



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019 Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“SISTEMA DE MEDICIÓN DE
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN LÍQUIDOS”.

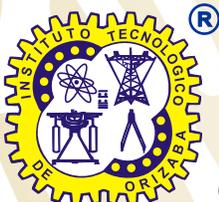
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Pablo Fernando Grajales Carrillo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

MARZO 2019



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 21/03/2019
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

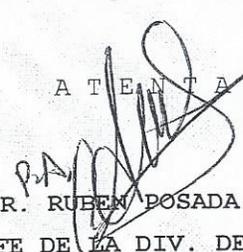
C. PABLO FERNANDO GRAJALES CARRILLO
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
INGENIERIA ELECTRONICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos 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:

"SISTEMA DE MEDICION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EN LIQUIDOS".

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

A T E N T A M E N T E


DR. RUBÉN POSADA GÓMEZ
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

C.A. TITULACIÓN



SECRETARIA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 19/03/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. DR. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

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

PABLO FERNANDO GRAJALES CARRILLO

la cual lleva el título de:

"SISTEMA DE MEDICION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EN LIQUIDOS".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. JOSE DE JESUS AGUSTIN FLORES

SECRETARIO : DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ

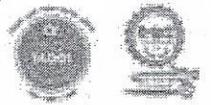
VOCAL : DR. ALBINO MARTINEZ SIBAJA

VOCAL SUP. : M.C. BLANCA ESTELA GONZALEZ SANCHEZ

[Handwritten signatures and marks over lines labeled FIRMA]

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRONICA

OPCION: I Tesis



Agradecimientos

A CONACYT, por el apoyo económico otorgado para mi formación académica en la Maestría en Ingeniería Electrónica, con el cual pude solventar gastos referentes a mi tema de tesis.

Especial agradecimiento, a mi asesor, el Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle, ya que, gracias a su ayuda, consejos y guía, hoy consigo una formación como Maestro en Ingeniería Electrónica. Un ejemplo a seguir, esperando algún día llegar a ser un investigador como él.

Dedicatorias

A mis padres, puesto que siempre han estado presentes en mi vida, dando lo mejor de ellos mismos para verme triunfar y salir a delante, por tanto, hoy quiero dedicar este trabajo como un detalle del esfuerzo realizado tanto de ellos como el mío.

A mi novia, ahora mi esposa, la mujer que ha estado para mí a lo largo de mi formación académica, apoyándome y dándome ánimos para seguir a delante ante las adversidades, por lo tanto, le dedico de igual forma este escrito como muestra de gratitud y amor hacia ella.

A mis amigos de generación, ya que, gracias a la ayuda mutua brindada, muchos problemas y dudas fueron posibles de solucionarse. A demás que, gracias a ellos los días de trabajo en el laboratorio fueron más amenos por las ocurrencias que decían y realizaban.



RESUMEN

La medición de la conductividad térmica hoy en día es de gran importancia en los diferentes procesos industriales o científicos que estén relacionados con la transferencia térmica, la obtención de datos relacionados con esta propiedad puede llevarse a cabo mediante un sistema especializado en las mediciones térmicas. Bajo este argumento, en el presente trabajo se aborda la posibilidad de diseñar un sistema de medición de dicha propiedad en líquidos, incluyendo dentro de este sistema la técnica llamada *Hot-Ball* (HB). Esto con el objetivo de recabar información sobre dicha propiedad de manera confiable. Además, se hace necesaria la implementación de una cámara térmica que mantenga estable la temperatura del sistema, de esta manera se asegura una medición más confiable.



ABSTRACT

Nowadays, the measurement of the thermal conductivity is of great importance in the different industrial and scientific processes that are closely related with temperature transfer, data can be obtained by means of a system specialized in the thermal measurements. Under this argument, the present work addresses the possibility of designing a system for measuring of such property in liquids, including within this system the so-called Hot-Ball (HB) technique. This is done with the aim of gathering information about thermal property in a trustable manner. In addition, it is necessary to implement a thermal chamber that maintains the temperature inside the chamber, thus ensuring more accurate measurements.



Índice

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL	8
1.1 Problemática.....	8
1.2 Estado del arte.....	8
1.3 Estado del campo.....	17
1.4 Hipótesis	19
1.5 Objetivos	19
1.6 Justificación del Proyecto.....	19
1.7 Alcances y Limitaciones	20
1.8 Cronograma.....	20
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	21
2.1 Temperatura.....	21
2.2 Energía térmica.....	21
2.3 Calor	21
2.4 Transferencia de calor:.....	22
2.4.1 Conducción	22
2.4.2 Convección.....	22
2.4.3 Radiación.....	23
2.5 Propiedades térmicas	24
2.5.1 Conductividad térmica.....	24
2.5.2 Calor específico	24
2.5.3 Efusividad térmica.....	25
2.5.4 Difusividad térmica.....	25
2.6 Sensores Térmicos.....	26
2.6.1 Termistor.....	26
2.6.2 Detector de temperatura resistivo.....	26
2.7 Sistema aislado.....	27
2.8 Sistema de control.....	27
2.8.1 Sistema de control en lazo abierto	27
2.8.2 Sistema de control en lazo cerrado.....	28
2.8.3 Tipos de controladores.....	28
2.8.3.1 Control Proporcional.....	28
2.8.3.2 Control Integral.....	29
2.8.3.3 Control Derivativo.....	29



2.8.4 Control PI.....	30
2.9 Celda Peltier.....	30
2.9.1 Efecto Peltier.....	32
2.10 Puente H.....	32
2.10.1 Puente H mediante MOSFET.....	33
2.11 Modelado matemático.....	34
2.11.1 Método Mínimos cuadrados.....	34
2.11.2 Coeficiente de determinación de ajuste.....	35
CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO.....	36
3.1 Diseño de Puente H.....	36
3.1.1 Simulación de puente H en Multisim.....	36
3.1.2 Diseño PCB en Ultiboard del Puente H.....	37
3.2 Diseño y configuración del sensor digital de temperatura.....	40
3.2.1 Configuración teórica del sensor digital.....	40
3.2.1.1 Configuración por Hardware.....	40
3.2.1.2 Configuración teórica por software.....	41
3.2.2 Diseño del PCB del sensor ADT7420.....	42
3.3 Diseño del circuito acondicionador de señal para sensor PT1000.....	43
3.3.1 Diseño del PCB del circuito acondicionador de señal.....	48
3.4 Diseño de la cámara térmica.....	49
3.4.1 Posicionamiento de los dispositivos electrónicos.....	52
3.5 Diseño del control de temperatura para la cámara térmica.....	53
3.5.1 Controlador PID analógico.....	53
3.5.2 Controlador PID digital.....	56
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	59
4.1 Manufactura, acondicionamiento e instrumentación de la cámara térmica.....	59
4.1.1 Manufactura de la cámara térmica.....	59
4.1.2 Ensamble de la cámara térmica.....	61
4.1.3 Acondicionamiento térmico e instrumentación de la cámara térmica.....	61
4.2 Programación LabVIEW.....	64
4.2.1 Programación Sensor Digital ADT7420 – NI myRIO.....	64
4.2.2 Programación control PID de temperatura.....	64
4.3 Pruebas de control de temperatura.....	67
4.4 Manufactura del sensor Hot-Ball.....	68
4.4.1 Pruebas de funcionamiento del Sensor Hot-Ball.....	71
4.4.2 Activación del sensor Hot-Ball.....	72



4.5 Caracterización del termistor	73
4.5.1 VI manejo Multímetro HP34401	73
4.5.2 Obtención de la curva característica del termistor	74
4.6 Modelo matemático	75
4.7 Calculo del error	77
4.7.1 Error cuadrático medio	77
4.7.2 Calculo del coeficiente de determinación de ajuste	78
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	80
5.1 Análisis del comportamiento de la cámara de aislamiento térmico	80
5.2 Puesta en marcha y análisis del sistema de medición de conductividad térmica en líquidos	81
5.2.1 Calibración del sensor Hot-Ball	81
5.2.2 Determinación y validación del valor de la conductividad térmica	85
CONCLUSIONES.....	88
Apéndice A	91
Apéndice C	94
Apéndice D	96
Apéndice F	97
Apéndice G	98
Apéndice H	100
Apéndice I	102



Índice de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático del método THW para la medición de la conductividad térmica en nanofluidos [2].	9
Figura 2. Micrografía de nanopartículas de Oxido de Aluminio utilizadas en el estudio de la conductividad térmica [2].	10
Figura 3. Dimensiones del alambre de platino utilizado en medición de gases con técnica HW [4].	11
Figura 4. Grafica de desviación en la medición de la conductividad térmica con alambre largo (LW), alambre corto (SW) y doble alambre (DW) utilizados en la técnica HW [6].	12
Figura 5. Estructura básica de la técnica Hot Plate [9].	13
Figura 6. Vista seccionada del dispositivo HP para la medición de la efusividad térmica en fibras naturales [12].	14
Figura 7. Diagrama esquemático del HP con módulo Peltier [13].	14
Figura 8. Diagrama del Hot-Ball (r_b -radio del sensor HB, R-capacidad de penetración de calor) y respuesta de temperatura correspondiente a la salida [14].	15
Figura 9. Medición de la conductividad térmica en nanofluidos con diferente concentración de nanopartículas de plata [15].	16
Figura 10. Diagrama esquemático de la técnica de medición directa de la conductividad térmica [17].	17
Figura 11. Diagrama de esquemático: instrumento de medición de flujo de calor [18].	18
Figura 12. Transferencia de calor por conducción.	22
Figura 13. Transferencia de calor por convección.	23
Figura 14. Transferencia de calor por Radiación	23
Figura 15. Esquema de conductividad térmica	24
Figura 16. Representación esquemática de Calor específico.	25
Figura 17. Símbolo eléctrico del termistor.	26
Figura 18. Símbolo eléctrico RTD	27
Figura 19. Sistema de control en lazo abierto.	27
Figura 20. Sistema de control en lazo cerrado	28
Figura 21. Control Proporcional Integral	30
Figura 22. Estructura de una celda Peltier.	31
Figura 23. Acumulación y enrarecimiento de portadores de carga cerca de la unión metal semiconductor en una celda Peltier.	32
Figura 24. Efecto Peltier al circular una corriente	32
Figura 25. Funcionamiento Puente H.	33
Figura 26. Diagrama Puente H utilizando MOSFET.	33
Figura 27. Ejemplo de la ejecución del método de mínimos cuadrados.	34
Figura 28. Diseño del Puente H en Multisim	36
Figura 29. Simulación Puente H caso A	37
Figura 30. Simulación Puente H caso B	37
Figura 31. Diseño PBC puente H.	39
Figura 32. Manufactura del PCB puente H.	39
Figura 33. Diagrama pines conexión de sensor.	40
Figura 34. Diagrama de flujo de la configuración por software del sensor	41
Figura 35. Diagrama esquemático del sensor	42
Figura 36. Manufacturara del PCB sensor ADT7420.	43
Figura 37. Circuito para establecimiento de corriente para el sensor PT1000	43
Figura 38 Simulación de la primera parte del circuito propuesto	44
Figura 39. Simulación implementación de un amplificador de instrumentación.	45
Figura 40. Circuito escalador de voltaje.	47
Figura 41. Simulación del circuito acondicionador de señal para un sensor PT1000.	48
Figura 42. Manufactura del PCB circuito acondicionador	49
Figura 43. Diseño de la carcasa externa de la cámara térmica.	50
Figura 44. Diseño carcasa interna de la cámara térmica.	50



Figura 45. Aislamiento térmico interno (material blanco) de la cámara térmica.....	51
Figura 46. Diseño final de la cámara térmica.....	52
Figura 47. Posicionamiento de dispositivos internos de la cámara.	52
Figura 48. Diagrama a bloques del sistema.....	54
Figura 49. Posicionamiento de polos y ceros de control	54
Figura 50. Simulación del controlador PID analógico.	56
Figura 51. Simulación PID digital (azul) vs PID analógico (rojo)	57
Figura 52. Fresadora CNC	60
Figura 53. Manufactura de la cámara térmica	60
Figura 54. Ensamble de la cámara térmica	61
Figura 55. Acondicionamiento térmico y posicionamiento de los componentes electrónicos	62
Figura 56. Diagrama esquemático de conexión de la cámara térmica.....	63
Figura 57. Conexión FPGA - Componentes	63
Figura 58. Interfaz de usuario del control de temperatura	66
Figura 59. Interfaz visual base de datos.	67
Figura 60. Interconexión PC – Cámara térmica – Fuente de alimentación.	67
Figura 61. Grafica respuesta del control de temperatura, se muestra adicionalmente un acercamiento.	68
Figura 62. Material de construcción del Sensor Hot-Ball (Balines de acero)	69
Figura 63. Carcasa del sensor Hot-Ball	69
Figura 64. Colocación de los dispositivos electrónicos.....	70
Figura 65. Vista del Sensor Hot-Ball fabricado	71
Figura 66. Pruebas de funcionamiento del sensor Hot-Ball.....	71
Figura 67. Circuito activación Hot-ball.	72
Figura 68. Interfaz del VI manejo multímetro HP34401	74
Figura 69. Datos estadísticos obtenidos	74
Figura 70. Curva característica del termistor NTC.....	75
Figura 71. Ajuste de los modelos matemáticos calculados para termistor.....	77
Figura 72. Varianza de los datos experimentales.	78
Figura 73. Análisis de la respuesta de control de temperatura al interior de la cámara térmica.....	80
Figura 74. Puesta en funcionamiento del sistema de medición de conductividad térmica.....	82
Figura 75. Diagrama, pasos para la calibración del sensor.....	82
Figura 76. Proceso de corrección de datos.	84
Figura 77. Ajuste, curva de calibración	85
Figura 78. Diagrama, pasos para la determinación de la conductividad térmica	86
Figura 79. Ajuste y obtención del coeficiente de conductividad térmica de las muestras propuestas.	86



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El estudio de propiedades térmicas es de gran ayuda en diversos campos tales como la física, la química, el medio ambiente, el sector alimentario, y todas aquellas disciplinas y aplicaciones que estén relacionadas con la temperatura y la transferencia térmica. Una de las propiedades más estudiadas es la conductividad térmica, la cual es de suma importancia ya que está presente en un gran número de aplicaciones científicas, tecnológicas e industriales que tengan relación con la transferencia de calor o el aislamiento del mismo. Una técnica relativamente nueva es la denominada Hot-Ball (HB), técnica que permite obtener parámetros térmicos en líquidos, ayudando a dar más información en las áreas antes mencionadas.

1.1 Problemática

La obtención de datos relacionados con propiedades termo-físicas, en diferentes tipos de materiales, es muy limitada. Esto se debe a que los sistemas utilizados en la medición de dichas propiedades tienden a necesitar ambientes controlados y equipo especializado para obtener medidas con un alto grado de exactitud, lo cual ocasiona que los equipos dedicados a la medición de conductividad térmica sean caros y voluminosos. Cabe mencionar que los sistemas de medición mencionados tienden a ser susceptibles al ruido generado por las condiciones exteriores, es decir a los cambios de temperatura que afectan la precisión en la adquisición de las mediciones.

1.2 Estado del arte

La conductividad térmica es una propiedad termo-física importante que nos brinda información útil para propósitos tanto tecnológicos como científicos. En cuanto a líquidos, sus propiedades de transporte juegan un papel importante en la industria química, especialmente cuando un proceso involucra cualquier tipo de transferencia de calor. Por lo tanto, la obtención de datos precisos de las propiedades termo-físicas es de gran importancia para el desarrollo, diseño, planeación y operación de los procesos en las diferentes industrias [1].

Hoy en día existen diferentes tipos de métodos para la medición de dicha propiedad termo-física, estos métodos son los denominados Hot Wire (HW), Hot Plate (HP) y, la recientemente creada, Hot-Ball (HB). Dichos métodos pueden ser utilizados en diferentes áreas y aplicaciones, sin embargo, cada método tiene un área específica de trabajo, en la cual se especializa para la obtención de datos relacionados con la nombrada propiedad física.

El método Hot Wire o Transient Hot Wire (THW), creado por Kestin y Wakeham en 1978, consta de un alambre suspendido simétricamente en un líquido en un contenedor cilíndrico vertical. En donde al alambre se le aplica una corriente que lo calienta, y lo hace fungir como elemento calefactor y a su vez como un termómetro. La medición de la temperatura se realiza cuando la resistencia eléctrica del alambre aumenta o decrece con respecto al cambio de la temperatura. En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático del método THW en donde



es usado un puente de Wheatstone como un circuito de acondicionamiento de señal. Cabe señalar, que forzosamente el alambre utilizado, en este método, debe ser de platino debido a sus características físicas con respecto a la temperatura, haciéndolo un método sumamente caro.

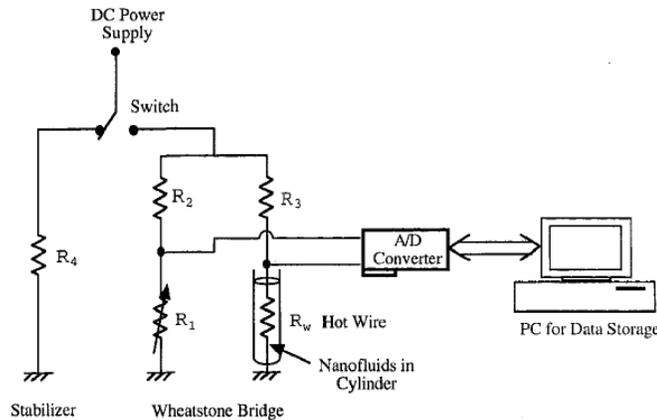


Figura 1. Diagrama esquemático del método THW para la medición de la conductividad térmica en nanofluidos [2].

El método THW en conjunto con los recientes avances en la electrónica, han ayudado a establecer a este método como una de las formas más precisas para determinar la conductividad térmica en líquidos. Gracias a lo anterior, el método es usado en un sin número de aplicaciones específicas, tales como: determinación de la conductividad térmica en gases, determinación de factores que afectan la conductividad térmica en nanofluidos (líquidos con nano partículas), comparar la conductividad térmica de aceites vegetales para el uso en distintas áreas, etc. En [2] se desarrolla un estudio sobre la transferencia de calor en líquidos que contienen nanopartículas de óxido, el estudio expone que los líquidos puestos a prueba con las citadas nanopartículas muestran una mayor conductividad térmica que los líquidos que no las contienen. El incremento de la conductividad térmica en los líquidos se debe a que las partículas suspendidas tienen, en forma sólida, una alta conductividad térmica, por tal razón los líquidos con dichas nanopartículas de óxido tienen un incremento en su conductividad térmica nominal. En la Figura 2, se muestra una micrografía de los citados nanofluidos utilizados para determinar si los líquidos estudiados muestran un aumento en su conductividad térmica.

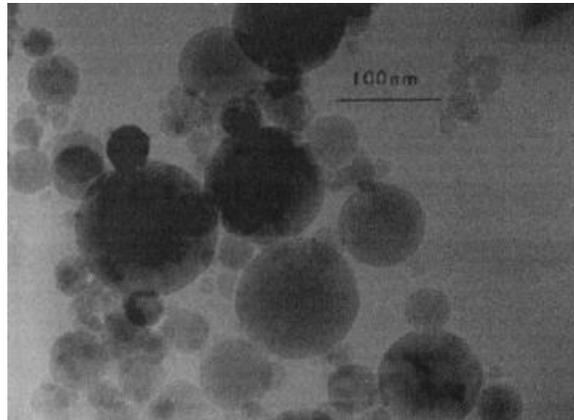


Figura 2. Micrografía de nanopartículas de Oxido de Aluminio utilizadas en el estudio de la conductividad térmica [2].

Otra aplicación relacionada con la técnica HW, se muestra en [3], el estudio muestra un análisis cuantitativo de los factores que afectan a la conductividad térmica de los nanofluidos usando, como ya se mencionó, el método transitorio HW, el cual, por sus características, ayuda a la obtención de datos precisos sobre los factores que pueden afectar la conductividad térmica de los señalados nanofluidos, estos factores pueden ser el tamaño de la partícula, el tipo de fluido, la temperatura y el volumen de concentración. Cabe mencionar que los resultados obtenidos del método HW muestran que el tamaño de las nanopartículas influye más en la conductividad térmica que la fracción volumétrica del nanofluido.

Por otro lado, la técnica HW no solo es una técnica exclusiva para la obtención de datos de la conductividad térmica en líquidos, sino que puede ser usada para elementos gaseosos. En [4] se aprecia que, modificando las dimensiones del alambre de platino y usando una solución numérica que incluye la ecuación de la conductividad térmica inestable, este método puede ser usado para medir la conductividad térmica del helio e hidrógeno, los cuales tienen una alta difusividad térmica, es decir, la velocidad con la que el calor se difunde a través de un material. Así mismo, la adquisición de los datos se realizó con una prueba del sistema HW modificado (variando sus dimensiones), manteniendo así una precisión del $\pm 1\%$ en la medición de gases. La Figura 3 muestra las modificaciones de las dimensiones del alambre de platino de la técnica HW para la medición de gases.

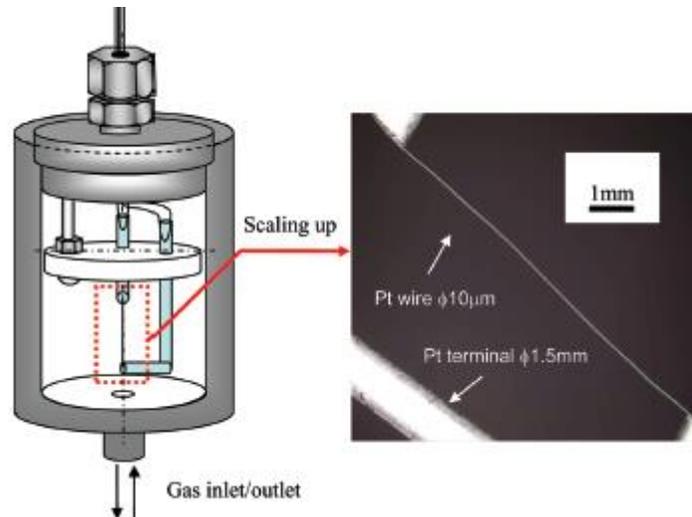


Figura 3. Dimensiones del alambre de platino utilizado en medición de gases con técnica HW [4].

Si bien, la conductividad térmica tiene un sin número de aplicaciones hoy en día, una muy importante en materia de energías renovables se expone en [5], la cual muestra un estudio sobre el uso de aceites vegetales en las centrales de energía termo-solar de concentración, el uso de estos aceites surge como una necesidad de innovar en los fluidos de transferencia de calor que son usados en la actualidad, como lo son los aceites minerales y sintéticos a base de petróleo. El estudio muestra, por medio de la técnica HW, que determinados aceites vegetales tienen una conductividad térmica similar a los aceites usados como referencia en dichas centrales. Los resultados muestran que la conductividad térmica en aceites vegetales (colza, soja, girasol, palma, copra) posee una mínima variación de dicha propiedad entre rangos de temperatura de 25°C a 230°C.

Desde la aparición del método HW, han surgido innovaciones y estudios para maximizar la precisión en la adquisición de datos relacionados con la conductividad térmica y a su vez minimizar los efectos de la convección natural. En [6] se muestra la exactitud que tiene dicho método ante diferentes cambios en su estructura física, es decir, las dimensiones del alambre de platino y por otra parte, recurriendo a doble alambre con igual o diferentes dimensiones. Cabe decir que la precisión del instrumento disminuye cuando la longitud del alambre decrece y aumenta la precisión cuando se utiliza doble alambre de platino, obteniendo así una precisión del $\pm 0.25\%$. En la Figura 4 se muestra la desviación en la medición de la conductividad térmica del usando un alambre corto, largo y doble alambre de platino, en donde la utilización de doble alambre en la técnica HW muestra una mayor precisión. Sumado a lo anterior, para minimizar el efecto de la convección natural (desviación de los resultados) [7], se debe seleccionar un rango de datos de temperatura adecuado, esto es, elegir un tiempo de inicio después de haber empezado el flujo de calor por conducción, y el tiempo de finalización, que debe ser elegido antes de un punto de cruce, cuando la convección natural se vuelva significativa.

