a un valor de temperatura, puede hacer la diferencia en que tan cercano sea el valor a la temperatura real.

Los resultados demuestran que llevar a cabo una instrumentación eficiente y precisa para sensores resistivos es factible y a la vez viable, considerando las limitaciones actuales en la medición de temperatura y proponiendo soluciones para mejorar la confiabilidad, exactitud y precisión en aplicaciones industriales y de laboratorio.

Con la información obtenida se puede realizar una selección de parámetros, tipos de comunicación o bien, de que acondicionamiento debe contar un sensor resistivo, dependiendo que tan robusto o que tan sensible se necesite.

REFERENCIAS

- [1] D. Fidiríková and Ľ. Kubičár, “The use of the hot-ball method for observing the transport of moisture in porous stones”, *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 3, 2013, doi: 10.2478/v10189-012-0013-8.
- [2] U. Hammerschmidt, “Guarded Hot-Plate (GHP) Method”, *Int J Thermophysics*, vol. 23, no. 6, 2002.
- [3] Ľ. Kubičár, J. Hudec, and P. Dieška, “Monitoring the hygrothermal regime of the Church Saint James in Levoča,” *European Journal of Science and Theology*, vol. 12, no. 1, 2016.
- [4] L. Voisin and E. Marambio, “Conductividad Térmica y Ley de Fourier,” *Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, 2011.
- [5] L. Kubičár, V. Vretenár, V. Štofanič, and V. Boháč, “Hot-ball method for measuring thermal conductivity”, *International Journal of Thermophysics*, 2010. doi: 10.1007/s10765-008-0544-4.
- [6] J. Hudec, C. Glorieux, P. Dieška, and L. Kubičár, “Experimental comparison and validation of hot-ball method with guarded hot plate method on polyurethane foams,” in *AIP Conference Proceedings*, 2016. doi: 10.1063/1.4955239.
- [7] L. Kubičár, C. C. Anibarro, V. Vretenár, P. Dieška, I. Novák, and I. Chodák, “Monitoring of epoxy curing by a thermal-conductivity sensor based on the hot-ball transient method,” *Int J Thermophys*, vol. 33, no. 7, 2012, doi: 10.1007/s10765-012-1273-2.
- [8] Vlastimil Bohac *et al.*, Dvonka Vladimír and Veselý Michal, Eds., Podkylava, “Wireless device for monitoring the temperature-moisture regime in situ”, *Thermophysics*, 2014, Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, Oct. 2014, pp. 171–176.
- [9] D. Fidiríková and L. Kubičár, “Influence of water transport in different porous stones by transient hot-ball method,” in *17th Conference of Czech and Slovak Physicists, Proceedings*, 2011.
- [10] Culbertson David, Ohse Jeremy, Mark Everly, Quandt Jeremy, Pradun James, and Rohde John, “Elemento de calentador como sensor para control de temperatura en sistemas transitorios,” ES2805046T3, Feb. 10, 2021
- [11] Reich A and Stanley M, “Method and apparatus for measuring the thermal conductivity and thermo-electric properties of solid materials,” US3733887A, Jun. 31, 1972