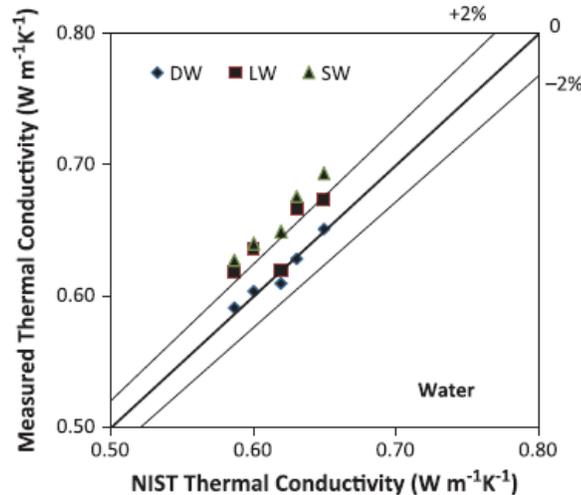


Figura 4. Grafica de desviación en la medición de la conductividad térmica con alambre largo (LW), alambre corto (SW) y doble alambre (DW) utilizados en la técnica HW [6].

En comparación a otros métodos modernos, la técnica HW puede ser un método de bajo costo y con una alta precisión de medición de la conductividad térmica, esto se debe a la facilidad de realizar modificaciones tanto físicas, matemáticas y electrónicas. Un ejemplo de esto se encuentra en [8], donde el alambre de platino es reemplazado con un alambre de cobre y el circuito eléctrico es modificado agregando dos inducciones de corriente, una alterna y la otra directa, con la finalidad de reducir el ruido eléctrico en las mediciones y así asegurar una alta precisión, no obstante es importante señalar que dichas mediciones son hechas a más de 10Hz y que las citadas modificaciones pueden ser implementadas para la medición de la conductividad térmica en líquidos.

Otro método utilizado en la medición de propiedades térmicas, es el método Hot Plate [9], el cual es un método capaz adquirir datos sobre las propiedades térmicas en los sólidos, este método consiste básicamente de una placa caliente y una placa fría. En donde la placa caliente se constituye por un plato calentador de medición, lugar donde se produce un flujo de calor idóneo para mantener un gradiente de temperatura deseado a través del área de medición, y de un plato calentador exterior, que funge como aislante térmico. Por otro lado, la placa fría, es la encargada de mantener una temperatura por debajo de la placa caliente mediante la circulación de un fluido. Gracias a estos dos elementos, se obtiene una diferencia de temperatura de la placa caliente con respecto a la placa fría, por consiguiente, es posible calcular la conductividad térmica de la muestra a estudiar. La estructura básica del método Hot Plate se muestra en la Figura 5.

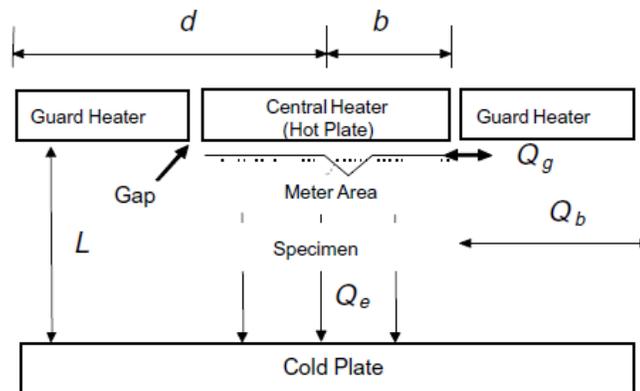


Figura 5. Estructura básica de la técnica Hot Plate [9]

Por las características de la técnica HP, sus aplicaciones son enfocadas para determinar la conductividad térmica en sólidos, una de estas aplicaciones se observa en [10], en donde el objetivo del estudio es determinar si el yeso de corcho es ideal como material aislante de construcción tanto en paredes como techos falsos, es decir, con la técnica HP se determina si la conductividad térmica de dicho material es ideal como aislante térmico y por consiguiente determinar si sus características son ideales para contribuir en mejorar eficiencia de energía en los diferentes tipos inmuebles. Dentro del estudio se realizaron pruebas con diferentes tamaños del corcho granular, puestos en muestras con dimensiones de 100 x 100 x 20 mm, y así verificar si el tamaño del corcho afecta en las propiedades térmicas del compuesto yeso-corcho.

Otra aplicación de la Técnica HP relacionada con la [10], es la medición del almacenamiento y liberación de calor durante la fusión y solidificación de un material de cambio de fase o PCM [11]. Las muestras de los distintos materiales en el estudio tienen una matriz de yeso o de resina epoxi los cuales incorporan tubos metálicos llenos con un compuesto PCM. El objetivo del citado estudio es elucidar cual compuesto PCM es el más eficiente para la medición de la conductividad térmica y calor total acumulado. Los resultados en las pruebas demuestran que un compuesto de yeso PCM tiene un alto potencial de almacenamiento de energía térmica, lo cual se traduce a un buen material aislante a utilizar en construcción de inmuebles.

La importancia de conocer las propiedades térmicas en un material sólido hoy en día es determinar si dicho material se puede clasificar como un material de tipo aislante, más aún cuando este es de tipo natural (fibras naturales). En [12] se muestra la medición de las propiedades térmicas de fibras vegetales aislantes, como la de la cascara de cacahuate, coco, kapok y ratán, por medio de método denominado asimétrico HP, el cual permite estimar la efusividad térmica (capacidad que tiene un material para intercambiar calor con el entorno) a diferentes temperaturas experimentales. Debido a las características del método HP, las pruebas se realizaron con muestras de 10 cm x 10 cm x 5 cm de dichas fibras, en donde la conductividad térmica de la fibra de kapok y de coco muestran una conductividad térmica de 0.045 y 0.055 W / m K respectivamente, demostrando que estas pueden ser usadas como sustitutos de materiales sintéticos aislantes. En la Figura 6 se puede observar una vista seccionada del dispositivo de medición, el cual contiene una muestra compactada de una fibra vegetal.

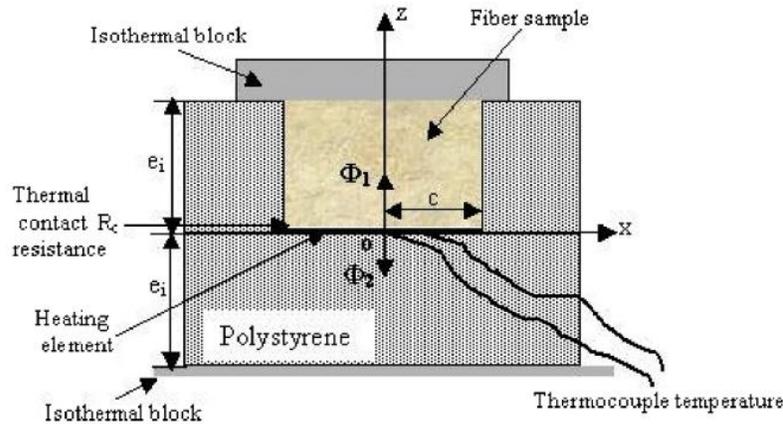


Figura 6. Vista seccionada del dispositivo HP para la medición de la efusividad térmica en fibras naturales [12].

Como se ya se vio anteriormente, la determinación de la conductividad térmica en materiales aislantes es de gran importancia, debido a que estos tipos de materiales son empleados en un amplio rango de aplicaciones. Debido a lo anterior, se han continuado desarrollando nuevos métodos HP utilizando un módulo Peltier [13], la finalidad de esto es obtener una mayor precisión en la medición de la conductividad térmica en materiales aislantes. El módulo Peltier funge dentro de la técnica HP como un sensor de diferencia de temperatura, en donde la diferencia de temperatura detectada por el módulo controla la potencia del calentador de la placa caliente, gracias a lo anterior, el módulo citado tiene el potencial para producir y mantener un alto grado de equilibrio térmico, el cual es necesario para una medición efectiva de la conductividad térmica. La implementación del módulo Peltier dentro del método HP se puede observar en la Figura 7.

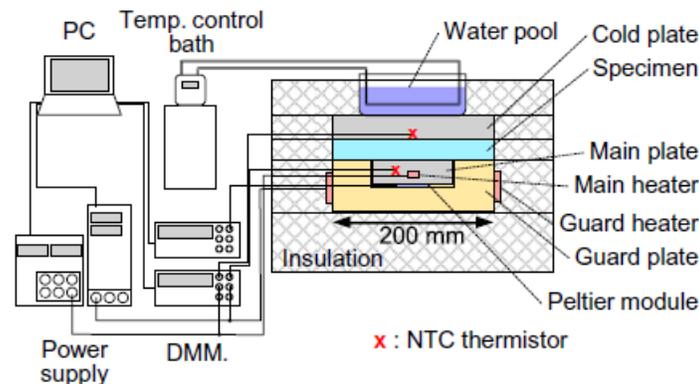


Figura 7. Diagrama esquemático del HP con módulo Peltier [13].

En recientes años, un nuevo método ha sido introducido para adquirir datos relacionados con las propiedades térmicas, este método es el denominado Hot-Ball [14], el cual es un sensor en forma de esfera, que básicamente consta, dentro de su estructura de 2 mm, de dos elementos, un elemento calentador y un termómetro. Gracias al elemento calentador, se genera una fuente constante de calor y simultáneamente, por medio del termómetro, se mide la respuesta de temperatura del medio circundante. La Figura 8 muestra el diagrama de la capacidad física que tiene el sensor HB en la generación de calor y su respuesta de



temperatura que corresponde a su salida de calor. Cabe señalar que, debido a la fuente de calor suministrada por el sensor, se genera un campo de temperatura en el medio a analizar, con el cual la conductividad térmica puede determinarse, ya que se obtiene el valor estabilizado de la respuesta de la temperatura con el medio, es decir, se alcanza el régimen de estado estacionario.

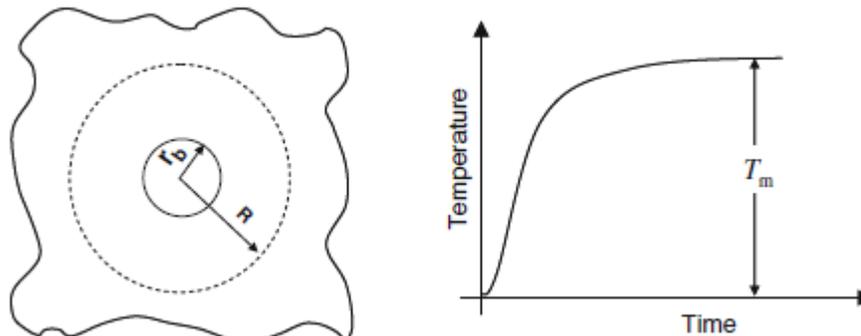


Figura 8. Diagrama del Hot-Ball (r_b -radio del sensor HB, R -capacidad de penetración de calor) y respuesta de temperatura correspondiente a la salida [14].

El uso de nano-fluidos en las diferentes áreas científicas y tecnológicas, ha tenido un gran auge en los últimos años. Esto es debido a su uso potencial en varias aplicaciones prometedoras en el campo de la transferencia de calor. En [15] se muestra un estudio de dichos nano-fluidos a base nano-partículas de plata, en el cual se usa la técnica Hot-Ball para investigar como la conductividad térmica evoluciona con respecto a la concentración de dichas nano-partículas. Para este caso, se usó una esfera metálica, la cual contiene una resistencia calefactora y un termistor. La esfera mencionada, es sumergida en diferentes muestras de nano-fluidos de plata. Pasado un tiempo, cuando la esfera alcanza un estado de equilibrio térmico con respecto a la muestra, se aplica tensión eléctrica a la resistencia calefactora, registrando el aumento de temperatura transitorio durante un periodo de 90 segundos. Los resultados de las muestras de los nano-fluidos, con diferente concentración de nano-partículas, exponen un aumento en la conductividad térmica cuando la concentración es mayor, es decir que alcanza un estado estable con mayor rapidez. En la Figura 9 se muestran las mediciones realizadas a dichos nanofluidos obteniendo resultados precisos para las diferentes concentraciones de las nanopartículas de plata. No obstante, la aplicación del método HB no solo es aplicado para la medición de la conductividad térmica en nanofluidos o materiales sólidos, el método puede ser aplicado también para la medición la mencionada propiedad térmica en el proceso de gelación del Ortosilicato de tetrametilo [16]. Al igual que en [15] el registro del aumento de temperatura transitorio se realiza durante un periodo de 90 segundos, pero agregando un muestreo cada 20 minutos, tiempo suficiente para que la bola alcance un equilibrio térmico entre cada medición y a su vez obtener la conductividad térmica del Ortosilicato de tetrametilo en su proceso de gelación.

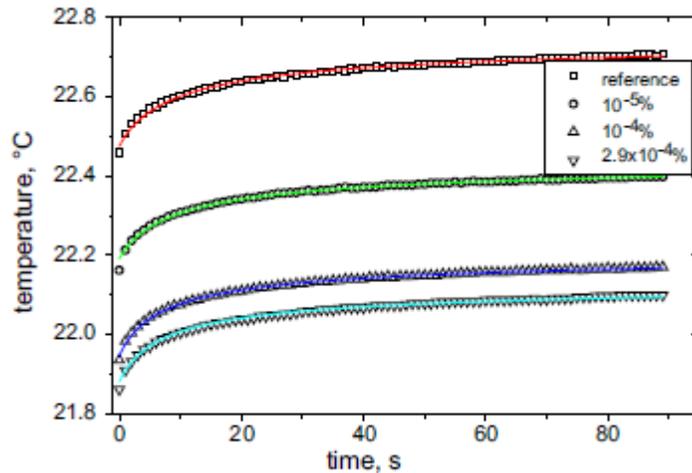


Figura 9. Medición de la conductividad térmica en nanofluidos con diferente concentración de nanopartículas de plata [15].

En general, hoy en día existen diferentes tipos de técnicas para la medición de la conductividad térmica, ya que es una propiedad termo-física de gran utilidad en la diferentes áreas científicas y tecnológicas. Es importante recalcar que estas técnicas han ido evolucionando con el paso de los años, aumentando así su precisión en el proceso de medición. Una técnica relativamente nueva para la medición de la citada propiedad es la técnica Hot-Ball. Esta técnica es de gran interés debido a sus características de medición, siendo posible mejorarla en cuanto a la precisión, agregando un apartado de electrónica de control de precisión y de elementos electrónicos actuales, asegurando de este modo una obtención con mayor puntualidad de la conductividad térmica.



1.3 Estado del campo

Como ya se ha visto en el estado del arte, hoy en día existen diferentes técnicas que se especializan en la medición de diferentes propiedades térmicas, una de las propiedades más importantes actualmente estudiadas es la conductividad térmica, la cual determina básicamente que tan bueno es una materia, ya sea líquido, sólido o gaseoso, para transmitir calor. Una técnica registrada como patente en la medición de la conductividad térmica se muestra en [17]. Esta patente muestra una técnica directa para la medición de la conductividad térmica, dicha técnica está constituida por un sensor y un sistema de medición de la propiedad térmica, dentro del sistema se encuentran otros subsistemas, los cuales se encargan de recibir y analizar la respuesta del sensor, con los datos procesados del sensor, se puede proceder a realizar el cálculo de la conductividad térmica de la muestra de un material. En la Figura 10 se observa el diagrama esquemático de la patente, en el cual se puede observar los diferentes subsistemas que componen a dicho sistema.

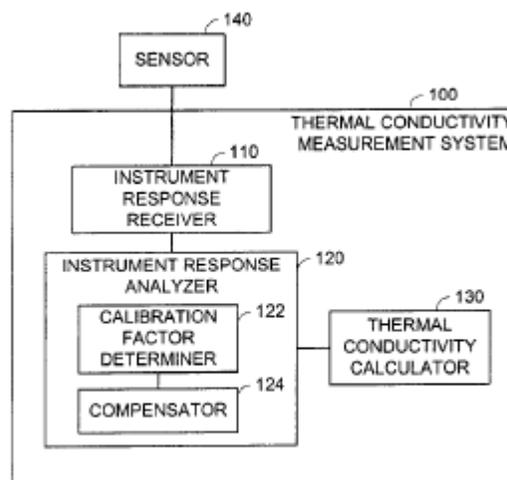


Figura 10. Diagrama esquemático de la técnica de medición directa de la conductividad térmica [17].

Otra patente capaz de medir propiedades térmicas en diferentes materiales sólidos se muestra en [18]. Esta patente es un instrumento de medición de flujo de calor, el cual se basa en la técnica mencionada Hot Plate, dentro de este instrumento se observa el posicionamiento de dos dispositivos termoeléctricos que son los encargados de medir las propiedades térmicas de una muestra. Los dos dispositivos termo electrónicos se posicionan sobre placa caliente y la placa fría respectivamente, y la muestra a analizar deberá ir entre dichas placas. La diferencia con la técnica HP habitual reside en que este sistema incluye un lazo cerrado para el control de temperatura. La Figura 11 muestra el diagrama esquemático de la citada patente pidiéndose observar las diferencias con la técnica HP habitual.

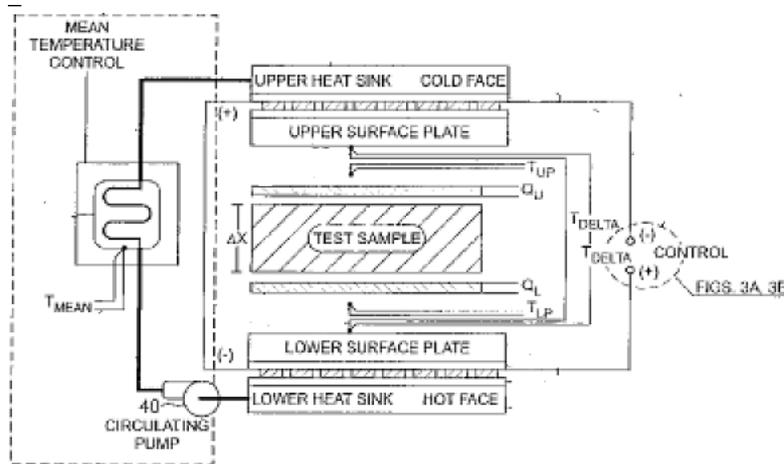


Figura 11. Diagrama de esquemático: instrumento de medición de flujo de calor [18].

Las patentes para la medición de la conductividad térmica u otras propiedades termo-físicas son raras de encontrar debido a que existen métodos actuales para la medición de las mismas con una precisión muy elevada, y que no requieren equipo especializado o laboratorios para el uso del mismo, uno de estos métodos, es el método Hot-Ball, el cual es un método relativamente nuevo. Este trabajo busca mejorar su efectividad para la medición de la conductividad térmica, por tal razón se busca implementar en dicha técnica un sistema de control preciso de temperatura como el usado en [17], para así incrementar la efectividad del método ante cualquier disposición en rangos de temperatura, sin que lleguen afectar las condiciones externas del mismo.



1.4 Hipótesis

Es posible diseñar un sistema de medición de propiedades térmicas en líquidos con técnica Hot-Ball que permita medir la conductividad térmica de diferentes tipos de fluidos; de igual manera es posible implementar un cámara de aislamiento térmico, que incluya un sistema electrónico de control y medición de temperatura, por consiguiente, disminuir notablemente el efecto de las condiciones externas que están presentes al momento de la medición.

1.5 Objetivos

Objetivo General: Diseñar un sistema de medición de propiedades térmicas basado en la técnica denominada Hot-Ball.

Objetivos Específicos:

- Recabar información acerca de las propiedades térmicas
- Realizar investigación acerca de la técnica de Hot-Ball
- Diseño e Instrumentación de una cámara de control de temperatura.
- Construcción de un prototipo funcional para la medición de propiedades térmicas,

1.6 Justificación del Proyecto

Los métodos actuales utilizados para la medición de las diferentes propiedades térmicas en líquidos requieren de un equipo especializado, por consiguiente, estos tienden a ser métodos menos manejables debido a sus dimensiones. Dicho lo anterior, la utilización de estos métodos en la medición de las mencionadas propiedades, solo se puede realizar en ambientes controlados y/o laboratorios especializados. Lo que se busca con la utilización de estos métodos, es recabar datos sobre la conductividad térmica los cuales son de suma importancia en los diferentes procesos científicos e industriales.

Por lo anterior, la utilización del método Hot-Ball se justifica debido a que es un método capaz de medir la conductividad térmica en materiales líquidos con precisión, además el método HB por sus dimensiones, comparado con otros métodos, tiende ser manipulable y por consiguiente, no requiere de equipo especializado para su utilización. Por otra parte, esta técnica podrá ser utilizada fuera de laboratorios, dado que el sistema de medición contará con una cámara de control de temperatura de pequeñas dimensiones, el cual proporcionará un ambiente ideal para realizar las mediciones de la conductividad térmica, sin importar las condiciones exteriores.

Por tanto, el sistema de medición de la conductividad térmica con técnica HB, tendrá un alto grado de precisión, ya que la cámara de control de temperatura a implementar proporcionará las condiciones necesarias para obtener una repetitividad en las mediciones de dicha propiedad térmica, es decir, se estaría reduciendo notablemente el ruido producido por las condiciones exteriores que pudieran cuásar error en la obtención de los datos de conductividad térmica.



CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realizará la revisión de la bibliografía con el objetivo de obtener un conocimiento más profundo y una perspectiva más completa acerca de los tópicos relacionados con el proyecto en desarrollo.

2.1 Temperatura

La temperatura es la propiedad que describe la entropía de un sistema o en otras palabras la cantidad de vibración molecular de un sistema.

Con frecuencia la temperatura se registra en grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), que es la unidad inglesa, o en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), la unidad del SI. Esas dos escalas se definen por los puntos de ebullición y congelación (o fusión) del agua pura a una presión de 101 kPa. Estas referencias son las siguientes: el punto de ebullición es 100°C o 212°F y el punto de congelación es 0°F .

En la medición de la temperatura está implicada la ley cero de la termodinámica, la cual esclarece que, para que un medidor de temperatura pueda obtener una medición de la misma, primero debe alcanzar un equilibrio térmico con el objeto en estudio. [19]

2.2 Energía térmica

La energía térmica representa la energía interna de un objeto, es decir, la suma de sus energías moleculares potencial y cinética, las cuales se encuentran oscilando respecto a sus posiciones de equilibrio, con una frecuencia y una amplitud específica, por consecuencia dicha energía se relaciona con lo frío o lo caliente que está un cuerpo, dependiendo del movimiento de sus moléculas internas [20]. En pocas palabras, entre más caliente se encuentre un objeto, mayor será la oscilación interna de sus moléculas y viceversa.

2.3 Calor

Calor es una interacción energética entre un sistema y sus alrededores, a través de las porciones de los límites del sistema donde no hay transferencia de masa, como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores [21]. La dirección de transición de energía siempre es hacia la zona de menor temperatura. El calor saldrá de un sistema si el sistema está más caliente que sus alrededores; si es más frío que ellos, el calor entrará al sistema. Esta transición de energía continuará en la misma dirección hasta que el sistema y sus alrededores estén aislados térmicamente uno del otro, o bien hasta que se alcance el equilibrio térmico [19].



2.4 Transferencia de calor:

La transferencia de calor es el paso de la energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Es decir, la transferencia de energía térmica ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen un equilibrio térmico. Hay tres formas principales por las que ocurre tal intercambio de calor, estas son: conducción, convección y radiación [19], [20].

2.4.1 Conducción

La conducción es la transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas como resultado de las interacciones entre las partículas. La conducción puede tomar lugar en sólidos, líquidos y gases.

En los gases y líquidos, la conducción es debida a la colisión y difusión de las moléculas durante sus movimientos aleatorios. En los sólidos, se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas y el transporte de energía por los electrones libres. La Figura 12 muestra la transferencia de calor por conducción.

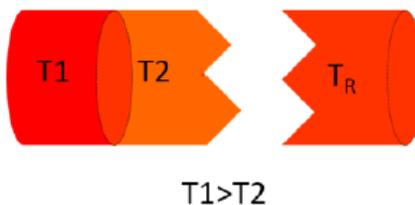


Figura 12. Transferencia de calor por conducción.

La tasa de la conducción térmica a través de un medio depende en la geometría del medio, de su espesor y del material del mismo, así como la diferencia de temperatura a través del medio, lo cual se traduce como:

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [W] \quad (1)$$

Donde k es la conductividad térmica del material, ΔT es la diferencia de temperatura, A es el área y Δx es el espesor del material.

2.4.2 Convección

La convección es el modo transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, este tipo de transferencia implica los efectos combinados de la conducción y movimiento del fluido. La Figura 13 muestra un ejemplo de este tipo de transferencia de calor.



Existen dos tipos de convección, la primera, convección natural es el movimiento inducido por cambios de densidad asociados con diferencias de temperatura en distintas partes del fluido, y la segunda, convección forzada es cuando el fluido es obligado a moverse por medios mecánicos.

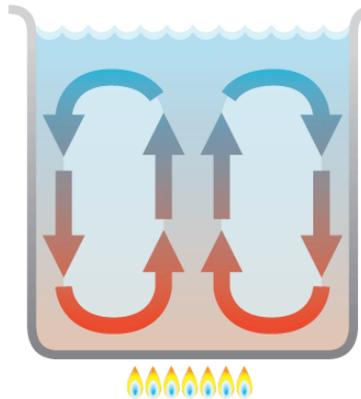


Figura 13. Transferencia de calor por convección.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura, se expresa convenientemente por la ley de enfriamiento de Newton como:

$$Q_{cond} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad [W] \quad (2)$$

2.4.3 Radiación

Radiación es la energía emitida por un material en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en la configuración electrónica de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio intermedio. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. Cabe decir que esta es la forma en que la energía emitida por el sol alcanza a la tierra, esta forma de transferencia de temperatura se muestra en la Figura 14.

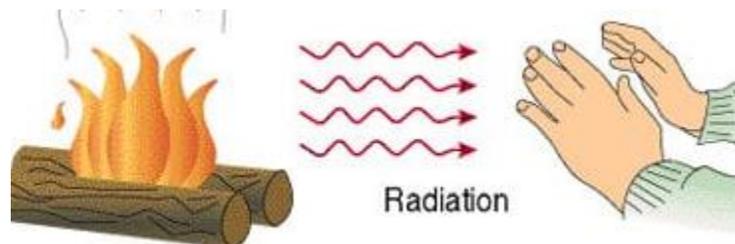


Figura 14. Transferencia de calor por Radiación



Para la radiación térmica, la cantidad de calor que se intercambia por radiación desde un material con una temperatura T_H rodeado de un medio con una temperatura menor T_L esta dado por la Ec. (3)

$$q = \varepsilon \sigma A (T_H^4 - T_L^4) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Donde ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^4$) y A el área de la superficie que emite la radiación.

2.5 Propiedades térmicas

2.5.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica se define como la cantidad de calor (Q) que se transmite en un material a través de una sección transversal de espesor L, en una dirección normal a una superficie A, cuando existe una diferencia de temperatura ΔT , en condiciones constantes y cuando la transferencia de calor obedece solo al gradiente de temperatura Figura 15.

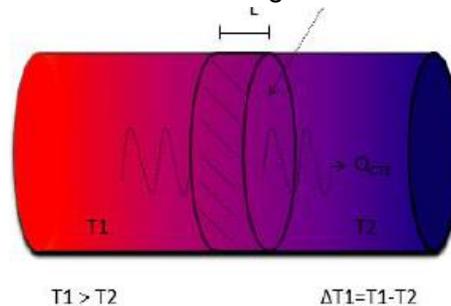


Figura 15. Esquema de conductividad térmica

En el Sistema Internacional la conductividad térmica tiene unidades de Watts sobre metro, grado Kelvin [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] y se representa principalmente por la letra κ , matemáticamente:

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (4)$$

En términos simples, la conductividad térmica de un material es una medida de la habilidad de un material para transferir calor. Un alto valor de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor, y un bajo valor indica que el material es un pobre conductor de calor o un buen aislante.

2.5.2 Calor específico

El calor específico o capacidad calorífica específica c_p , de una sustancia, se puede definir como la cantidad de energía calorífica necesaria para aumentar la temperatura de dicha sustancia, un grado Celsius por gramo, sin que haya de por medio un cambio de estado físico, matemáticamente se expresa como:



$$c_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (5)$$

En donde c es el calor específico, Q es la cantidad de calor, m la masa y ΔT la diferencia entre las temperaturas inicial y final. Su unidad en el sistema SI es el Joule por Kilogramo grado Kelvin [J/kgK]. La Figura 16 muestra la representación esquemática del mismo.

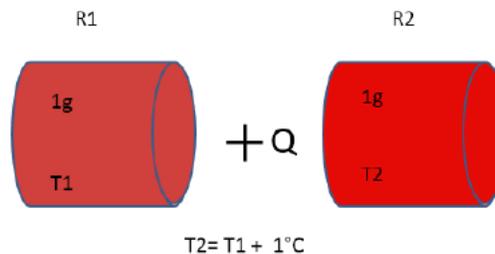


Figura 16. Representación esquemática de Calor específico.

2.5.3 Efusividad térmica

La efusividad térmica es la capacidad que tiene un material para intercambiar calor con el entorno cuando nos encontramos en condiciones no estacionarias, matemáticamente se describe como:

$$e = \sqrt{\rho ck} \quad (6)$$

Dónde ρ es la densidad del material, c el calor específico y k su conductividad térmica. La unidad en el SI es el [$Ws^{1/2}/m^2K$].

2.5.4 Difusividad térmica

La difusividad térmica (α) expresa la habilidad que tiene un material homogéneo para responder a una perturbación térmica, más exactamente la velocidad con la que el calor se difunde a través de un material. Se expresa como el cociente la conductividad térmica y el producto de su densidad y calor específico a presión constante.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (7)$$

Donde k es la conductividad térmica, ρ es la densidad y C_p es el calor específico. Las unidades para la difusividad térmica en el sistema internacional son [m^2/s] es común usar también cm^2/s .

Cabe decir que los materiales con valores altos de difusividad térmica se ajustan rápidamente a la temperatura del ambiente que los rodea. Para esto debe existir una transferencia de calor.



2.6 Sensores Térmicos

2.6.1 Termistor

Los termistores son resistores variables con la temperatura, pero no están basados en conductores como las RTD, sino en semiconductores. Si su coeficiente de temperatura es negativo denomina NTC (*Negative Temperature Coefficient*), mientras que si es positivo se denominan PTC (*Positive Temperature Coefficient*). El fundamento de los termistores está basado en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con esta del número de portadores. Al aumentar la temperatura lo hace también el número de portadores reduciéndose la resistencia, y de ahí que presenten coeficiente de temperatura negativo. Esta dependencia varía con la presencia de impurezas, y si el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades metálicas con coeficiente de temperatura positivo (PTC) en un margen de temperaturas limitado [22]. La Figura 17 muestra el símbolo eléctrico de dicho sensor.

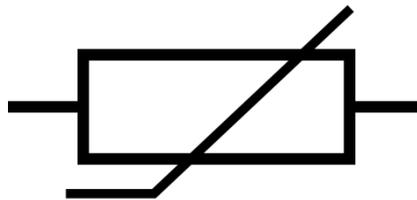


Figura 17. Símbolo eléctrico del termistor

Los termistores son altamente no lineales, mostrando una relación logarítmica entre la resistencia y la temperatura:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R + c (\ln R)^2 + d (\ln R)^3 \quad (8)$$

Aunque los termistores muestren una respuesta no lineal, estos tienden a ser muy susceptibles a los cambios mínimos de temperatura, por lo cual, este tipo de sensores se hacen muy útiles en mediciones que requieren una mayor exactitud.

2.6.2 Detector de temperatura resistivo

Los detectores de temperatura basados en la variación de una resistencia eléctrica se suelen designar con sus siglas en inglés RTD (*Resistance Temperature Detector*). El fundamento de las RTD es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura. Pero si esta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores, y así dispersan más eficazmente a los electrones, reduciendo su velocidad media. Esto implica un coeficiente de temperatura positivo (PTC), es decir, un



aumento en la resistencia con la temperatura [23] La Figura 18 muestra la símbolo eléctrico del sensor RTD.

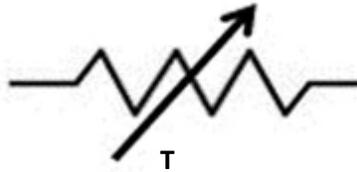


Figura 18. Símbolo eléctrico RTD

El modelo lineal de un sensor RTD de acuerdo a la teoría termoeléctrica es:

$$R_{td}(T) = R_o(1 + \alpha T) \quad (9)$$

Donde $R_{td}(T)$ es la resistencia del sensor RTD a una temperatura T; R_o es la resistencia del termistor a 0 grados Celsius; α es el coeficiente térmico del sensor; T es la temperatura medida.

2.7 Sistema aislado

Un sistema aislado es aquel que no puede intercambiar energía, ni materia (masa) con su entorno. Este, así como lo dice su nombre es aislado, por lo que no interactúa con el medio ambiente y no cambia su energía interna.

2.8 Sistema de control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos y estables.

2.8.1 Sistema de control en lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada, lo cual se muestra en Figura 19. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de que tan bien se haya realizado la calibración del controlador.



Figura 19. Sistema de control en lazo abierto.



2.8.2 Sistema de control en lazo cerrado

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema, lo cual se muestra en la Figura 20.

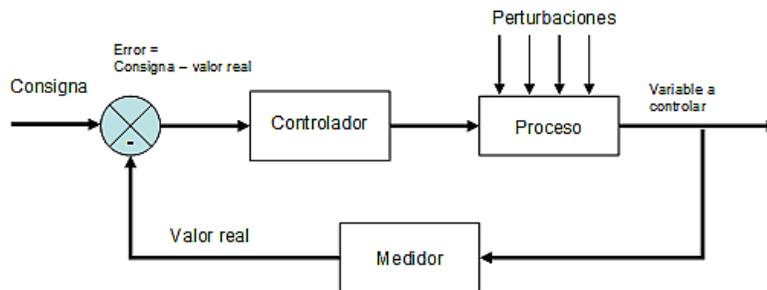


Figura 20. Sistema de control en lazo cerrado

2.8.3 Tipos de controladores

El controlador es un elemento en el sistema en lazo cerrado que tiene como entrada la señal de error y produce una salida que se convierte en la entrada al elemento correctivo o elemento activo. La relación entre la salida y la entrada al controlador con frecuencia se denomina ley de control. Existen tres formas de dicha ley: proporcional, integral y derivativo, estas formas se describen a continuación [24].

2.8.3.1 Control Proporcional

Como su nombre lo indica, la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada, esta entrada es la señal de error del sistema (e), la cual es una función del tiempo.

$$\text{Salida} = K_p e \quad (10)$$

Donde K_p es una constante llamada ganancia proporcional. La salida del controlador depende solo de la magnitud del error en el instante en el que se considera. La función de transferencia para el controlador es, por lo tanto

$$G_c(s) = K_p \quad (11)$$

En términos más simples, el controlador proporcional es, solo un amplificador con una ganancia constante que aumenta la señal de salida del mismo con la finalidad de hacer más rápida la respuesta del elemento correctivo. Cabe aclarar que en este tipo de controlador siempre existe un error en estado estable.



2.8.3.2 Control Integral

Con el control integral la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de error (e) en función del tiempo.

$$\text{Salida} = K_i \int_0^t e dt \quad (12)$$

Donde K_i es la constante denominada ganancia integral. Esta tiene unidades de s^{-1} . La salida del controlador debido a la integral del error en cualquier tiempo es, entonces, proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados.

Al tomar la transformada de Laplace de la ecuación anterior da por resultado la función de transferencia, para el control integral.

$$G_s(s) = \frac{\text{salida}(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (13)$$

Cabe decir que una ventaja del control integral es que la introducción de un término s en el denominador del sistema, disminuye el error en estado estable llegando a obtener errores iguales a 0.

2.8.3.3 Control Derivativo

Con la forma derivativa del controlador, la salida del controlador es proporcional a la razón de cambio con el tiempo del error (e).

$$\text{Salida} = K_d \frac{de}{dt} \quad (14)$$

Donde K_d es la ganancia derivativa y tiene unidades de s. Con este controlador, tan pronto la señal de error inicia puede haber una salida del controlador muy grande, puesto que esta es proporcional a la razón de cambio de la señal de error y no a su valor. En palabras concretas, el control derivativo puede proporcionar una acción correctiva grande antes de que se presente un error grande.

Al tomar la transformada de Laplace de la ecuación anterior esta resulta:

$$G_c(s) = K_d s \quad (15)$$

Es importante mencionar que el control derivativo es insensible a señales de error constantes o que varían con lentitud y, en consecuencia, no se usa solo sino combinado con otras formas de controlador.



2.8.4 Control PI

La combinación del control proporcional y el control integral (Figura 21) da como resultado la reducción en la estabilidad relativa al usar un controlador integral y a su vez reduce el error en estado estacionario al usar un controlador proporcional. Esta combinación se describe como:

$$\text{Salida} = K_p e + K_i \int_0^t e dt \quad (16)$$

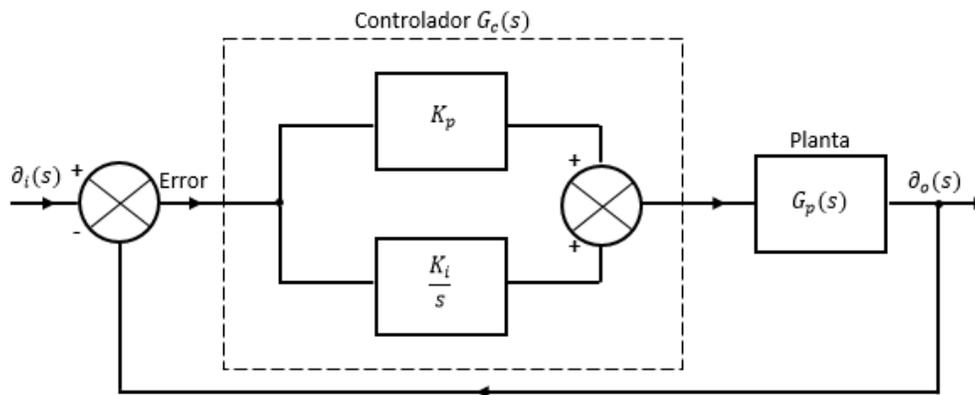


Figura 21. Control Proporcional Integral

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación anterior, se tiene:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (17)$$

Al simplificar

$$G_c(s) = K_p \frac{s + (\frac{K_i}{K_p})}{s} \quad (18)$$

Mediante el uso del control Pi se adicionan un cero en $-(K_i/K_p)$ y un polo en el origen. Dando como resultado un sistema capaz de responder de manera más eficiente ante el error ya que tiende a ser más rápido y sin error en estado estacionario causado por el control proporcional.

2.9 Celda Peltier

Las celdas Peltier son dispositivos termoeléctricos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por el circula una corriente. Internamente la celda Peltier posee elementos semiconductores altamente impurificados y dispuesto eléctricamente en serie mediante conductores de cobre, estas celdas se encuentran aisladas eléctricamente por una placa de cerámica (Figura 22). Cabe decir que generalmente el material semiconductor utilizado en dicho dispositivo es el Telurio para la cara tipo N y de bismuto para la cara tipo P, estos materiales tienen la propiedad de



generar un aumento o disminución de temperatura dependiendo de la polaridad aplicada a su cara.

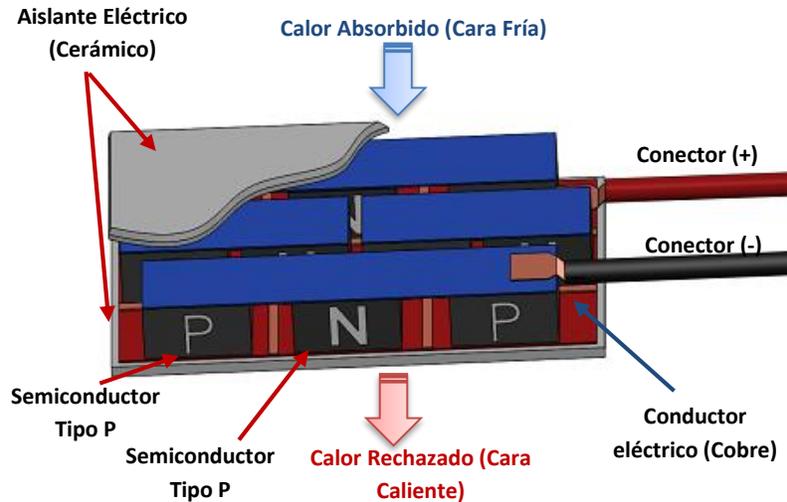


Figura 22. Estructura de una celda Peltier.

Cuando se polariza la celda, se distribuye una carga polarizando a cada elemento semiconductor de la celda, es decir, cada elemento semiconductor posee una diferencia de potencia proporcional a la polarización de entrada. Por esta razón, los portadores mayoritarios, electrones débilmente ligados en los elementos tipo P, emigran hacia el lado positivo de cada uno de sus extremos en los elementos semiconductores tipo N, debido a la atracción de las cargas de diferente signo. Mientras que los portadores mayoritarios, huecos de los elementos semiconductores P, emigran hacia la terminal negativa que se encuentra en cada uno de sus extremos. En forma simple, la ausencia de cargas en cada elemento semiconductor cerca de la unión metal – semiconductor provoca un enrarecimiento de cargas y el consecuente descenso de temperatura en el área circundante. Por el otro lado la compresión o acumulación de portadores cerca de la unión metal – semiconductor en la parte baja de los elementos semiconductores, provoca un ascenso de temperatura (Figura 23).

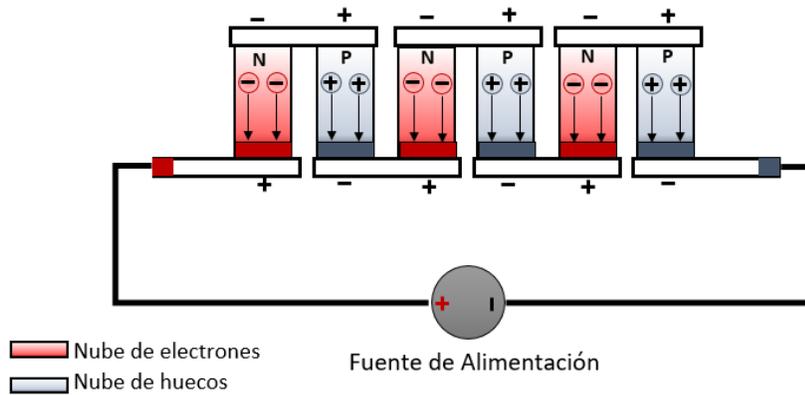


Figura 23. Acumulación y enrarecimiento de portadores de carga cerca de la unión metal semiconductor en una celda Peltier.

2.9.1 Efecto Peltier

El efecto Peltier consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar corriente por ella. Al invertir el sentido de la corriente, se invierte también el sentido del flujo de calor. Esto quiere decir, si una unión antes se calentaba (cedía calor), al cambiar el sentido de la corriente se enfría (absorbe calor) (Figura 24).

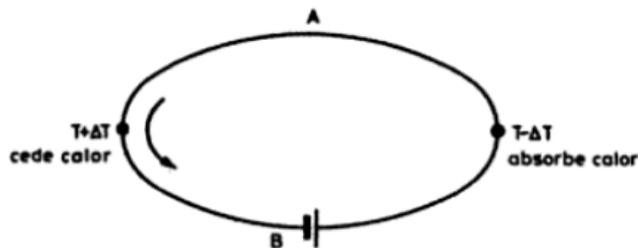


Figura 24. Efecto Peltier al circular una corriente

Este efecto es reversible e independiente de la forma y dimensión de los conductores. Depende solo de su composición y de la temperatura de la unión. Esta dependencia resulta ser además lineal y se describe por el coeficiente Peltier (π_{AB}), que por tener dimensiones de tensión se llama a veces “tensión Peltier”. Se define como el calor generado en la unión entre A y B por unidad de corriente (de carga positiva) que circula de B a A.

$$dQ_p = \pm \pi_{AB} Idt = (\pi_A - \pi_B)I \tag{19}$$

Donde π_{AB} es el coeficiente Peltier del circuito, π_A y π_B son los coeficientes de cada material.

2.10 Puente H

Un puente H es un circuito electrónico que permite activar los motores eléctricos CD en un sentido u otro (Figura 25).

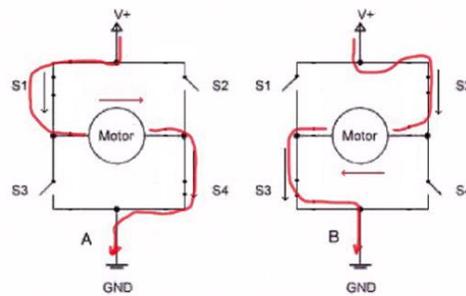


Figura 25. Funcionamiento Puente H.

El funcionamiento del puente H se da cuando los interruptores S1 y S4 (Figura 25) están cerrados y S2 y S3 estarán abiertos, entonces el motor será atravesado por la tensión en una dirección a la que girará el motor. Al cambiar la acción de los interruptores pares mencionados, la tensión se habrá invertido y la operación invertirá el sentido de giro del motor.

2.10.1 Puente H mediante MOSFET

Este tipo de puente es usado normalmente en la activación de motores de CD, dichos puentes usan como elementos de conmutación a los MOSFETS de potencia, beneficiándose del funcionamiento de su zona de saturación, la cual se utiliza como un contacto on / off. La Figura 26 muestra el diagrama eléctrico del Puente H utilizando MOSFET

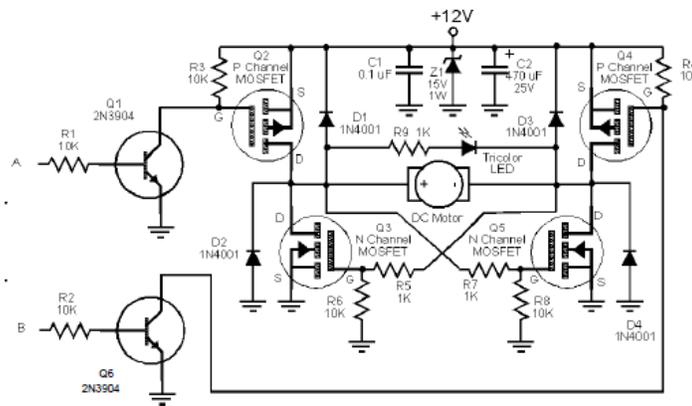


Figura 26. Diagrama Puente H utilizando MOSFET.

La ventaja del uso del Puente H de la Figura 26, es que las tensiones necesarias para activar las compuertas de los MOSFET canal P se obtienen directamente de la alimentación utilizada por el motor. Una vez activado el MOSFET canal P, este permite transitar el voltaje de la fuente que, a su vez, activa el MOSFET canal N para el cierre del circuito y hacer girar al motor en dirección de la corriente.



2.11 Modelado matemático

El ajuste de datos experimentales consiste básicamente en encontrar una función o expresión matemática que pueda ser usada en la creación de una curva de ajuste que represente el comportamiento de dichos datos experimentales, esta función se debe aproximar a la serie de los datos experimentales con el menor error de aproximación posible [25].

2.11.1 Método Mínimos cuadrados

Una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para el ajuste de los parámetros presentes en un modelo matemático con respecto a una serie de datos experimentales, es la técnica denominada mínimos cuadrados, en la cual, su principal objetivo es disminuir la distancia entre una serie de datos experimentales y teóricos, variando los parámetros presentes en dicho modelo [26].

La aproximación de los parámetros por el método mencionado se basa en la minimización del error cuadrático medio, proporcionado por la curva teórica y la curva experimental, cabe decir, que cuanto menor sea el error entre ambas curvas mejor será el modelado de los datos experimentales.

$$ECM = \frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n} = \frac{\sum (\Gamma_{experimental} - \Gamma_{teorico})^2}{n} \quad (20)$$

Donde: $\Gamma_{experimental}$ son los datos experimentales, $\Gamma_{teorico}$ son los datos teóricos y n es el total de los datos.

La Figura 27 (A) muestra la representación gráfica de la diferencia entre un modelo teórico y los datos experimentales, en el cual, aplicando el método de mínimos cuadrados se disminuye la distancia entre los datos experimentales y los datos teóricos (Figura 27 (B)), por consiguiente, reduciendo el error entre ambas curvas.