- [12] Kuczmarski Maria and Miller Robert, "Method and apparatus for measuring thermal conductivity of small, highly insulating specimens," US8573835B2, Jun. 08, 2012
- [13] Roy K, Wheeler Robert, and Ganguli Sabyashachi, "Thermal conductivity measurement apparatus and related methods," US9696270B1, Jun. 09, 2014
- [14] Mathis Nancy and Chandler Christina, "Direct thermal conductivity measurement technique," US6676287B1, Aug. 07, 2002
- [15] Amagai Yasutaka, Fujiki Hiroyuki, Kaneko Nobuhisa, Yamamoto Atshushi, and Akashima Megumi, "Thermophysical property measurement method and thermophysical property measurement apparatus", US10088439B2, Jun. 06, 2014
- [16] E. Lugo, "Aplicaciones y características del termistor | Termistores PTC y NTC - Electronica Lugo," Electrónica Lugo.
- [17] Coughlin, R. F., Driscoll, F. F., & Flores, G. A. (1999). "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales". Prentice Hall.
- [18] J. Pickering, "Analogue to Digital and Digital to Analogue Converters (ADCs and DACs): A review update," in *CERN Accelerator School: Power Converters, CAS 2014 - Proceedings*, 2018. doi: 10.5170/CERN-2015-003.363.
- [19] T. L. Floyd, *Electronic Devices Electron Flow Version Ninth Edition*, vol. 53, no. 9. 2012.
- [20] William Russel and Huang Houde, "Sensor de flujo de termistor que tiene múltiples puntos de temperatura," ES2939736T3, Sep. 13, 2017
- [21] J. M. Fiore, *Operational amplifiers and linear integrated circuits: Theory and Application / 3E*, vol. 3, no. 9. 2018.
- [22] W. Kester, *Data Conversion HandBook*. 2005. doi: 10.1016/B978-0-7506-7841-4.X5000-3.
- [23] J. G. Webster, *Electrical measurement, signal processing, and displays*. 2003. doi: 10.1201/9780203009406.
- [24] H. Johnson and M. Graham, "High-speed digital design: a handbook of black magic," 1993.
- [25] R. S. Figliola and D. E. Beasley, "Theory and design for mechanical measurements," *Meas Sci Technol*, vol. 7, no. 7, 1996, doi: 10.1088/0957-0233/7/7/016.

- [26] M. G. N. Helles, "PT100 Temperature Sensor," *Global Electronics China*, vol. 8, no. 7423, 2003.
- [27] M. N. O. Sadiku and C. K. Alexander, *Fundamentals of Electrical Circuits*. 2009.
- [28] R. B. Northrop, *Introduction to instrumentation and measurements: Third Edition*. 2014. doi: 10.1201/9781315275239.
- [29] Arian control e instrumentación, "Conexión de la PT100," *ARIAN Control & Instrumentación*, vol. 4, 2011.
- [30] Ján Hudec, Peter Dieška, Vladimír Štofaník, Viliam Vretenár, Ľudovít Kubičár, , "Measurement Reliability and Accuracy Analysis of the Hot-ball Sensor", In proceedings of Meeting of the Thermophysical Society, Podkylava, 2014, 47 – 52.

Apéndice 1

Lista de componentes para la placa de acondicionamiento

Componentes para el MAX31865EVKIT:

- ✓ 4 capacitores de 0.1uf (0805)
- ✓ 3 capacitores de 10uf (0805)
- ✓ 2 capacitores de 10nf (0805)
- ✓ 1 capacitor de 1uf (0805)
- ✓ 1 capacitor de 220nf (0805)
- ✓ 1 led rojo (1206)
- ✓ 2 leds duales Kingbright APHB M2012SURKCGKC
- ✓ 1 diodo ROHM Semi RB060M-30TR
- ✓ 1 mini USB female de 5 pines
- ✓ 1 resistencia de 4k Ω (through hole de 1/8w)
- ✓ 1 resistencia de 1.2k Ω (0805)
- ✓ 9 resistencia de 0 Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 10 M Ω (0805)
- ✓ 2 resistencias de 560 Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 56k Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 45.3k Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 10k Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 4.7k Ω (0805)
- ✓ 2 resistencias de 330k Ω (0805)
- ✓ 1 resistencia de 2.2k Ω (0805)
- ✓ 1 convertidor RTD to digital Maxim MAX31865ATP+
- ✓ 1 microcontrolador Microchip PIC18LF2550-I/SO
- ✓ 1 interruptor de corriente de 50mA a 600mA Maxim MAX4995AAUT+
- ✓ 1 regulador LDO 500mA Maxim MAX8902BATA+
- ✓ 1 oscilador de 3.3V, 48MHz