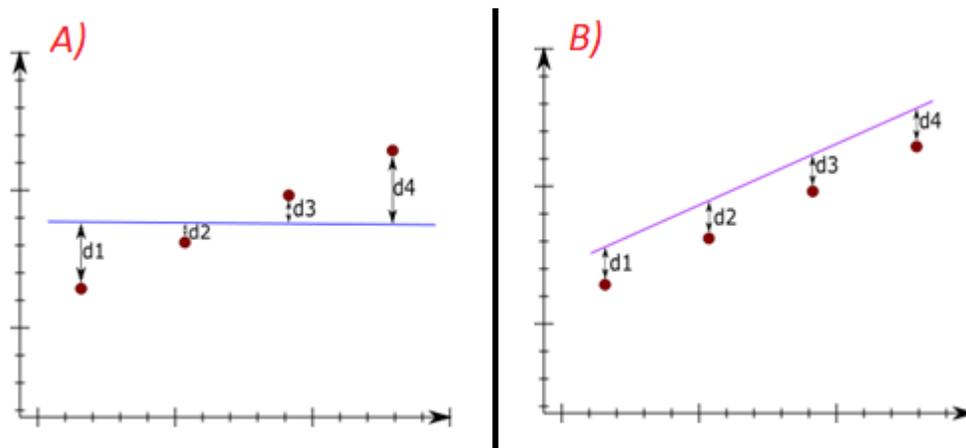


Figura 27. Ejemplo de la ejecución del método de mínimos cuadrados



2.11.2 Coeficiente de determinación de ajuste

El coeficiente de determinación de ajuste o mejor conocido como R^2 , es una forma ampliamente utilizada para la validación de algún modelo teórico ajustado por algún método matemático, como lo es el método de mínimos cuadrados. En otras palabras, dicho coeficiente interpreta que tan bueno es el ajuste teórico de algún modelo obtenido, con respecto a los datos experimentales [27], dicho coeficiente se muestra en un rango de 0 a 1, donde 1 se considera como el mejor ajuste posible y 0 se considera que no hay ajuste. Cabe decir que dicho coeficiente viene dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{ECM}{\sigma^2} = 1 - \frac{\frac{\sum(\Gamma_{experimental} - \Gamma_{teorico})^2}{n}}{\frac{\sum(\Gamma_{experimental} - \mu_{experimental})^2}{n}} \quad (21)$$

Dónde: ECM es el error cuadrático medio, σ^2 es la varianza, $\mu_{experimental}$ la media aritmética de los datos experimentales. Cabe decir que la varianza muestra que tan dispersos están los datos obtenidos alrededor de la media aritmética.



CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO

En este tercer capítulo, se incluirá el desarrollo teórico del sistema propuesto, este sistema básicamente está organizado en 5 partes. La primera de estas es el puente H, el cual funge como driver para el manejo de la celda Peltier. La segunda parte consta del diseño de un circuito PBC para el sensor digital de temperatura ADT7420, el cual es un sensor de 16 bits de resolución programables. La tercera parte habla del diseño de un circuito acondicionador de señal para un sensor termo-resistivo PT1000, con el cual se pretende disponer de una salida de voltaje de 0 a 5 volts en un rango de temperatura de 0°C a 80°C. La cuarta parte del sistema consta del diseño de la cámara térmica, la cual tiene la finalidad de evitar que la temperatura ambiente afecte o perturbe las mediciones a realizar en el interior de la misma, y al mismo tiempo, conservar estable la temperatura interior en un rango de tiempo más largo. Como última parte, se explica el desarrollo del sistema de control de temperatura de dicha cámara térmica, con el cual se espera controlar la temperatura en un rango de $\pm .1^{\circ}\text{C}$.

3.1 Diseño de Puente H

Para el diseño del puente H se utilizaron MOSFET de potencia tanto tipo P como tipo N, puesto que el diseño de dicho del puente se realizó con topología complementaria, dicho diseño se muestra a continuación (Figura 28).

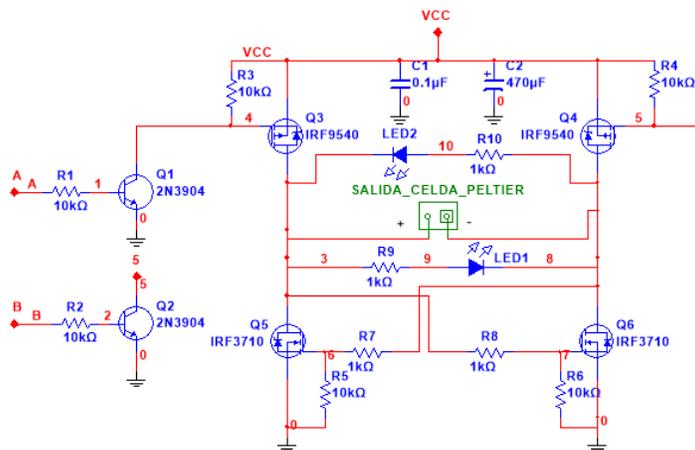


Figura 28. Diseño del Puente H en Multisim

3.1.1 Simulación de puente H en Multisim

Para la simulación del puente H (Figura 29), se aplican 5 volts en la entrada *A* y la entrada *B* se conecta a tierra (caso A), con lo cual el transistor *Q1* entrara en saturación a través de *R1* por consiguiente la compuerta del MOSFET *Q3* quedara activada. La terminal positiva de la celda Peltier (+) quedara conectada a VCC (12 Volts) a través de *Q3* y a su vez la compuerta de *Q6* quedara activada a través de *R8*, por lo tanto, la terminal negativa (-) de la celda Peltier quedara conectada a tierra a través de *Q6*.

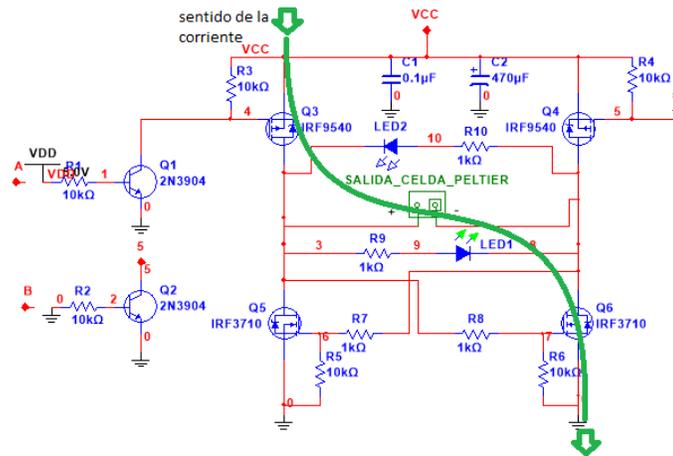


Figura 29. Simulación Puente H caso A

Para el caso contrario (Caso B), la entrada B se conecta a 5 Volts y la entrada A se conecta a tierra (Figura 30), por lo cual el transistor Q2 entrará en saturación a través de $R2$ y a su vez la compuerta del MOSFET Q4 se activará. La terminal negativa de la celda Peltier quedara conectada a VCC (12 Volts) a través de Q4 y a su vez la compuerta del MOSFET Q5 quera activada a través de $R7$, por tanto, la terminal positiva (+) de la celda Peltier quedara conectada a tierra a través de Q5.

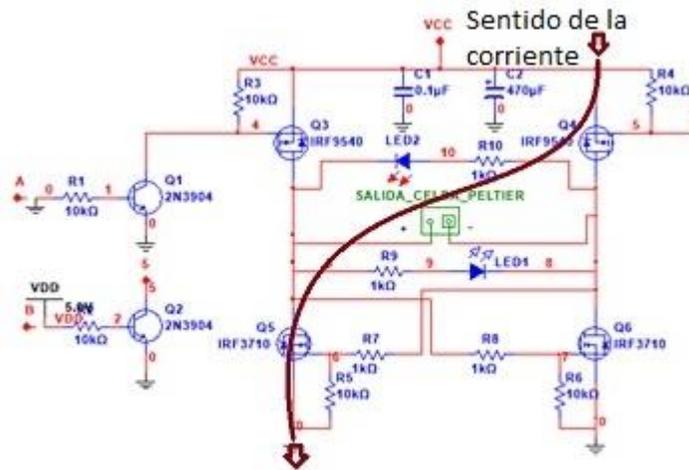


Figura 30. Simulación Puente H caso B

3.1.2 Diseño PCB en Ultiboard del Puente H

Una vez comprobado el funcionamiento del puente H en Multisim, se realizó un diseño PCB del mismo, el cual se prevé que contenga componentes electrónicos tipo *true hole* ya que la corriente teórica que circulará a través del circuito será de 2.083 Amperes.



$$I = \frac{P}{V} = \frac{\text{potencia maxima celda peltier}}{\text{Voltaje maximo a suministrar}} = \frac{25W}{12V} = 2.083 A \quad (22)$$

Con la corriente teórica calculada para el circuito y para asegurar que las pistas no se sobrecalienten calienten se procedió a realizar el cálculo teórico del ancho de dichas pistas proponiendo una corriente mayor o igual al doble de la corriente teórica.

$$Area = \left(\frac{I}{K * \Delta T^b} \right)^{\left(\frac{1}{c} \right)} \quad (23)$$

Dónde: I = corriente que circulará por la pista

ΔT = incremento de temperatura máxima permitida con respecto a la temperatura ambiente del circuito

K, b, c = sus valores 0.048, 0.44, 0.275 respectivamente. Estas, son constantes dadas por el IPC en el estándar general para el diseño de circuitos impresos ANSI-IPC 2221 para circuitos impresos externos.

Sustituyendo valores:

$$Area = \left(\frac{4A}{0.048 * 10^{\circ C^{0.44}}} \right)^{\left(\frac{1}{0.275} \right)} = 110.28 \text{ mils}^2 \quad (24)$$

Con el área teórica calculada para 4 amperes se procede al cálculo del ancho de la pista con la siguiente formula.

$$Ancho \text{ pista} = \frac{Area}{Thicknes * 1.378 \text{ mils/oz}} \quad (25)$$

Dónde: Thickness = grosor de la pista (normalmente 1 oz/ft²)

1.378 = constante dada por la norma antes mencionada.

Sustituyendo valores

$$Ancho \text{ pista} = \frac{110.28 \text{ mil}^2}{1 \text{ oz} * 1.378 \text{ mils/oz}} = 80.031 \text{ mils} \quad (26)$$

El resultado calculado anteriormente es dado en milésimas de pulgada, por lo cual se realiza la conversión a milímetros

$$Ancho \text{ pista (mm)} = 0.0254 * Ancho \text{ pista} = 0.0254 * 80.031 = 2.032 \text{ mm} \quad (27)$$

Teniendo el ancho de la pista necesario para el correcto diseño del PCB, se continúa con la colocación de los dispositivos electrónicos, cabe mencionar que se debe tener en cuenta las dimensiones de dichos dispositivos y a su vez, un espaciado adecuado entre componentes, todo esto con la finalidad de tener una correcta distribución de los componentes



en el PCB. En la Figura 31 se muestra el diseño final del PCB para el puente H con las especificaciones antes mencionadas.

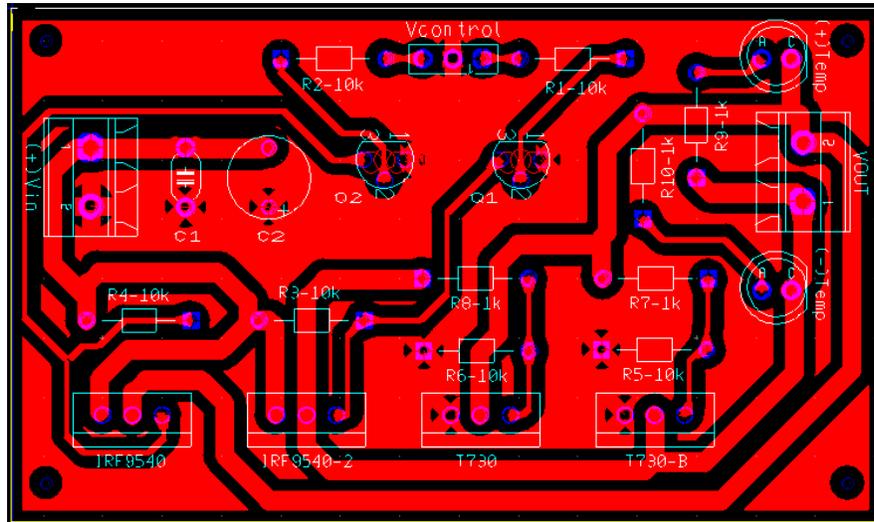


Figura 31. Diseño PBC puente H

Se puede observar en el PCB que las pistas con mayor ancho son las pistas por las cuales se harán circular una corriente de aproximadamente 2 Amperes, sin embargo la anchura de dichas pistas es de 2 mm, con lo cual teóricamente estas pistas son capaces de manejar hasta 4 Amperes constantes. La Figura 32 muestra la manufactura final realizada del PCB obtenido durante el diseño del puente H, en el cual se puede corroborar la distribución de los componentes del circuito diseñado, pudiendo de esta forma, realizar pruebas de funcionamiento individual para cada dispositivo electrónico.



Figura 32. Manufactura del PCB puente H.



3.2 Diseño y configuración del sensor digital de temperatura

3.2.1 Configuración teórica del sensor digital

El sensor digital de temperatura ADT7420, tiene una resolución de 16 bits, el cual entrega una lectura de temperatura de forma digital, pudiendo detectar cambios de temperatura de entre 0.0078°C , cabe decir que este sensor digital cuenta con un protocolo de comunicación I^2C con el cual se es posible la configura los registros del sensor así como la obtención de la temperatura en forma digital, a su vez se debe exponer que el mencionado sensor cuenta con una calibración de fábrica. Para configurar el sensor digital de temperatura ADT7420 se tiene dos tipos de configuración, la primera de ellas es realizada por hardware y la segunda se debe realizar por software.

3.2.1.1 Configuración por Hardware

La configuración por hardware más que nada se realiza para asignar una dirección de comunicación al sensor digital, con la finalidad de poder establecer una comunicación y al mismo tiempo poder acceder a los registros de dicho dispositivo y por consiguiente configurarlos para obtener datos de estos.

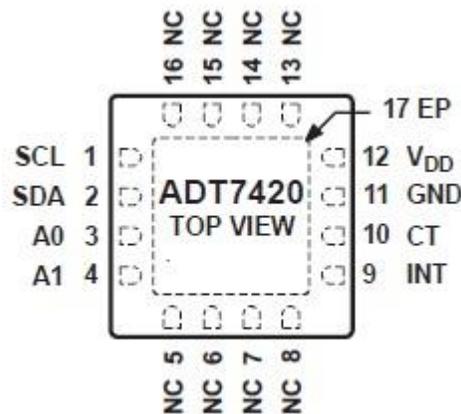


Figura 33. Diagrama pines conexión de sensor.

En la figura anterior se observa la disposición de los pines del sensor, los pines A0 y A1 son pines dedicados para la asignación de la dirección del dispositivo, estos pines pueden ser conectados tanto a 5 Volts como a tierra. En la Tabla 1 se puede observar las opciones de conexión de A0 y A1 para la asignación de una dirección al dispositivo.



Tabla 1. Opciones de conexión para direccionamiento del dispositivo

Bin							Hex
A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	
1	0	0	1	0	0	0	0x48
1	0	0	1	0	0	1	0x49
1	0	0	1	0	1	0	0x4A
1	0	0	1	0	1	1	0x4B

Como se puede observar en la tabla anterior, A0 y A1 solo cuentan con cuatro opciones de conexión y en cuanto a A6, A5, A4, A3 y A2 son conexiones realizadas por el fabricante internamente.

3.2.1.2 Configuración teórica por software

La configuración realizada por software del sensor se puede realizar desde alguna tarjeta electrónica, estas pueden ser, microcontroladores como la tarjeta Arduino, FPGA's como la tarjeta NI myRIO, entre otras. La configuración del sensor por software sigue el protocolo de comunicación I²C. En la figura 34 se muestra un diagrama de flujo para la configuración del sensor.

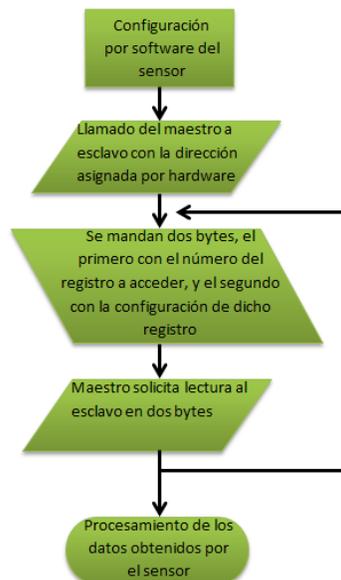


Figura 34. Diagrama de flujo de la configuración por software del sensor

La configuración del sensor, como lo muestra el diagrama, no con lleva mucho desarrollo en cuanto a programación, lo que hay que aclarar en este punto, es que el sensor y la mayoría de los dispositivos que trabajan con I²C tienen su base en el manejo tanto de números binarios como números hexadecimales, ya que con estos se configuran los registros y, por otro lado, se obtienen las respuestas de los mismos.



3.2.2 Diseño del PCB del sensor ADT7420

Con la configuración teórica por hardware del sensor digital (asignación de una dirección esclavo al sensor) se procede a realizar el diseño del circuito impreso con el cual el sensor quedara configurado.

Como primer paso para la realización del PCB del sensor mencionado, se realizó un diagrama esquemático en Multisim (Figura 35), en el cual se establecían los pines del sensor, tanto los de alimentación como los puertos de comunicación, a su vez se estableció un dispositivo que representaba al ya citado sensor, posteriormente se realizó la asignación de la huella o *footprint*, en este caso smd, de cada dispositivo para su correcta transferencia al software Ultiboard.

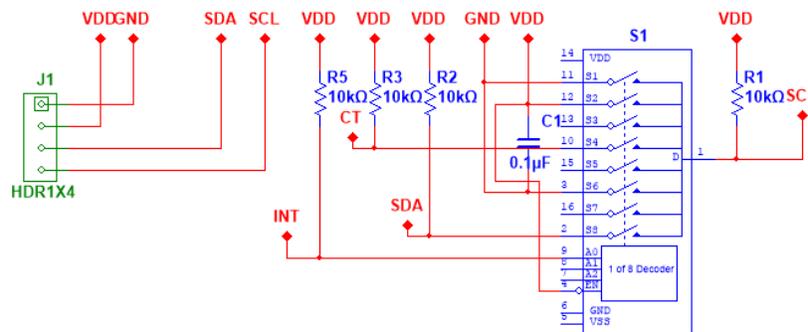


Figura 35. Diagrama esquemático del sensor

El valor de las resistencias asignadas en el diagrama esquemático del sensor, fueron puestas por recomendación del fabricante ya que estas son las resistencias de pull-up que se encarga básicamente de evitar los falsos estados que se producen por el ruido generado por los circuitos electrónicos.

Una vez realizada las configuraciones necesarias en el diagrama esquemático, se realizó el PCB del sensor digital, pasando el diagrama mencionado a la plataforma de Ultiboard. En el diseño de circuito impreso se pretendió tener una correcta distribución de los componentes electrónicos, ya que se trató de minimizar la posibilidad de generar puentes entre pista y pista de cobre. El diseño final del PCB manufacturado del sensor se muestra a continuación en la Figura 36.

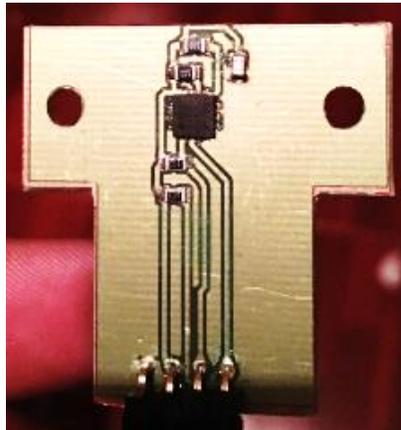


Figura 36. Manufacturara del PCB sensor ADT7420

3.3 Diseño del circuito acondicionador de señal para sensor PT1000

El diseño del circuito acondicionador de señal para el sensor PT1000 consta de 3 partes, la primera de ellas consta de un circuito el cual permite establecer una corriente, misma que es aplicada al sensor resistivo PT1000 y por consiguiente obtener un voltaje de salida. En la Figura 37 se muestra una simulación en Multisim de dicho circuito, con lo cual se puede corroborar la funcionalidad del circuito mencionado.

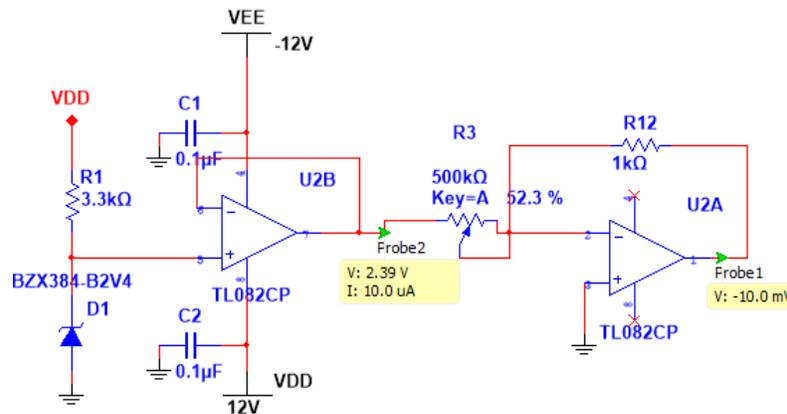


Figura 37. Circuito para establecimiento de corriente para el sensor PT1000

El circuito anterior básicamente consta de un seguidor de voltaje el cual, mantiene el voltaje propuesto por el diodo zener, por otro lado, en la salida del seguidor voltaje se tiene un potenciómetro, el cual gracias a su función se puede establecer una corriente deseada. Cabe aclarar que para este caso se propone una corriente de $10 \mu\text{A}$ ya que con esto se previene el auto calentamiento del sensor al hacer circular dicha corriente a través del mismo y así evitar mediciones erróneas por el auto calentamiento del mismo.

Para el cálculo se la corriente disipada por el sensor se tiene:



$$P_{Pt1000} = R_{Pt1000} * I_{propuesta}^2 \quad (28)$$

Suponiendo que el sensor se encuentra a 0°C, teóricamente se tiene 1000 Ω, entonces sustituyendo.

$$P_{Pt1000} = 1000\Omega * 10\mu A = 10mW \quad (29)$$

La resistencia (R2) en el circuito mostrado anteriormente, representa al sensor PT1000, con lo cual se puede simular diferentes valores de resistencia a diferentes temperaturas. Teóricamente el modelo lineal de un RTD PT1000 tiene el siguiente comportamiento [23].

$$RTD(T) = R_o(1 + \alpha T) \quad (30)$$

Dónde: $RTD(T)$ = resistencia teórica del PT1000

R_o = valor teórico resistivo a 0°C del sensor = 1000Ω

α = coeficiente de temperatura = 0.00385 °C⁻¹ según la norma DIN 43760.

T = temperatura teórica propuesta

Proponiendo una temperatura de 50°C se procede a realizar el cálculo de la resistencia teórica del sensor PT1000 para simulación.

$$RTD(T) = 1000\Omega(1 + 0.00385^\circ C^{-1} * 50^\circ C) = 1192.5\Omega \quad (31)$$

Teniendo la resistencia teórica se simulo aplicando el valor calculado en la R2 del circuito. La Figura 38 la salida de voltaje del circuito simulado.

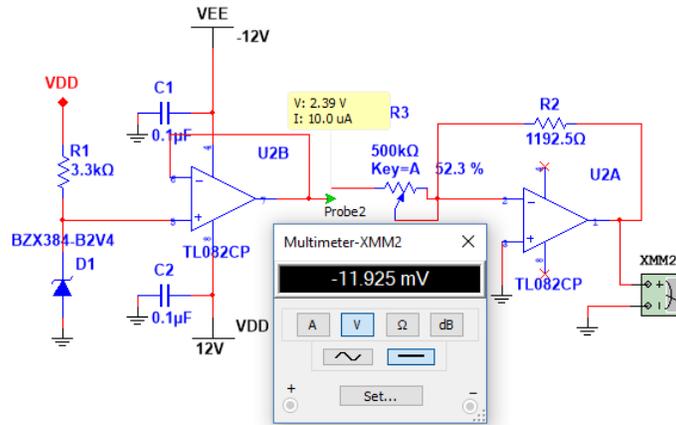


Figura 38 Simulación de la primera parte del circuito propuesto

Con la simulación mostrada en la figura 42 se observa el voltaje de salida de -11.925mV con respecto a la resistencia teórica calculada para 50°C, para corroborar dicho valor se hace el cálculo de la salida de voltaje.

$$-V_{out} = R_{PT1000} * I_{propuesta} = 1192.5\Omega * 10\mu A = -11.925mV \quad (32)$$



Lo siguiente en el diseño del circuito acondicionador, es la amplificación de la señal obtenida en la etapa anterior, por lo cual se propone el uso de un amplificador de instrumentación, ya que se aprovecha la característica de relación de rechazo de modo común del amplificador, con lo cual se tiene la capacidad de rechazar las señales de interferencia comunes en ambas entradas y amplificar únicamente la diferencia entre las entradas. En la figura 39 se muestra la simulación, en la cual se amplifica la señal obtenida en la primera etapa.

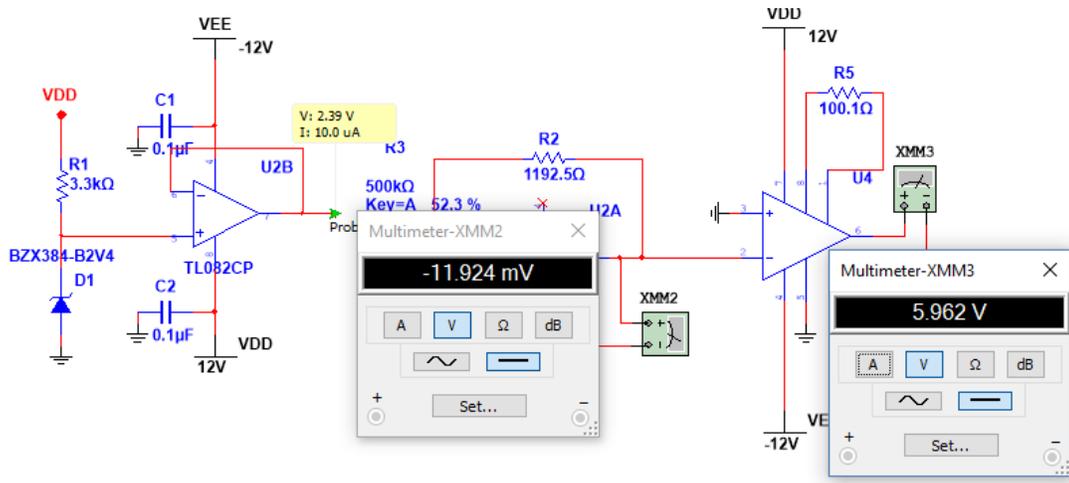


Figura 39. Simulación implementación de un amplificador de instrumentación.

En la simulación anterior se observa la amplificación de la primera etapa del circuito propuesto, dando una salida de 5.962 V, este voltaje de salida se da por la resistencia calculada (R_5) para una ganancia de amplificación de 500, en la siguiente ecuación se muestra el cálculo de dicha ganancia.

$$G = 1 + 50K\Omega/R_5 \quad (33)$$

Despejando R_5

$$R_5 = 1 + 50K\Omega/G \quad (34)$$

Dónde: R_5 = resistencia a calcular para una ganancia dada

$50K\Omega$ = proviene de la suma de las resistencias de retroalimentación internas del circuito integrado

G = ganancia propuesta para el amplificador de instrumentación, con un máximo de 10000

Sustituyendo valores para una ganancia de 500.

$$R_5 = 1 + \frac{50K\Omega}{500} = 101\Omega \quad (35)$$

Comprobando la salida del amplificador de instrumentación



$$-V_{out_{AmpIns}} = V_{in_{AmpIns}} * G = -11.924mV * 500 = -5.962V \quad (36)$$

$$V_{out_{AmpIns}} = 5.962V \quad (37)$$

Para la última parte del circuito acondicionador de señal, se propone el uso de un escalador de voltaje el cual sea capaz de entregar una salida de 0 a 5 Volts variando la resistencia del sensor PT1000 en un rango de 0 a 80°C. Los cálculos teóricos para estos valores se muestran a continuación.

Para 0°C se sabe que la resistencia teórica del RTD PT1000 es 1000Ω por lo cual se procede a realizar la salida de voltaje tanto para la primera parte del circuito, como del amplificador de instrumentación.

$$-V_{out} = R_{PT1000} * I_{propuesta} = 1000\Omega * 10\mu A = 10mV \quad (38)$$

$$V_{out} = -10mV = V_{in_{AmpIns}} \quad (39)$$

$$-V_{out_{AmpIns}} = V_{in_{AmpIns}} * G = -10mV * 500 = -5V \quad (40)$$

$$V_{out_{AmpIns}} = 5V \quad (41)$$

Para el valor resistivo de la PT1000 a una temperatura de 80°C se procede a usar el modelo lineal de una RTD y posteriormente se calcula el voltaje de salida tanto de la primera parte del circuito, como del amplificador de instrumentación

$$RTD(T) = R_o(1 + \alpha T) = 1000\Omega(1 + 0.00385^{\circ C^{-1}} * 80^{\circ C}) = 1308\Omega = R_{PT1000} \quad (42)$$

$$-V_{out} = R_{PT1000} * I_{propuesta} = 1302\Omega * 10\mu A = 13.02mV \quad (43)$$

$$V_{out} = -13.02mV = V_{in_{AmpIns}} \quad (44)$$

$$-V_{out_{AmpIns}} = V_{in_{AmpIns}} * G = -13.02mV * 500 = -6.51V \quad (45)$$

$$V_{out_{AmpIns}} = 6.51V \quad (46)$$

Con los rangos de voltaje establecidos se procede a realizar el circuito escalador de voltaje que dará en su salida un voltaje de salida en el rango de 0 a 5 Volts. Dicho circuito se muestra en la Figura 40.

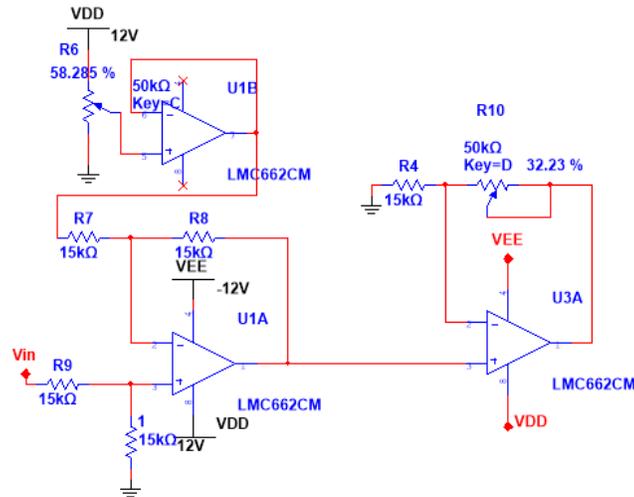


Figura 40. Circuito escalador de voltaje.

El circuito escalador de voltaje consta de 3 partes para su funcionamiento, la primera de estas es un amplificador seguidor de voltaje (U1B), con el cual se fija un voltaje de entrada, dado por el potenciómetro, y a su vez se mantiene fijo, dicho voltaje debe ser igual al voltaje de entrada inferior ya calculado ($V_{out_{AmpIns}} = 5V$). La segunda parte del circuito consta de un circuito restador de voltaje (U1A), el cual dará un rango de salida de entre 0 a 1.51V resultado de restar el voltaje de salida del seguidor de voltaje (5V) con el voltaje máximo establecido por la temperatura teórica a 80°C (6.51V). Por último, la tercera parte consta de un circuito amplificador de voltaje (U3A), en el cual se tenga una ganancia tal que a la salida del mismo se obtenga un voltaje desde 0V a 5V, resultado de multiplicar el voltaje de salida del restador de voltaje con la ganancia establecida. Las ecuaciones para la obtención de las mencionadas salidas de voltaje se muestran a continuación.

Para el circuito restador de voltaje se tiene:

$$V_{out_{AmpRes}} = V_{in+} - V_{in-} * \left(\frac{R_f}{R_i}\right) \quad (47)$$

$$V_{out_{AmpRes}} = V_{in+} - V_{in-} \quad (48)$$

Dónde: $R_f = R_i$

V_{in+} = voltaje de salida del seguidor de voltaje.

V_{in-} = voltaje de salida del amplificador de instrumentación

Para el circuito amplificador de voltaje no inversor:

$$V_{out_{AmpNI}} = V_i * \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \quad (49)$$

Dónde: V_i = voltaje de salida del restador de voltaje.

R_f = resistencia de retroalimentación



R_i = resistencia de entrada

Para el cálculo de la ganancia necesaria para obtener una salida de 0 a 5V se tiene:

$$G = \frac{V_o}{V_{inAmpResMax}} = \frac{5}{1.51V} = 3.3112 \quad (50)$$

$$G = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \quad (51)$$

Despejando R_f y proponiendo una R_i de 15K Ω se tiene

$$R_f = (G - 1) * R_i = (3.3112 - 1) * 15K\Omega = 34.668K\Omega \quad (52)$$

Para corroborar los cálculos realizados para el acondicionamiento de señal se procedió a realizar una simulación de las tres etapas de dicho circuito, cabe decir que para esta simulación se procedió a realizarla simulando teóricamente una temperatura de 80°C, obteniendo el siguiente resultado mostrado en la Figura 41.

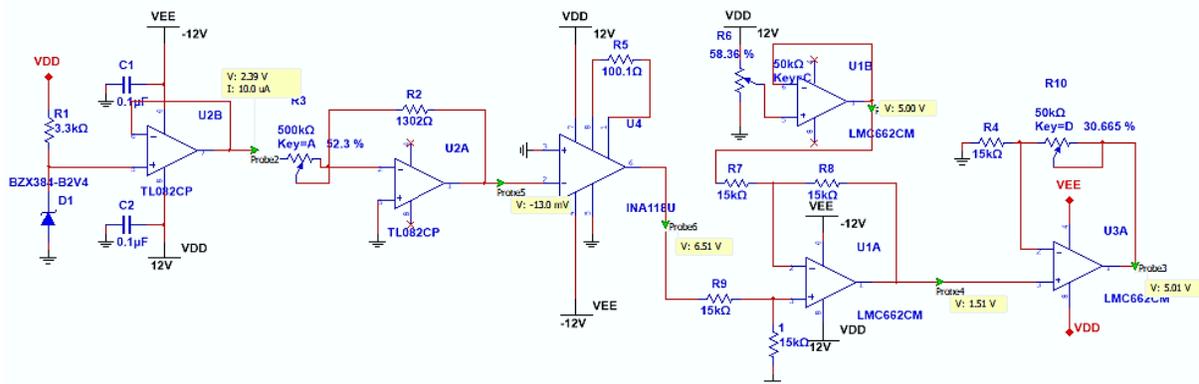


Figura 41. Simulación del circuito acondicionador de señal para un sensor PT1000.

Con la simulación mostrada en la figura anterior, se puede concluir que el diseño del circuito acondicionador de señal funciona adecuadamente ya que se obtuvo la salida esperada a una temperatura teórica de 80°C.

3.3.1 Diseño del PCB del circuito acondicionador de señal

Como ya se observó en la Figura 41, el circuito acondicionador de señal del sensor PT1000 está compuesto por un gran número de componentes electrónicos, por lo cual, para el diseño del PCB del mencionado circuito, se pretende el uso de componentes SMD con la finalidad de reducir dimensiones y a su vez, y muy importante, la eliminación de resistencias parasitas causadas por el uso de componentes electrónicos "true hole". Al igual que el diseño de los PCB's realizados anteriormente, se pretendió tener una distribución uniforme de los componentes electrónicos y de esta forma, tener acceso a los dispositivos electrónicos de forma sencilla, esto con la finalidad de poder realizar pruebas de funcionamiento en cada uno



de los dispositivos antes dichos. La Figura 42 muestra el PCB manufacturado del circuito acondicionador de señal con las características antes descritas.

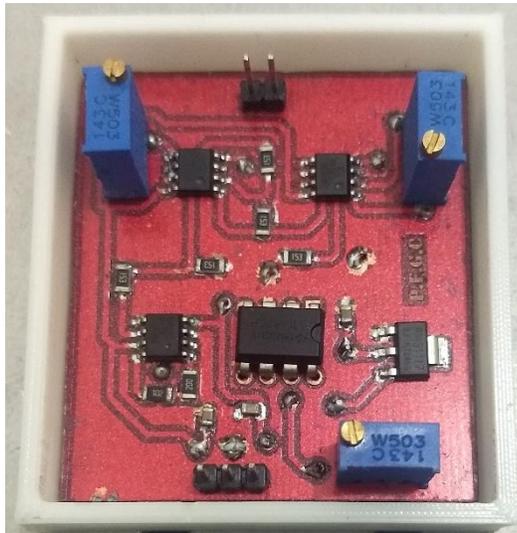


Figura 42. Manufactura del PCB circuito acondicionador

3.4 Diseño de la cámara térmica

El diseño del prototipo de la cámara térmica a utilizar en las mediciones de conductividad térmica se realizó en SOLIDWORKS, el cual es un software de diseño CAD, este permite diseñar las piezas individuales de un sistema, y si se requiere un ensamble 3D con dichas piezas, sumando a esto, dicho software permite establecer el tipo material de las piezas diseñadas, asignándoles por default las propiedades físicas del material asignado.

La cámara térmica, tiene como objetivo el aislamiento térmico de los cambios de temperatura exterior y, por otro parte, el control de temperatura interna de la misma, por tal motivo se tomó en consideración el uso de Nylamid en el diseño de la carcasa externa (Figura 43) de aludida cámara térmica, ya que este material aporta rigidez a la cámara y a su vez un buen aislamiento térmico, puesto que el Nylamid cuenta con una baja conductividad térmica.

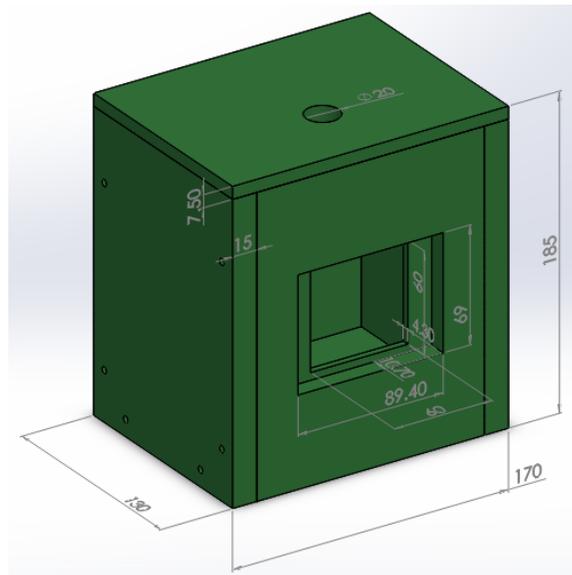


Figura 43. Diseño de la carcasa externa de la cámara térmica

La segunda consideración en el diseño de la cámara térmica es la carcasa interna, esta carcasa será la encargada de transferir calor del actuador a la muestra a medir, por tal motivo se propuso el uso de aluminio ya que este material es un excelente conductor de calor. La Figura 44 muestra el diseño de esta misma, incluyendo sus complementos, lo cuales son tapa y asilamiento sólido.

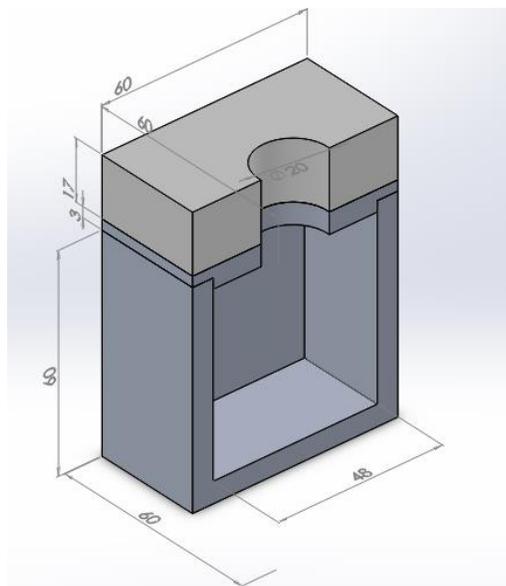


Figura 44. Diseño carcasa interna de la cámara térmica

Como se puede observar en la figura anterior, la carcasa interna de la cámara mencionada cuenta con una tapa y una cobertura superior sólida aislante, la primera de estas es del mismo material que la carcasa interior (aluminio), mientras que la cobertura superior es de asbesto,



el cual cuenta con una baja conductividad térmica y por ende una baja transferencia de calor. Cabe aclarar que ya se contaba con dicha carcasa interna, sin embargo, se tomó en cuenta el diseño y sus dimensiones reales de la misma para realizar el prototipo 3D de la cámara térmica.

Como punto final en el diseño de la cámara térmica, se tiene contemplando el uso de un excelente aislante térmico, en este caso, el material que puede ser usado para este requerimiento es el poliestireno expandido, ya que, por sus propiedades termo físicas, este puede ser ocupado para aislar térmicamente (parte exterior) y a su vez conservar el calor (parte interior), Figura 45.

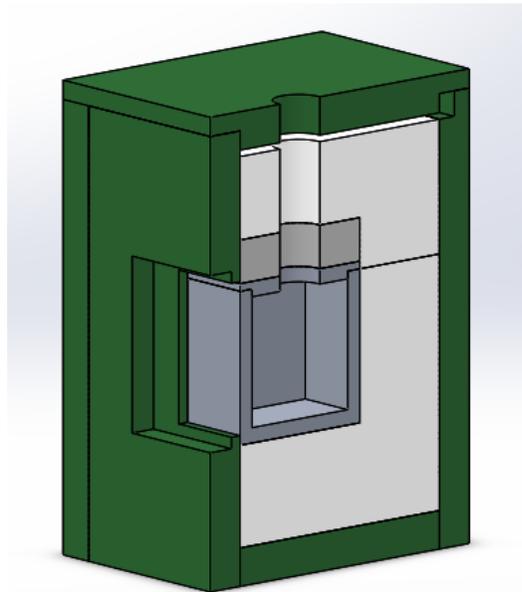


Figura 45. Aislamiento térmico interno (material blanco) de la cámara térmica

En la Figura 45, se puede observar que el material aislante (blanco) se posiciona entre ambas carcasas, con lo cual se espera que los cambios violentos de temperatura externos no afecten la temperatura interna y de igual forma a la medición en proceso en la obtención de la conductividad térmica.

En la Figura 46 se observa el diseño final de la cámara térmica en la cual ya se incluye tanto el disipador de calor y el ventilador del mismo. Cabe aclarar que el disipador y el ventilador no fueron diseñados ya que se contaban con ellos para su utilización.

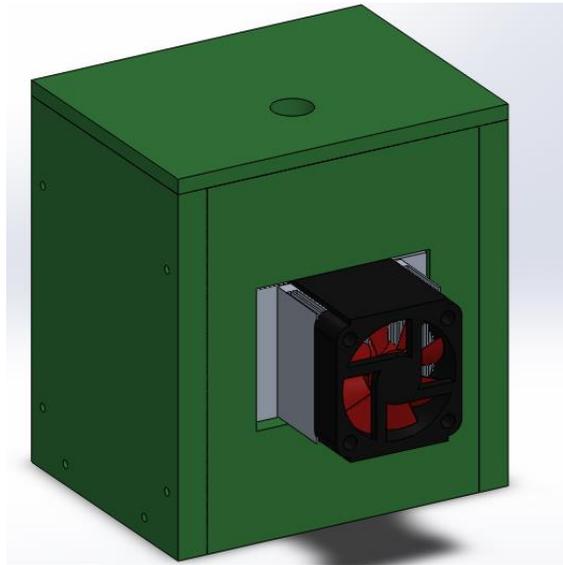


Figura 46. Diseño final de la cámara térmica

3.4.1 Posicionamiento de los dispositivos electrónicos

La posición de los dispositivos electrónicos a utilizar dentro de la cámara térmica es un punto que se debe mencionar (Figura 47), ya que estos hacen posible el control y censado de temperatura dentro de la citada cámara. Estos dispositivos son el sensor digital de temperatura y la celda Peltier, los cuales están posicionados justo entre el disipador y la carcasa interna (en el caso de la celda Peltier) y entre el material aislante unicel y la carcasa interna (en el caso del sensor).

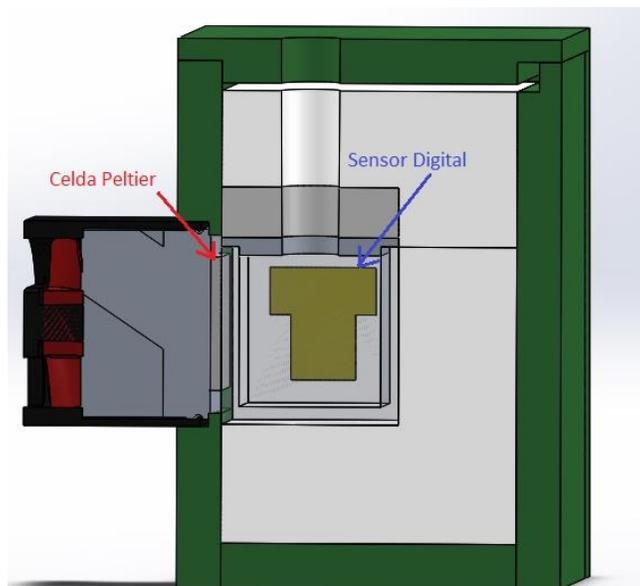


Figura 47. Posicionamiento de dispositivos internos de la cámara.



3.5 Diseño del control de temperatura para la cámara térmica

3.5.1 Controlador PID analógico

En este apartado se muestra los pasos en el cual un controlador PID es sintonizado para el control de la mencionada cámara térmica, cabe resaltar que este controlador fue realizado con la ayuda de la técnica de “root locus”, la cual proponiendo un polo de lazo cerrado y calculando las frecuencias naturales presentes de los componentes del controlador PID se hace posible la sintonización del controlador. Sin embargo, para este punto, es necesario contar con la planta (cámara térmica) ya manufacturada e instrumentada para así poder obtener su modelo matemático ante una respuesta escalón. Es importante aclarar que la manufactura de dicha planta se muestra en el siguiente capítulo.

En la obtención del modelo matemático se propuso un escalón de 12 Volts, con el cual se determinó la respuesta de la planta con respecto al tiempo. Con la ayuda del software OriginPro, se obtuvo su modelo matemático:

$$Y = 79.08978 - 56.38118e^{\left(-\frac{t}{902.98941}\right)} \quad (53)$$

Aplicando la transformada de Laplace a (50) se tiene:

$$Y(s) = 22.7086 \left(\frac{s+0.003856979}{s^2+0.001107432s} \right) \quad (54)$$

Como el control de temperatura será realizado en LabVIEW, se propone reemplazar la entrada en Volts por una entrada en grados Celsius, es decir por la máxima temperatura alcanzada por la planta, que en este caso es 78.55°C, de esta forma se puede manejar el control desde LabVIEW con set points en °C. Por lo tanto, el modelo matemático de la planta es:

$$Gc(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{22.7086 \left(\frac{s+0.003856979}{s^2+0.001107432s} \right)}{\frac{78.55}{s}} = 0.28909739 \left(\frac{s+0.003856979}{s+0.001107432} \right) \quad (55)$$

Lo siguiente en la sintonización del controlador PID es la elección de un polo de lazo cerrado (técnica root locus), y la consideración de los mismos polos y ceros que la planta y del controlador PID.

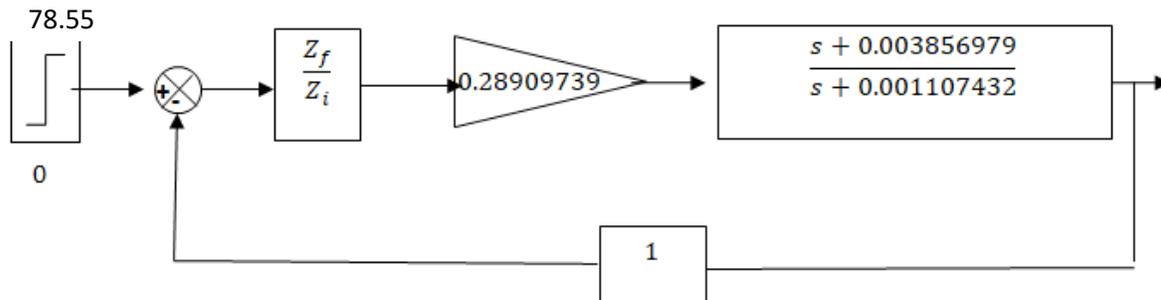


Figura 48. Diagrama a bloques del sistema.

Dónde:

$$\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{K \left(\frac{s}{\omega n_1} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega n_2} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{\omega n_3} + 1 \right)} = PID \quad (56)$$

$$PLC = -0.006 + j0.002$$

$$\text{Polo planta: } s = -0.001107432$$

$$\text{Cero planta: } s = -0.003856979$$

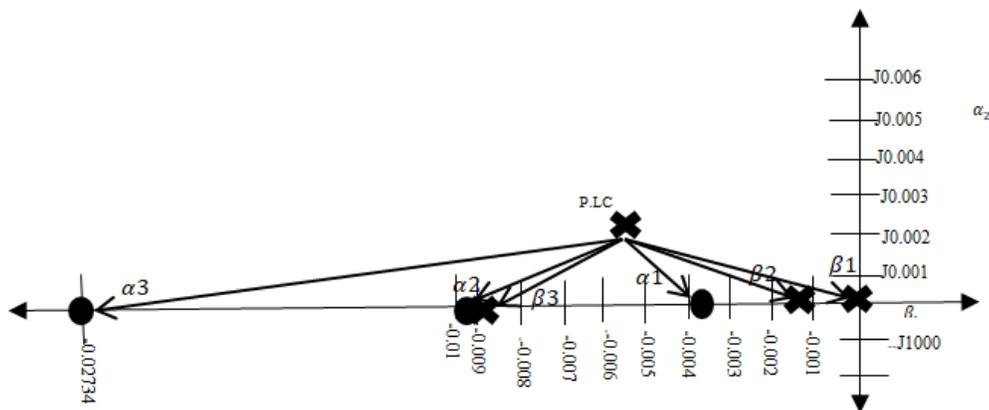


Figura 49. Posicionamiento de polos y ceros de control

Cálculos para la obtención de la frecuencia natural (ωn) de los Polos y Zeros del controlador y de la ganancia (K) del mismo.

$$\angle \beta_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \frac{0.002}{0.006} = 161.5650512^\circ \quad (57)$$

$$\angle \beta_2 = 180^\circ - \tan^{-1} \frac{0.002}{0.006 - 0.001107432} = 157.6076976^\circ \quad (58)$$



$$\angle\alpha_1 = 180^\circ - \tan^{-1} \frac{0.002}{0.006 - 0.003856979} = 136.9771193^\circ \quad (59)$$

Se propone el polo del controlador PID en 30° con respecto al PLC

$$\angle\beta_3 = 30^\circ \quad L\beta_3 = \frac{0.002}{\tan(30^\circ)} + 0.006 = 0.009464101 = \omega_3 \quad (60)$$

$$\angle\beta_1 - \angle\beta_2 - \angle\beta_3 - \angle\beta_4 + \angle\alpha_1 + \angle\alpha_2 + \angle\alpha_3 = -180^\circ \quad (61)$$

Despejando y sustituyendo valores:

$$\angle\alpha_2 + \angle\alpha_3 = -180^\circ + 161.5650512^\circ + 157.6076976^\circ + 30^\circ - 136.9771193^\circ = 32.3540008 \quad (62)$$

Con el valor máximo que ambos ángulos pueden sumar se propone:

$$\angle\alpha_2 = 27^\circ \quad L\alpha_2 = \frac{0.002}{\tan(27^\circ)} + 0.006 = 0.009925221 = \omega_1 \quad (63)$$

$$\angle\alpha_3 = 5.3540008^\circ \quad L\alpha_3 = \frac{+0.002}{\tan(5.3540008^\circ)} + 0.006 = 0.02734064433 = \omega_2 \quad (64)$$

Sustituyendo los valores obtenidos de las frecuencias naturales del controlador, se tiene:

$$PID = \frac{K \left(\frac{s}{0.009925221} + 1 \right) \left(\frac{s}{0.02734064433} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{0.009464101} + 1 \right)} \quad (65)$$

Con los valores establecidos para el controlador, se procede a calcular la ganancia del mismo. Para esto se tiene:

$$|G(S)H(S)| = \left[\frac{K \left(\frac{s}{0.009925221} + 1 \right) \left(\frac{s}{0.02734064433} + 1 \right) (0.28909739)(s + 0.003856979)}{s \left(\frac{s}{0.009464101} + 1 \right) (s + 0.001107432)} \right]_{s = -0.006 + j0.002} \quad (66)$$

Sustituyendo el valor de s:

$$\left[\frac{K \left(\frac{-0.006 + j0.002}{0.009925221} + 1 \right) \left(\frac{-0.006 + j0.002}{0.02734064433} + 1 \right) (0.28909739)(-0.006 + j0.002 + 0.003856979)}{(-0.006 + j0.002) \left(\frac{-0.006 + j0.002}{0.009464101} + 1 \right) (-0.006 + j0.002 + 0.001107432)} \right] \quad (67)$$

$$\left[\frac{K(0.3954794558 + j0.2015068481)(0.7805465033 + j0.07315116556)(0.28909739)(-0.002143021 + j0.002)}{(-0.006 + j0.002)(0.3660253626 + j0.2113248791)(-0.004892568 + j0.002)} \right] \quad (68)$$



Se calcula la magnitud para cada caso:

$$\left[\frac{K(0.44385697)(0.7839667957)(0.28909739)(0.002931303)}{(0.006324555)(0.422649702)(0.005285567)} \right] \quad (69)$$

$$\frac{K(14.12853699E-6)}{(286.5942953E-6)} = 1 \quad (70)$$

$$K = \frac{1(286.5942953E-6)}{14.12853699E-6} = 0.04929805533 \quad (71)$$

Entonces el controlador PID =

$$PID = \frac{0.04929805533 \left(\frac{s}{0.009925221} + 1 \right) \left(\frac{s}{0.02734064433} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{0.009464101} + 1 \right)} = \frac{1.6719333888(s+0.009925221)(s+0.02734064433)}{s(s+0.009464101)} \quad (72)$$

Para corroborar los valores calculados del controlador, en la Figura 50 se muestra una simulación realizada en Simulink, Matlab.

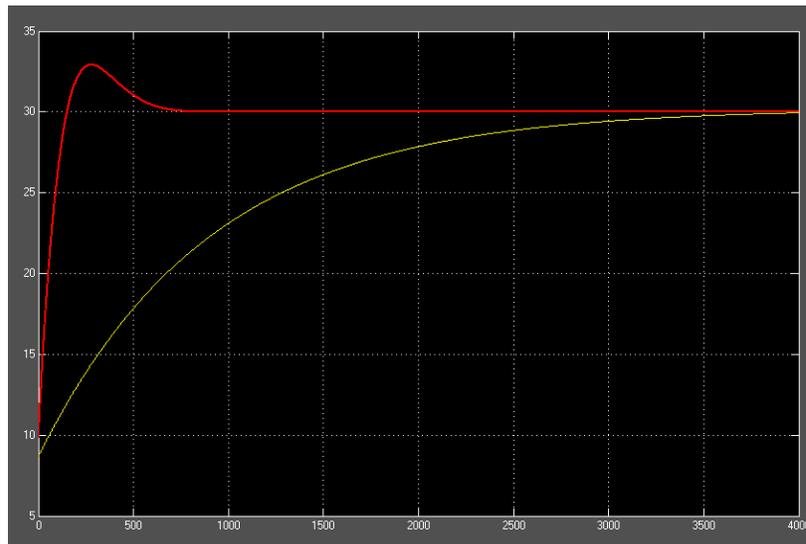


Figura 50. Simulación del controlador PID analógico.

3.5.2 Controlador PID digital

Para el diseño del controlador digital de la planta obtenida, se toma de base el controlador PID analógico diseñado con anterioridad y se procede a pasar del plano “s” del controlador analógico, al plano “Z” controlador digital. Cabe decir que se tomó como base la aproximación bilineal o de Tustin (70) para el diseño de dicho controlador.

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (73)$$



En el diseño del controlador se debe tomar en cuenta que para un buen funcionamiento del mismo (control óptimo), se debe de tener un tiempo de muestreo por lo menos 10 veces mayor que la frecuencia natural del controlador analógico (ω_n del PLC). Por lo cual se tiene:

$$\omega_{n_{PLC}} = \sqrt{-0.006^2 + 0.002^2} = 0.006324555 \quad (74)$$

Debido a que la respuesta de la planta diseñada es muy lenta y aunado a esto, se cuenta con una tarjeta NI myRIO, se consideró que el tiempo de muestreo del controlador digital a diseñar sea por lo menos 900 veces más rápido que la frecuencia natural del PLC.

$$T_{SPIDdigital} = \left(\frac{\omega_{n_{PLC}}}{2\pi} * 900 \right)^{-1} = \left(\frac{0.006324555}{2\pi} * 900 \right)^{-1} = 1.103843 \text{ seg} \quad (75)$$

Con el tiempo de muestreo calculado del controlador PID digital, se procede a obtener el controlador por aproximación bilineal.

$$G_c(z) = PIDdigital = \frac{1.671933 \left(\frac{2z-1}{T_{sz}z+1} + 0.009925221 \right) \left(\frac{2z-1}{T_{sz}z+1} + 0.02734064433 \right)}{\frac{2z-1}{T_{sz}z+1} \left(\frac{2z-1}{T_{sz}z+1} + 0.009464101 \right)} \quad (76)$$

Simplificando:

$$G_c(z) = \frac{1.701256761(z-0.9891038027)(z-0.9702688606)}{(z-1)(z-0.9939022432)} \quad (77)$$

Para comprobar el correcto funcionamiento del controlador se procedió a realizar la simulación en Matlab, asignando para ello el tiempo de muestreo calculado anteriormente.

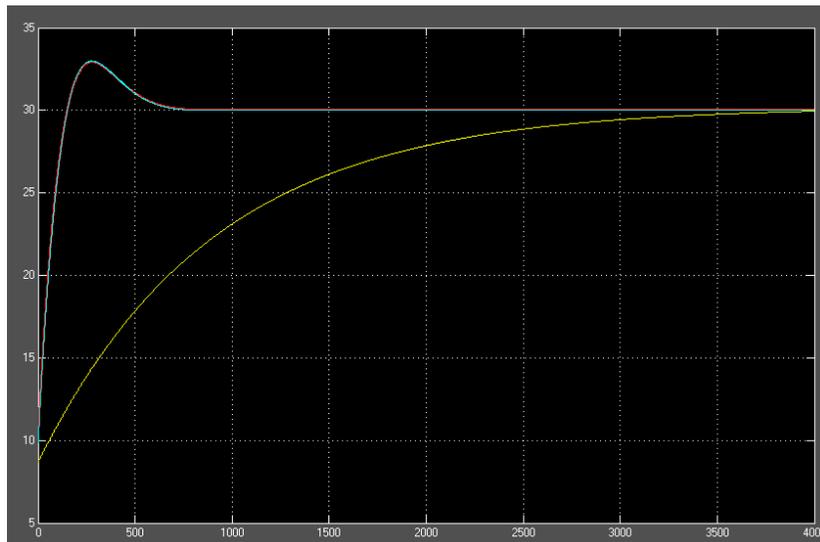


Figura 51. Simulación PID digital (azul) vs PID analógico (rojo)



Con el controlador en términos de “z” y con los valores establecidos del control digital, se realiza un algoritmo de programación, el cual puede ser implementado en cualquier microcontrolador. Dicho algoritmo se basa en la siguiente ecuación:

$$Gc(z) = \frac{2.894274567 - 5.670962467z^{-1} + 2.777625519z^{-2}}{1 - 1.9939022432z^{-1} + 0.9939022432z^{-2}} = \frac{Y(z)}{E(z)} \quad (78)$$

$$Y(z) * (1 - 1.9939022432z^{-1} + 0.9939022432z^{-2}) = E(z) * (2.894274567 - 5.670962467z^{-1} + 2.777625519z^{-2}) \quad (79)$$

$$Y(z) - 1.9939022432z^{-1}Y(z) + 0.9939022432z^{-2}Y(z) = 2.894274567E(z) - 5.670962467z^{-1}E(z) + 2.777625519z^{-2}E(z) \quad (80)$$

Despejando $Y(z)$

$$Y(z) = 2.894274567E(z) - 5.670962467z^{-1}E(z) + 2.777625519z^{-2}E(z) + 1.9939022432z^{-1}Y(z) - 0.9939022432z^{-2}Y(z) \quad (81)$$

Dónde: $K1 = 2.894274567$

$K2 = -5.670962467$

$K3 = 2.777625519$

$K4 = 1.9939022432$

$K5 = -0.9939022432$

Por tanto, el algoritmo de programación es:

$$Y(z) = K1 * E(z) + K2 * z^{-1}E(z) + K3 * z^{-2}E(z) + K4 * z^{-1}Y(z) + K5 * z^{-2}Y(z) \quad (82)$$

Dónde: $E(z)$ = Error actual

$z^{-1}E(z)$ = Registro con el valor anterior del Error actual

$z^{-2}E(z)$ = Registro con el valor anterior de $z^{-1}E(z)$

$z^{-1}Y(z)$ = Registro con el valor anterior de la salida del controlador

$z^{-2}Y(z)$ = Registro con el valor anterior de $z^{-1}Y(z)$

Dicho algoritmo, mostrado en la ecuación (82), puede ser utilizado en cualquier tarjeta electrónica, ya sea un microcontrolador o un FPGA, teniendo en cuenta el tiempo de muestreo calculado anteriormente (75).



CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detallarán los pasos realizados en la manufactura e instrumentación de la cámara térmica, los cuales engloban el acondicionamiento de dicha cámara y a su vez, el posicionamiento de los componentes electrónicos dentro de la misma, cabe decir que dichos componentes se encargan de manera general del manejo y control de la temperatura interna de la mencionada cámara térmica. Posteriormente, se explicará de manera específica la programación del sensor digital y de la programación del controlador PID de temperatura a utilizar, se debe aclarar que dicha programación se realizó en el software LabVIEW, mismo que da la posibilidad de desarrollar una interfaz visual de usuario. Por otra parte, se especificará el procedimiento llevado a cabo en la caracterización del termistor a utilizar dentro del sensor Hot-Ball, y a su vez, con los datos teóricos obtenidos en la caracterización, el desarrollo del circuito acondicionador para dicho termistor, el cual básicamente, se encargará de entregar una salida en voltaje entre 0 a 5 Volts, para el uso en un microcontrolador. Como última parte, se detallará el proceso de manufactura del sensor Hot-Ball, el cual será utilizado en las pruebas y obtención de los valores de la conductividad térmica.

4.1 Manufactura, acondicionamiento e instrumentación de la cámara térmica

4.1.1 Manufactura de la cámara térmica

Con el diseño CAD realizado de las piezas individuales que componen a la cámara térmica, mostrado en el capítulo anterior, se procedió a realizar la manufactura de las mismas, para esto, se exportaron dichas piezas en formato .dxf a un software de diseño CAM (manufactura asistida por computadora), en donde se programaron los comandos que debe seguir la maquina fresadora CNC (Figura 52), y como resultado del programa obtener un código G de la pieza a manufacturar. No obstante, se debe recordar que la manufactura de la carcasa interna de la cámara térmica no es requerida, puesto que se contaba con la mencionada carcasa.



Figura 52. Fresadora CNC

Con el código G, se procedió a manufacturar las piezas que componen a la cámara térmica. En la Figura 53 se puede observar la manufactura de una de las piezas mencionadas, en la cual se realiza un trabajo de perfilado con una fresa frontal de cuatro filos, se debe explicar que dicha fresa puede realizar un corte por extracción de viruta en el material debido a la velocidad de rotación y traslación de la fresa sobre un eje marcado en el diseño CAM, sin embargo si la velocidad de rotación o la de traslación es muy alta, la fresa o el material con el que se está trabando puede sufrir daño o deformación respectivamente.

Para la manufactura de las piezas restantes de la cámara térmica, se siguió el mismo patrón de corte, como el explicado anteriormente, ya que no se requería de otra forma de manufactura para la elaboración de las piezas restantes.

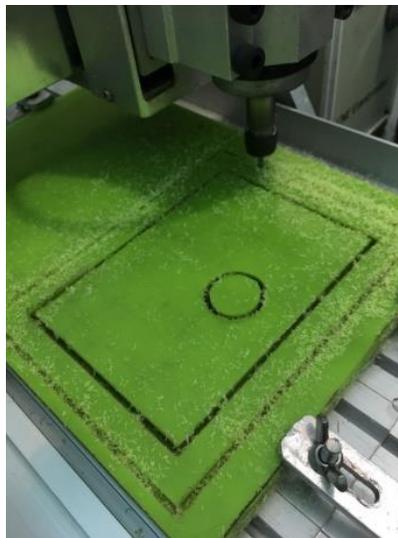


Figura 53. Manufactura de la cámara térmica



4.1.2 Ensamble de la cámara térmica

En el ensamble de la cámara térmica se tomó en cuenta el diseño 3D realizado en Solidworks, ya que con el diseño se alcanzó un orden durante el ensamble de dicha cámara. En cuanto al acoplamiento de las piezas se utilizaron tornillos de $\frac{1}{4}$ de pulgada para su sujeción, posicionando dichos tornillos en cavidades estratégicamente posicionados durante la manufactura de las aludidas piezas. En la Figura 54, se observa el ensamble de la cámara térmica, posicionando sobre esta, el disipador junto con su respectivo extractor calor, cabe aclarar que en el posicionamiento y dimensiones de estos componentes se tomaron en cuenta desde el diseño 3D de la cámara.

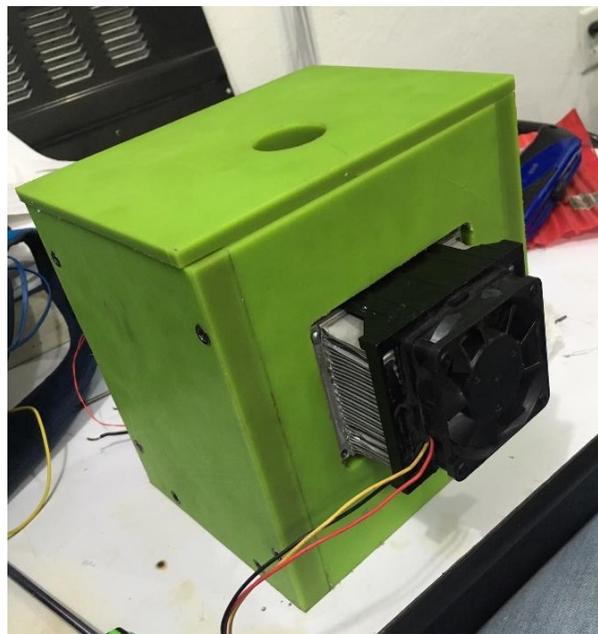


Figura 54. Ensamble de la cámara térmica

4.1.3 Acondicionamiento térmico e instrumentación de la cámara térmica

Con el ensamble finalizado de la cámara térmica, lo siguiente fue realizar el acondicionamiento térmico interno y a su vez la instrumentación dentro de la cámara térmica, por consiguiente, con estas últimas 2 partes se podrán realizar las pruebas del control de temperatura.

En cuanto al acondicionamiento térmico mencionado, el material predilecto para dicha tarea fue el poliestireno expandido, ya que dicho material cuenta con un buen comportamiento térmico, puesto que su coeficiente de conductividad va desde 0.034 a 0.045 W/(m*K), en otras palabras, dicho material se comporta como un excelente aislante térmico.

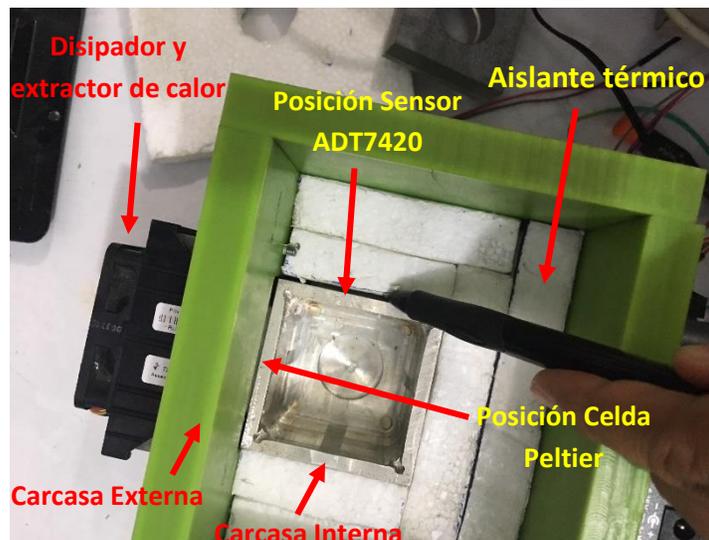


Figura 55. Acondicionamiento térmico y posicionamiento de los componentes electrónicos

En la Figura 55, se muestra una parte del acondicionamiento térmico al interior de la cámara, en este proceso se coloca el material aislante entre la carcasa externa (Material Nylamid) y la carcasa interna (Material aluminio). El propósito de dicho material, como ya se mencionó en el capítulo 3, es evitar los cambios de temperatura externos (temperatura ambiente) y de esta forma reducir significativamente los errores durante las mediciones al interior de cámara, por otra parte, gracias a las características termo físicas del material aislante, se logra conservar mejor el calor al interior de la cámara, con lo cual se disminuye la pérdida de calor referente al equilibrio térmico.

De igual forma en la Figura 55, se observa el posicionamiento de los dispositivos electrónicos a utilizar durante el funcionamiento de la cámara térmica, el primero de estos dispositivos es el actuador (Celda Peltier), mismo que está posicionado entre la carcasa interna y el disipador, el segundo dispositivo es el instrumento de medición (Sensor de temperatura ADT7420), el cual está posicionado entre la carcasa interna y el material aislante. Cabe decir que el instrumento de medición fue posicionado cerca del actuador, con la finalidad de reducir el tiempo en la obtención de una medición de temperatura.

Por último, con el acondicionamiento térmico y el posicionamiento de los dispositivos electrónicos, se procedió a realizar la conexión tanto del sensor como del actuador al FPGA NI myRIO y al puente H respectivamente. En la Figura 56 se muestra un diagrama esquemático que representan las conexiones mencionadas.

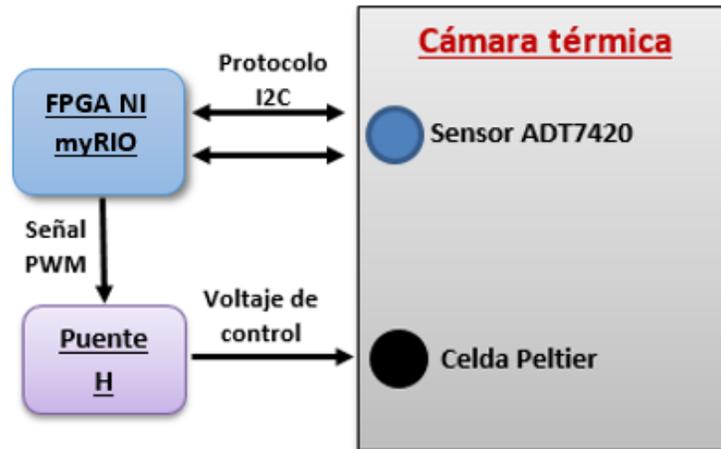


Figura 56. Diagrama esquemático de conexión de la cámara térmica

Con el diagrama mostrado en la figura anterior, se puede inferir que el funcionamiento de la cámara térmica depende en gran medida del FPGA, ya que este se encarga desde la adquisición de los datos obtenidos por sensor de temperatura, hasta del control del puente H, y por consiguiente del control de la Celda Peltier. En la Figura 57, se muestra la conexión física del FPGA con los componentes antes mencionados.

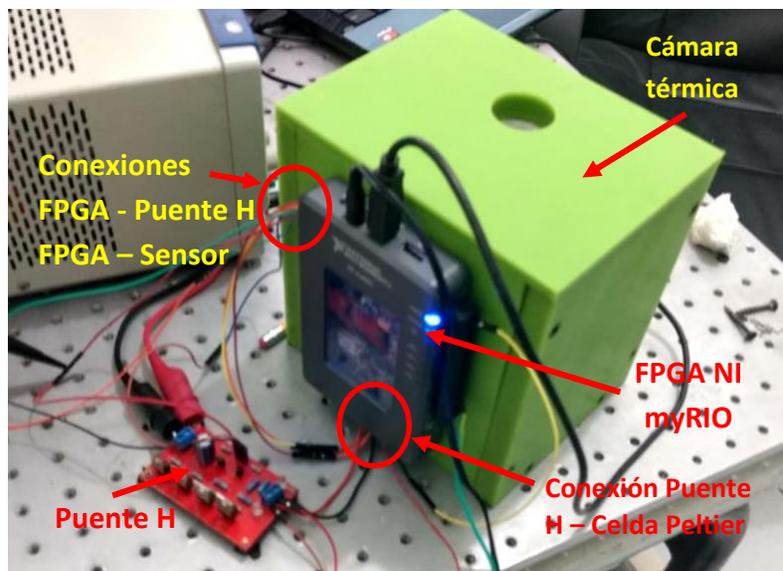


Figura 57. Conexión FPGA - Componentes



4.2 Programación LabVIEW

4.2.1 Programación Sensor Digital ADT7420 – NI myRIO

Para la programación del sensor ADT7420 junto con la tarjeta NI myRIO, fue necesario la creación de un proyecto desde el software LabVIEW, el cual permite el uso de un template pre-programado para la utilización de la aludida tarjeta, este template permite crear y manejar diversos Virtual Instruments (VI) e intercomunicarlos con la tarjeta NI myRIO a utilizar.

En cuanto a la configuración y lectura del sensor a utilizar con la tarjeta NI myRIO, se procedió a realizar la programación del protocolo de comunicación I²C a bajo nivel, ya que de esta forma se puede acceder a todas las configuraciones que el sensor y dicho protocolo pueden soportar. Cabe de decir que, para la configuración y conexión I²C correcta del sensor a la tarjeta, dicha configuración se dividió en 3 partes (Se muestra en Apéndice). La primera de estas es la denominada inicialización, en la cual se configuran las características principales que solo se ejecutaran una vez durante el programa, dichas características engloban la asignación de velocidad de transmisión de datos con la que se conectara el maestro (FPGA) – esclavo (Sensor), por otra parte, se realiza la asignación del puerto I²C (pines de conexión) a utilizar en el FPGA para realizar la conexión física con el Sensor.

La segunda parte en la programación, a grandes rasgos, se encarga de especificar a los registros internos del sensor la configuración de la resolución de conversión, la cual es a 16 bits. Por otra parte, se encarga de solicitar al sensor los datos de temperatura ya convertidos, estos datos son mandados en formato binario dentro de 2 Bytes, posteriormente dichos Bytes se convierten en formato tipo entero para su utilización. Cabe decir que es necesario conocer la dirección de acceso del dispositivo esclavo, ya que sin dicha dirección no se puede acceder o solicitar datos de un dispositivo que cuente con un protocolo I²C.

Como última parte en la programación, se realiza el cierre del puerto y de la comunicación I²C establecida con el sensor, se debe mencionar que dicho cierre es generado por dos casos, el primero se genera por detener la ejecución del ciclo principal de trabajo del FPGA, que en este caso es la parte de la adquisición y procesamiento de datos y, como segundo caso, por la detección o generación de un error durante la ejecución del programa.

4.2.2 Programación control PID de temperatura

En cuanto al manejo de la temperatura de la cámara térmica, se debe tener en cuenta no solo la programación de los valores calculados del controlador PID en el capítulo 3, si no establecer las salidas necesarias para lograr el correcto manejo y ejecución del control antes mencionado, estas salidas son las señales PWM y digital, las cuales se encargan de controlar, activar o desactivar la celda Peltier por medio del puente H. La programación del control PID, como en el caso de la programación del sensor ADT7420, se divide en 3 partes para su correcta ejecución.



Se debe mencionar que el programa de control PID, debe incluir la programación realizada para el manejo del sensor de temperatura, ya que dicho sensor proporcionará la variable a controlar, misma que será procesada durante en la ejecución del control. Señalado lo anterior, como primera parte en la programación del control PID, se realizó la inicialización del protocolo de comunicación I²C, con el cual se comunica el sensor con el FPGA, y a su vez la inicialización de las señas PWM y digital a utilizar. Cabe decir que, en la inicialización de las señales mencionadas se configuran los puertos a utilizar en el FPGA, en los cuales se realizan las conexiones físicas con el puente H, y en el caso particular de la señal PWM se realiza la asignación de la frecuencia a utilizar durante la rutina de control.

Como segunda parte, se realizó la programación de los parámetros obtenidos en el capítulo 3 del control PID de temperatura, se tomó la opción de utilizar el sub VI del PID dado por National Instrument dentro de LabVIEW, ya que este es capaz de entregar una salida en los valores que el usuario requiera para modificar el *duty cycle* del PWM, que en este caso son valores entre 0 y 1. Agregando a lo anterior, el mencionado sub VI está diseñado más que nada para su utilización con la tarjeta NI myRIO, con lo cual se asegura un estabilidad durante su ejecución.

Como última parte en la programación del controlador PID, se realiza la finalización del programa, en el cual se cierran los puertos abiertos del PWM y de la señal digital, así como la del protocolo I²C, esta última parte se alcanza al detener la ejecución del programa ya sea por el usuario o por la generación de un error, este último, se puede llegar a producir durante la ejecución de la rutina, parando al sistema y mostrando el error generado.

Una vez realizada la programación de los puertos del FPGA, del sensor digital y del controlador en un mismo VI (se anexa en Apéndice C), se procedió a realizar la interfaz de usuario de dicho programa (Figura 58), en esta interfaz, es posible modificar la configuración de los registros del sensor y, por consiguiente, cambiar la resolución de conversión o en su defecto, el modo de operación del sensor, entre otras características. Por otro lado, con dicha interfaz se podrán realizar las asignaciones de los parámetros individuales del control PID calculados, así como el establecimiento del rango de salida del mencionado controlador. Es necesario explicar que, tanto el programa del controlador como el de la interfaz de usuario, son ejecutados desde la tarjeta NI myRIO, siendo el ordenador el medio para la visualización de la interfaz.

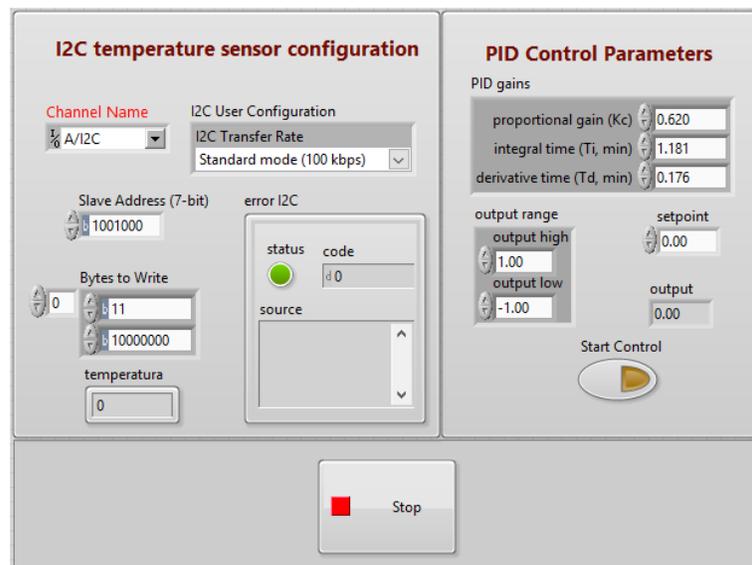


Figura 58. Interfaz de usuario del control de temperatura

Con el programa realizado para el control PID de temperatura, se procedió a realizar una base de datos en un VI (se anexa en Apéndice D), pero en este caso, ejecutada desde el ordenador, dicha base de datos tiene como tarea principal el despliegue gráfico de la evolución de temperatura controlada en tiempo real, y a su vez de guardar los datos de la evolución de temperatura con respecto al tiempo. Cabe mencionar que la finalidad del antedicho VI es la de disminuir la carga de procesos dentro del FPGA, ya que el procesamiento tanto gráfico como el de la creación de una base de datos en tiempo real, recae sobre el ordenador. La Figura 59, muestra la interfaz creada para la base de datos programada, se debe mencionar que, como punto adicional, dicha interfaz es capaz de generar un archivo .txt con los valores de temperatura con respecto al tiempo.

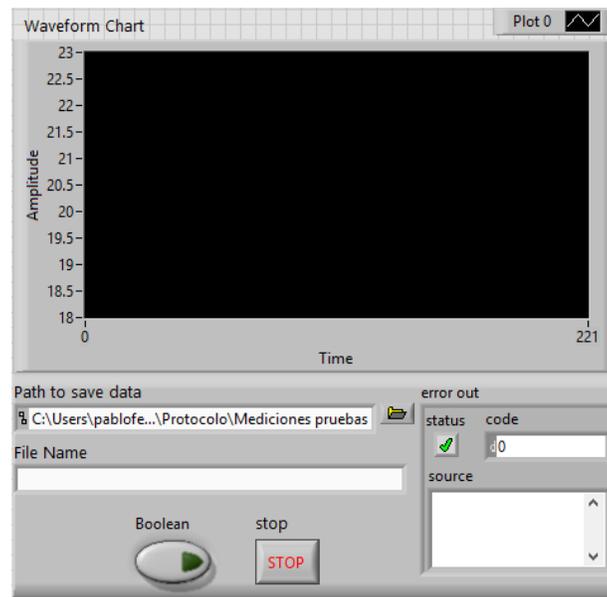


Figura 59. Interfaz visual base de datos.

4.3 Pruebas de control de temperatura

Con los VI programados y funcionando correctamente, se procedió a interconectar la cámara térmica instrumentada (Figura 60) al ordenador, la fuente de alimentación y al FPGA NI myRIO para la realización de las pruebas del control de temperatura programado. Asimismo, para la verificación del correcto funcionamiento de la salida del controlador y del puente H, se añadió un osciloscopio y un multímetro con la finalidad de analizar la salida de la señal PWM proveniente del controlador y de la señal de voltaje entregada por el puente H.

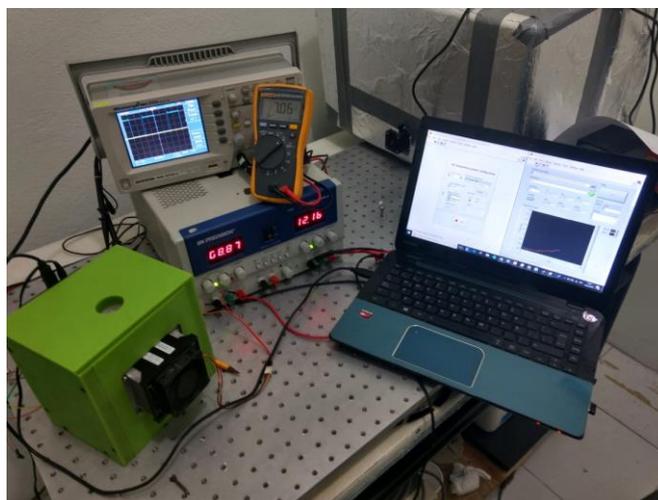


Figura 60. Interconexión PC – Cámara térmica – Fuente de alimentación.

Una vez interconectado el sistema correctamente, se realizaron las pruebas del control de temperatura propuesto, con las cuales se pudo corroborar el correcto funcionamiento del



mismo y, por consiguiente, de la cámara térmica. Cabe decir que, gracias a la facilidad de guardar los datos de temperatura desde la interfaz y, a su vez de exportarlo en formato .txt, se procedió a realizar el procesamiento de dichos datos con ayuda de la herramienta OriginPro, todo lo anterior con la finalidad de analizar el comportamiento del control de temperatura implementado en la cámara térmica. La Figura 61 muestra dicho comportamiento en estado estable, en el cual se puede destacar el rango de variación de temperatura del control, el cual oscila en un rango de $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$. Por lo anterior se infiere que el control diseñado para la cámara térmica manufacturada es viable para su utilización.

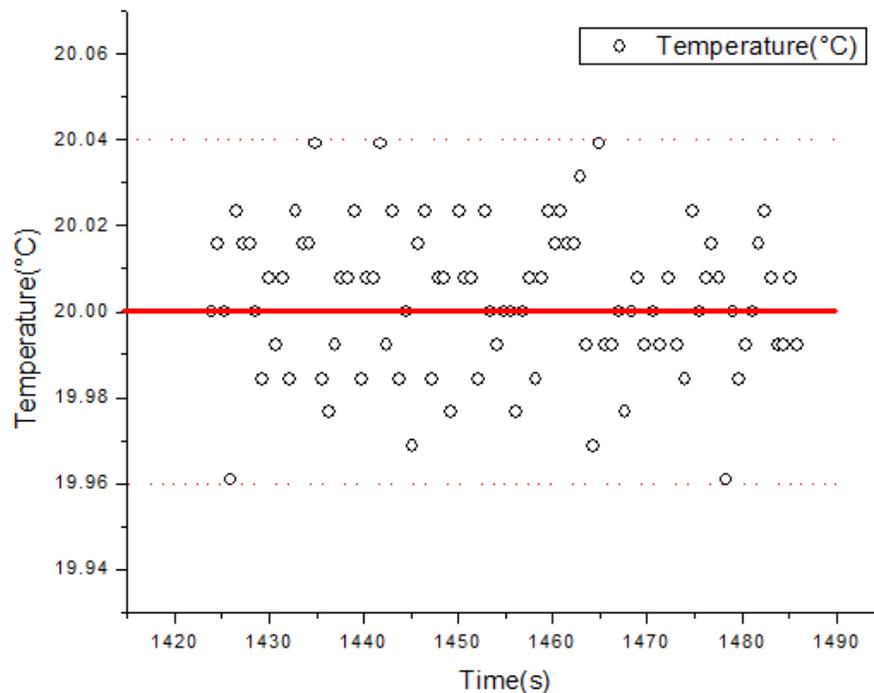


Figura 61. Grafica respuesta del control de temperatura, se muestra adicionalmente un acercamiento.

4.4 Manufactura del sensor Hot-Ball

El sensor Hot-Ball, es un instrumento especializado en la generación puntual de calor y, al mismo tiempo, en la medición de temperatura dentro de un líquido o sólido. Gracias a estas particularidades, dicho sensor ofrece la posibilidad de obtener una medición transitoria de un cambio de temperatura cuando este mismo es activado, con la cual es posible calcular la conductividad térmica de un líquido muestreado cuando la temperatura alcanza un estado estable. En la medición de dicha conductividad térmica, con el mencionado sensor, se deben tener en cuenta las características físicas del mismo, es decir, el material y dimensiones con las que fue manufacturado para lograr una correcta calibración del mismo.

Para la manufactura de dicho sensor se debe considerar, en primer término, las dimensiones de la esfera, la cual debe ser menor a 4 mm de diámetro, esto para asegurar que la fuente de



calor a generar sea en forma puntual, a su vez, en segundo término, se debe tener en cuenta la forma física del sensor, es decir, mantener una forma esférica para garantizar la generación de un campo de calor uniforme alrededor del sensor. Lo anterior se logró debido al uso de balines de acero (Figura 62), normalmente utilizados en rodamientos, con los cuales se logró la manufactura del sensor antes mencionado.



Figura 62. Material de construcción del Sensor Hot-Ball (Balines de acero)

Como primera parte en la manufactura del sensor, se obtuvo la carcasa del Hot-Ball, la cual contendrá a los dispositivos electrónicos que conforman al sensor, dicha carcasa se logró obtener al dividir los balines por la mitad, asegurando con un vernier la exactitud de estas partes, una vez obtenidas las mitades de los aludidos balines, se procedió a extraer del interior material sobrante, con la finalidad de formar una semiesfera hueca para la colocación de los dispositivos electrónicos (Figura 63). Cabe indicar que, para lograr extraer el material interior de la esfera de acero, se hizo uso de una fresa cortadora de bola de diamante de un diámetro de 2mm.

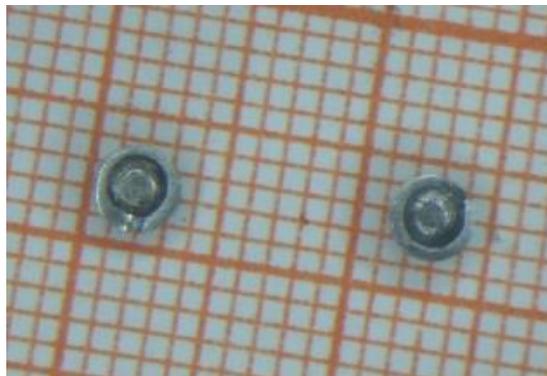


Figura 63. Carcasa del sensor Hot-Ball

En la Figura 63 se observa la carcasa manufacturada para el sensor Hot-Ball, y de igual forma, con ayuda del papel milimétrico, las dimensiones de la antedicha carcasa. Estas dimensiones son de aproximadamente 3mm de diámetro para cada parte, con lo cual se asegura que la generación de calor sea de forma puntual y uniforme alrededor del sensor.



Como segunda parte en la realización del sensor Hot-Ball, se procedió a colocar los dispositivos electrónicos en el interior de la carcasa antes fabricada (Figura 64), estos dispositivos, como ya se mencionó, son los encargados de generar un cambio de temperatura y al mismo tiempo medir dicha respuesta. Se debe decir que los dispositivos antedichos son una resistencia smd y un sensor termoresistivo PT100 de pequeñas dimensiones, es decir de alrededor de los 2mm de longitud.



Figura 64. Colocación de los dispositivos electrónicos

El siguiente punto en la elaboración del sensor Hot-Ball, fue el encapsulo entre las carcasas manufactureras de los dispositivos electrónicos. Dicho encapsulado se logró gracias a la utilización de una capa fina de resina epoxi para la sujeción de los componentes y, por otro lado, para adherir ambas carcasas. Cabe explicar que se hizo uso de la resina epoxi debido a las características termoestables que esta presenta, las cuales a grandes rasgos engloban, la resistencia a impactos, a los solventes, a altas temperaturas, entre otras.

La Figura 65 muestra el sensor Hot-Ball terminado, en la cual se puede observar que, gracias a la utilización de los balines de acero para la realización del sensor, se logró conservar tanto la forma esférica como las dimensiones del mismo, y de esta forma asegurar el correcto funcionamiento y propósito del sensor Hot-Ball. De igual forma se observa en la figura mencionada la utilización de hilo magnético, normalmente utilizado en bobinados, para la conexión de los dispositivos electrónicos internos, puesto que debido al recubrimiento aislante y las dimensiones físicas que provee dicho hilo, se facilita la conexión hacia los instrumentos de medición sin afectar las dimensiones y forma del Hot-Ball.

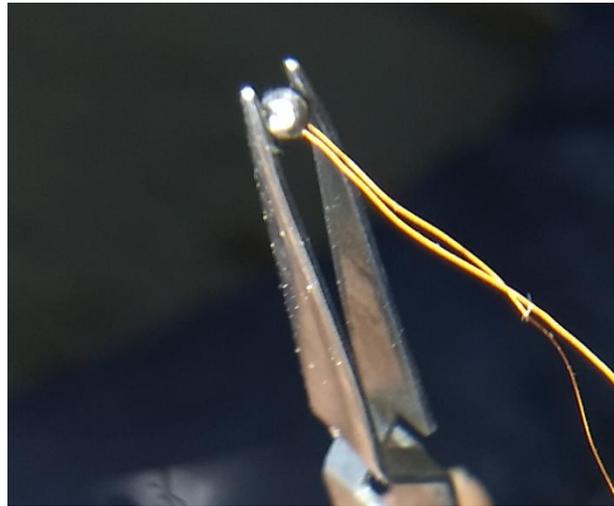


Figura 65. Vista del Sensor Hot-Ball fabricado

4.4.1 Pruebas de funcionamiento del Sensor Hot-Ball

Para la realización de las primeras pruebas del sensor, se corrobora, en primer término, el correcto funcionamiento de los componentes internos del sensor, midiendo con un multímetro sus valores óhmicos de cada uno de los componentes, y de esta forma asegurar tanto la conexión como los valores de los mismos. La Figura 66 muestra la prueba realizada para corroborar el funcionamiento de los mencionados componentes, mostrando en las partes A) y B) el aumento del valor resistivo al tocar el sensor y, mostrando en la parte C) el valor resistivo del elemento calefactor, que en este caso es una resistencia SMD de 100 ohm.

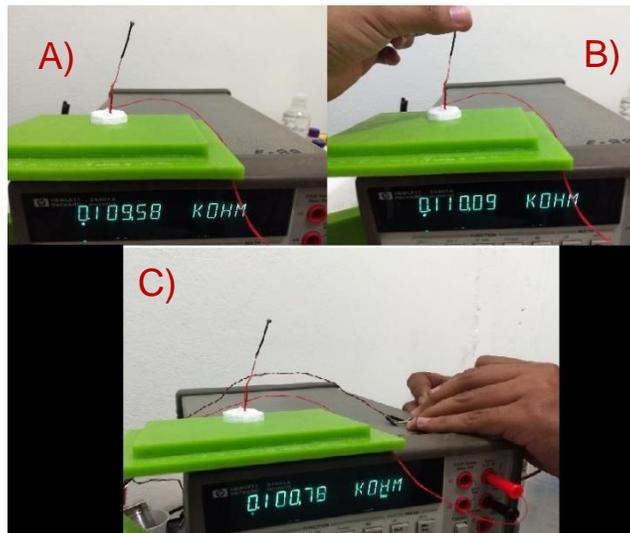


Figura 66. Pruebas de funcionamiento del sensor Hot-Ball



4.4.2 Activación del sensor Hot-Ball

Como ya se había mencionado, el sensor Hot-Ball es un instrumento capaz de generar una pequeña fuente de calor, misma que puede ser activada o desactivada en un momento determinado. Para lograr esto, se realizó un circuito en el cual se establece una corriente y voltaje, por ende, una potencia determinada que será disipada por la resistencia calefactora al interior de la Hot-Ball. El diagrama del circuito mencionado se muestra en la Figura 67, en el cual se puede observar tanto una resistencia limitadora de corriente como la resistencia calefactora.

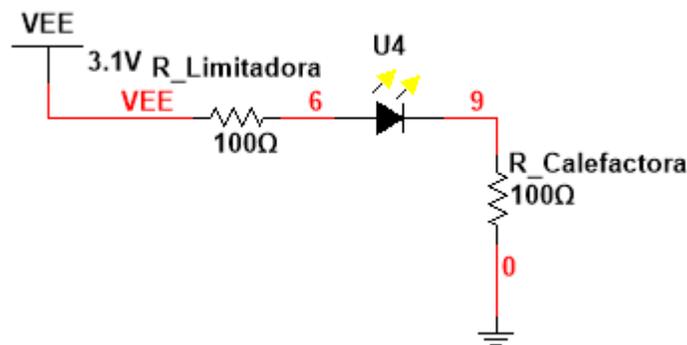


Figura 67. Circuito activación Hot-ball.

Para determinar el valor de la potencia que la resistencia calefactora disipa, se tomó una medición del voltaje establecido por el diodo, obteniendo un valor de 1.91 Volts con lo cual se calculan los siguientes datos:

$$V_{EE} = V_{LED} + V_{RT} = V_{LED} + (V_{RL} + V_{RC}) \quad (86)$$

Donde: V_{EE} es el voltaje de la fuente, V_{LED} es el voltaje en el LED, V_{RT} es el voltaje total de la resistencia del circuito, V_{RL} es el voltaje en la resistencia de carga y V_{RC} es el voltaje en la resistencia calefactora.

Despejando V_{RT} se tiene:

$$V_{RT} = V_{EE} - V_{LED} \quad (87)$$

$$V_{RT} = 3.1V - 1.91V = 1.19V \quad (88)$$

Como V_{RT} es igual a la sumatoria de V_{RL} y V_{RC} y ambas resistencias son de valores aproximadamente iguales a 100 ohm, se procedió a obtener la corriente del circuito, obteniendo los siguiente valores.

$$I_{cto} = \frac{V_{RT}}{R_T} = \frac{1.19}{200} = 5.95mA \quad (89)$$



Una vez obtenida la corriente se procedió a obtener la potencia que disipara la resistencia calefactora, por tanto, se tiene que el valor de potencia es:

$$P_{R_{calefactora}} = I_{cto}^2 * R_{calefactora} = (5.95mA)^2 * 100 = 3.54mW \quad (90)$$

Con los cálculos obtenidos, se puede realizar una aproximación de la potencia generada por el circuito al ser activado, y por consiguiente la generación de una fuente puntual de calor por el sensor Hot-Ball durante el tiempo que esta permanezca activada.

4.5 Caracterización del termistor

En este punto se expone el procedimiento para lograr la caracterización del termistor NTC que está presente en el interior del denominado sensor Hot-Ball. Para alcanzar dicha caracterización se tomó como base el uso de la cámara térmica ya controlada y el multímetro HP34401, el primero de estos tiene la finalidad de establecer una temperatura constante al interior de la cámara y el segundo, tiene la finalidad de obtener el valor óhmico del termistor a dicha temperatura. Es necesario aclarar que para el manejo de la cámara térmica y del multímetro, se realizó y añadió un VI al proyecto encargado del manejo del FPGA y del control de temperatura, pero en este caso el VI es ejecutado desde el ordenador.

4.5.1 VI manejo Multímetro HP34401

Para lograr el control del Multímetro, se debe establecer una comunicación desde el VI hacia el instrumento de medición, esto se logra con el protocolo GPIB, el cual, a grandes rasgos, es un bus de datos de propósito general para la conexión y manejo de instrumentos de medición. La programación del VI para el manejo del multímetro (Apéndice F), se realiza con la inclusión de los denominados "Instruments Drivers", mismos que son proporcionados por el fabricante del instrumento de medición, y con los cuales es posible realizar la configuración del multímetro.

Cabe mencionar que el VI realizado, incluye la programación de una base de datos, en la cual es posible guardar los datos de temperatura y resistencia con respecto al tiempo, en un formato .txt. Gracias a esta opción es posible llevar a cabo un análisis de la respuesta del termistor a diferentes temperaturas y obtener de este modo su curva característica.

La Figura 68 muestra la interfaz realizada para el VI del mencionado instrumento de medición, dicha interfaz es capaz de desplegar gráficamente los valores de las variables de temperatura y resistencia en tiempo real, por otra parte, la antedicha interfaz cuenta con las opciones para guardar los datos generados en la base de datos en una carpeta dentro del ordenador para su posterior análisis.

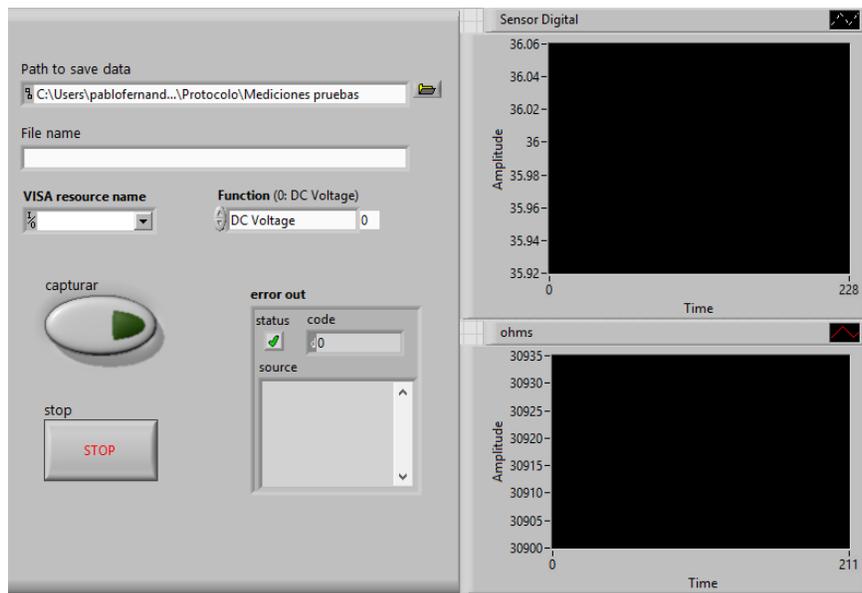


Figura 68. Interfaz del VI manejo multímetro HP34401

4.5.2 Obtención de la curva característica del termistor

La obtención de la curva característica del termistor NTC, se logra por medio del muestreo del valor óhmico del sensor a diferentes temperaturas, las cuales deben estar lo suficientemente estables durante el proceso de medición, ya que el termistor es un dispositivo bastante sensible a los cambios mínimos de temperatura. Con los datos obtenidos de dichas mediciones se procedió a realizar un análisis en el software OriginPro, en el cual se realizó un análisis estadístico sobre la columna con el valor temperatura y la columna con el valor resistivo, y de esta forma obtener un valor medio para ambas variables. La Figura 69, muestra el análisis estadístico antes mencionado, el cual se obtienen los valores medios de ambas variables y a su vez, la desviación estándar que presentan dichos datos.

Statistics on Columns (13/11/2018 15:41:50)

- Notes
- Input Data
- Descriptive Statistics

	N total	Mean	Standard Deviation	Sum
Temp	168	11.49349	0.02125	1930.90648
Termistor	168	93498.32833	9.79083	1.57077E7

Figura 69. Datos estadísticos obtenidos

Cabe decir que, con los datos estadísticos obtenidos de cada temperatura muestreada, se procedió a realizar un nuevo libro de trabajo en OriginPro, esto con el fin de obtener la curva que caracteriza al termistor, cabe decir que, gracias a la desviación estándar obtenida durante el análisis de los datos, se puede graficar la curva del termistor con un margen de error para cada variable. La Figura 70 muestra gráficamente la curva que caracteriza al termistor.

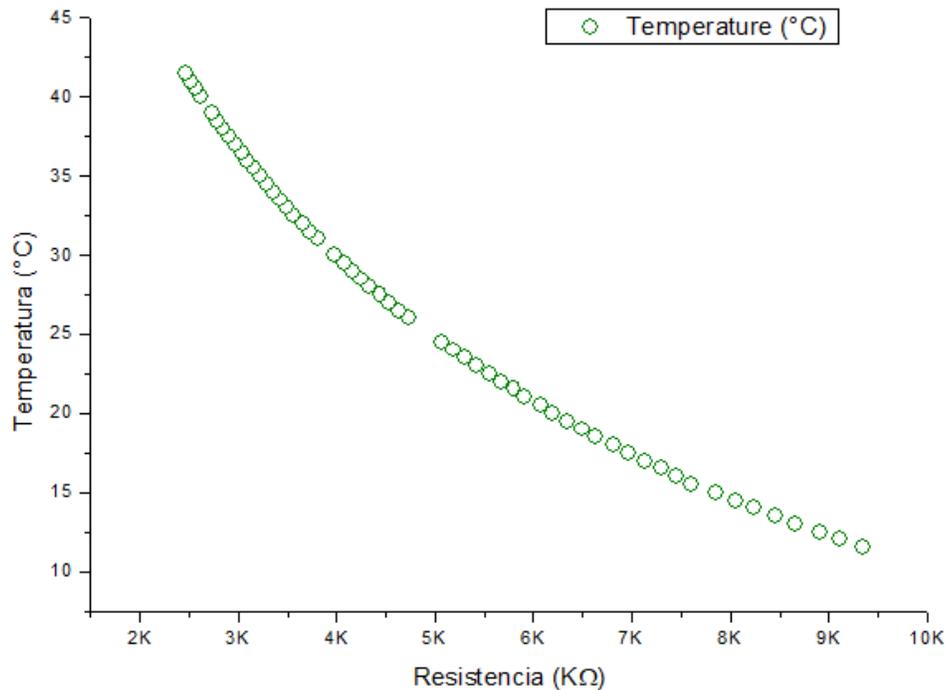


Figura 70. Curva característica del termistor NTC

4.6 Modelo matemático

Con la curva obtenida en el punto anterior, se puede observar el comportamiento real del termistor con forma de la temperatura aumenta o disminuye, sin embargo, para este punto es necesario encontrar un modelo matemático que describa el comportamiento del termistor, es decir, encontrar una ecuación matemática que represente el valor resistivo conforme a la variación de temperatura.

Para lograr obtener el modelo matemático, se propuso trabajar con la ecuación de Steinhart y Hart en su forma expandida, mostrada en (8), la cual describe el comportamiento de los sensores termistores. Cabe decir que gracias a los cuatro parámetros presentes en la mencionada ecuación se logra un mejor ajuste entre la curva real de los valores óhmicos y la ecuación teórica propuesta, alcanzando un error de solo 0.0015°C , en un rango de 0 a 100°C [22].

Para identificar los valores de los parámetros (coeficientes) presentes en la ecuación de Steinhart, se propuso realizar el cálculo de los coeficientes por dos métodos distintos. El primer método propone la obtención de los parámetros por medio de la solución de un sistema de ecuaciones (80), en el cual se sustituyen 4 valores reales tanto de temperatura como de resistencia y a su vez, despejando la incógnita requerida, se obtiene el valor buscado de los coeficientes.



$$\begin{bmatrix} 1 & \ln R_1 & (\ln R_1)^2 & (\ln R_1)^3 \\ 1 & \ln R_2 & (\ln R_2)^2 & (\ln R_2)^3 \\ 1 & \ln R_3 & (\ln R_3)^2 & (\ln R_3)^3 \\ 1 & \ln R_4 & (\ln R_4)^2 & (\ln R_4)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^{-1} \\ T_2^{-1} \\ T_3^{-1} \\ T_4^{-1} \end{bmatrix} \quad (83)$$

El segundo método consiste en buscar el valor de los coeficientes de la ecuación de Steinhart por medio del ajuste de mínimos cuadrados, este método a grandes rasgos ajusta los valores de los coeficientes, minimizando la distancia entre la medición real y el valor calculado para un mismo punto. Se debe decir que, en el desarrollo de ambos métodos, se realizó un programa en Matlab con el fin de facilitar los cálculos de los coeficientes buscados para la ecuación de Steinhart. Se debe mencionar que, en la solución de la ecuación antes mencionada para la obtención de los coeficientes, la temperatura debe ser convertida de °C a ° K y que, por otra parte, la programación de ambos métodos se muestra en el apéndice F.

La tabla 2 muestra la comparación de resultados de los coeficientes obtenidos por medio de Matlab (se anexa en apéndice G).

Tabla 2. Comparación de los coeficientes obtenidos.

Método	Sistema Ecuaciones	Mínimos Cuadrados.	Diferencia
a	-1.0089E-06	-1.009E-06	0.0001E-06
b	2.9238E-05	2.924E-05	0.0002E-06
c	-2.6513E-05	-2.651E-05	0.0003E-06
d	0.0015	0.001499	0.000001

Con los coeficientes obtenidos por los métodos propuestos, se tiene entonces:

$$\frac{1}{T} = -1.0089E - 06 \ln(R)^3 + 2.9238E - 05 \ln(R)^2 - 2.6513E - 05 \ln R + 0.0015 \quad (84)$$

Para una solución con el sistema de ecuaciones.

$$\frac{1}{T} = -1.009E - 06 \ln(R)^3 + 2.924E - 05 \ln(R)^2 - 2.6513E - 05 \ln R + 0.001499 \quad (85)$$

Para una solución con funciones de ajuste desde Matlab.

Analizando la comparación mostrada en la Tabla 2, se puede observar que los coeficientes encontrados presentan una similitud relativamente próxima, por lo cual se puede deducir que ambas soluciones son correctas, sin embargo, para determinar cuál de las dos soluciones representa mejor al comportamiento real del sensor, se procede a realizar el cálculo de error estándar y el ajuste de curva (R Square) con respecto a los datos experimentales.



4.7 Calculo del error

Para poder determinar cuál de las ecuaciones obtenidas tiene un ajuste más preciso, primero se graficó la curva teórica de ambas ecuaciones, sustituyendo, en cada una, el valor real óhmico medido. De esta forma se puede realizar una comparación entre la curva real (datos experimentales) y la curva teórica (datos de ajuste) para un mismo punto (Figura 71), por consiguiente, determinar, por medio del cálculo de error, cuál expresión matemática realiza un mejor ajuste.

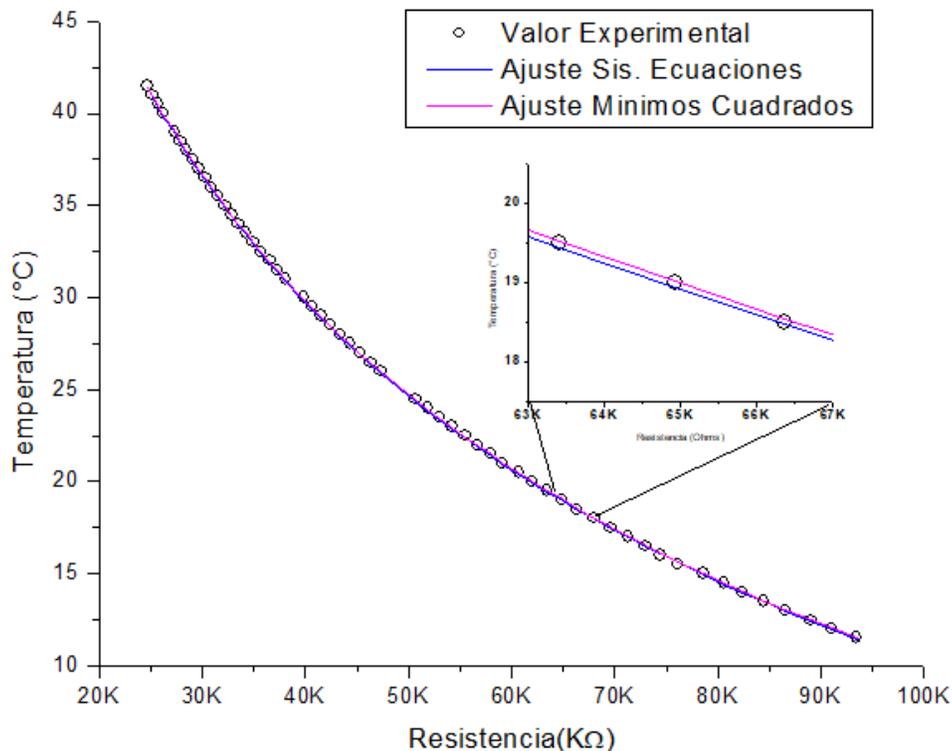


Figura 71. Ajuste de los modelos matemáticos calculados para termistor

Como se observa en la figura anterior, los modelos matemáticos cálculos por el sistema de ecuaciones y por funciones de ajuste en Matlab, proporcionan un comportamiento teórico muy cercanos a los valores experimentales, sin embargo, se debe conocer el error presente entre las curvas teóricas y la curva experimental con la finalidad de poder determinar cuál de los dos modelos caracteriza mejor al termistor.

4.7.1 Error cuadrático medio

El cálculo del error cuadrático medio (ECM) muestra, que tan adecuados son los modelos calculados con respecto a los datos teóricos, es decir que, entre menor sea dicho error, mayor será el ajuste realizado por el modelo matemático calculado. Por tanto, resolviendo la



ecuación del error cuadrático medio, mostrada en la ecuación (20), se tiene los siguientes datos:

ECM Ajuste Sistema Ecuaciones = 0.0135

ECM Ajuste Fitting Matlab = 0.00344

Se debe explicar que, para obtener dicho error, primero se realizó el cálculo del error cuadrático (EC) para un mismo punto, obtenido por la diferencia cuadrática del valor teórico y el experimental, posteriormente, con dichos valores, se realizó el cálculo del ECM obtenido mediante la media aritmética de la suma de los valores del EC.

Con los valores obtenidos de los cálculos del ECM, se puede inferir que el modelo obtenido mediante el ajuste de mínimos cuadrados realizado en Matlab, es el que mejor caracteriza al termistor, puesto que el valor del ECM es por lo menos 4 veces menor que el modelo obtenido mediante el ajuste por el sistema de ecuaciones.

4.7.2 Calculo del coeficiente de determinación de ajuste.

Con el cálculo del coeficiente de determinación de ajuste o R^2 , respecto a la curva de los valores teóricos y la curva de los valores experimentales, se pretende conocer que tan buenos son los modelos matemáticos obtenidos cuando son comparados con los valores de los datos experimentales. Dicho coeficiente se obtiene de restar a 1 la división entre ECM y la diferencia cuadrática media del valor medio experimental y los valores experimentales, es decir la varianza (σ^2) de dichos valores, todo lo anterior mostrado en la ecuación (21). Cabe decir, que cuanto más cerca sea el resultado de R^2 a 1, mejor será el coeficiente de ajuste del modelo matemático.

Con la ayuda de OriginPro y de la función de “Stactistics on Columns” se obtiene la varianza de los datos experimentales, mostrada en la Figura 72.

	N total	Standard Deviation	Variance	Sum
Temperatura	57	8.9991	80.98387	1496.05958

Figura 72. Varianza de los datos experimentales.

Una vez obtenido el valor de la varianza de los datos experimentales, se procede a sustituir en la ecuación (21), los valores del ECM y el valor de la varianza, obteniendo los siguientes resultados.

$$R^2(\text{Modelo Sistema Ecuaciones}) = 0.99983$$

$$R^2(\text{Modelo Mínimos Cuadrados}) = 0.99995$$



Finalmente, se comprueba que el modelo matemático (Ecuación Steinhart) ajustado en Matlab es la mejor opción para caracterizar al termistor, ya que esta, tiene un menor ECM y a su vez una menor distribución del EC, por consiguiente, el modelo logra un mejor ajuste con respecto a la curva de los datos experimentales.



CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Análisis del comportamiento de la cámara de aislamiento térmico.

Con la cámara de aislamiento térmico obtenida, la cual se encuentra instrumentada, acondicionada y controlada, se procedió a realizar un análisis del comportamiento de la misma, y de esta forma poder determinar si la cámara realizada cumple el objetivo propuesto en la realización de la tesis.

Para comprobar el comportamiento de la cámara de aislamiento térmico se propuso realizar una prueba de control de temperatura a 20°C, obteniendo, por medio de la base de datos programada, la respuesta de temperatura con respecto al tiempo. Cabe decir que para la correcta comprobación del comportamiento de la antedicha cámara la prueba tuvo una duración de aproximadamente 30 minutos con la finalidad de poder observar la estabilidad del control a largo plazo.

Con los datos obtenidos por medio de la base de datos, se procedió a graficar la respuesta de la temperatura controlada con la ayuda de la herramienta OriginPro (Figura 73).

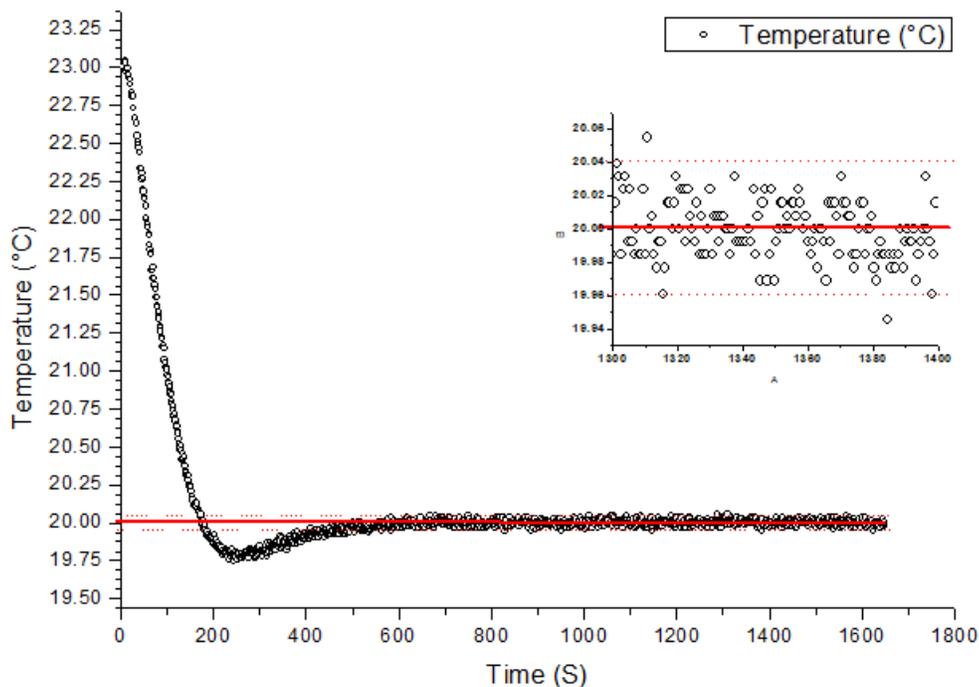


Figura 73. Análisis de la respuesta de control de temperatura al interior de la cámara térmica

Como se puede observar en la figura anterior, el comportamiento del control de temperatura al interior de la cámara térmica se realiza de forma correcta, puesto que la temperatura, siendo una variable de control relativamente lenta, se logra estabilizar en un tiempo aproximado de 480 segundos, aun teniendo un sobre impulso de 0.25°C con respecto al valor del Set-Point.



Por otra parte, se observa que el control de la temperatura en su estado estable logra un rango de variación de aproximadamente $\pm 0.04^\circ\text{C}$, logrando mantener dicho rango a largo plazo, es decir, en un tiempo mayor a 20 minutos. Por tanto, con las características de control de temperatura alcanzadas se puede inferir que la cámara propuesta e implementada cumple con el objetivo de establecer un ambiente estable, esto con la finalidad de mejorar la precisión en las mediciones durante la obtención del coeficiente de conductividad térmica de alguna muestra.

5.2 Puesta en marcha y análisis del sistema de medición de conductividad térmica en líquidos

Para este punto, por medio del sensor Hot-Ball fabricado y caracterizado, se procedió a realizar las mediciones (Hot-Ball – sensor) de la respuesta de temperatura (Hot-Ball – fuente de calor activada) de muestras líquidas, esto con la finalidad de poder obtener el coeficiente de conductividad térmica de cada una de las muestras. Sin embargo, para poder obtener dicho coeficiente de manera precisa, el sensor Hot-Ball debe tener una calibración previa por medio de la obtención de los coeficientes de la cantidad de calor (q) y del radio del Hot-Ball (r_b) presentes en la ecuación característica del sensor Hot-Ball mostrada a continuación.

$$T(t) = \frac{q}{4\pi r_b \kappa} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\alpha t}{r_b^2}\right) * \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\alpha t}}{r_b}\right) \right\} \quad (91)$$

Dónde: T es la temperatura, q es la cantidad de calor generado, r_b es el radio de la Hot-Ball, κ es la conductividad térmica del líquido, α es la difusividad térmica del líquido, t es el tiempo, erfc es la función de error complementario.

Se debe explicar que durante la calibración del sensor Hot-Ball los valores de q y r_b dependen de los valores de κ y α , estos últimos proporcionados por una muestra patrón o de calibración. Posteriormente, para la determinación de los coeficientes de conductividad térmica, los valores κ y α dependerán de los valores de q y r_b , estos últimos obtenidos del proceso de calibración del Hot-Ball.

5.2.1 Calibración del sensor Hot-Ball

Para poder llevar a cabo las mediciones de conductividad térmica con el sensor Hot-Ball, primero se debe calibrar el antedicho sensor, siguiendo un procedimiento relativamente sencillo. Este procedimiento, en primera instancia, consiste en establecer una temperatura controlada al interior de la cámara térmica, al mismo tiempo se coloca al interior de la misma una muestra de cierto líquido con un coeficiente de conductividad y difusividad térmica conocidos (Líquido de calibración). Cabe aclarar que la temperatura establecida para dicha actividad es de 20°C y que el líquido seleccionado para calibrar el sensor es el aceite de oliva, cuya conductividad y difusividad térmica teórica es de $0.1691 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y $8.81 \text{ E} - 8 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ respectivamente. [28], [29]

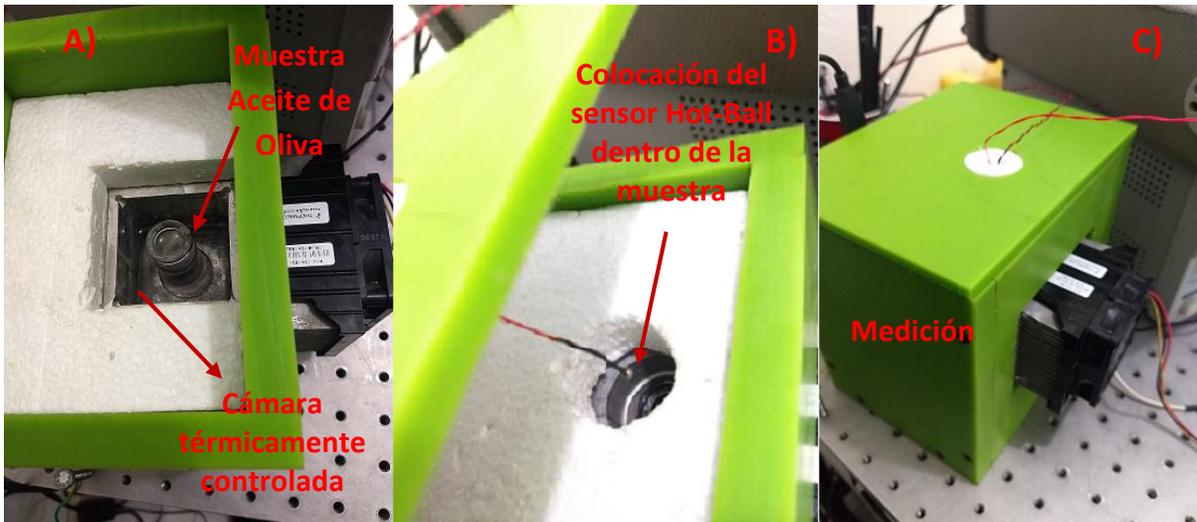


Figura 74. Puesta en funcionamiento del sistema de medición de conductividad térmica.

La Figura 74 ilustra el sistema de medición de conductividad térmica en líquidos en funcionamiento, en dicha figura se aprecia la muestra de aceite de Oliva al interior de la cámara térmica, y a su vez la colocación del sensor Hot-Ball dentro de la muestra de aceite. Con el sistema completo, como se ilustra en el inciso C), se procede a realizar el proceso de calibración del sensor Hot-Ball. Se debe manifestar que, para mantener una homogeneidad en las mediciones, se propuso trabajar con frascos de vidrio de aproximadamente 2.5 cm de diámetro por 6 cm de largo, y con un grosor de 2.5 mm, con esto se asegura que durante la medición de diferentes muestras líquidas se tenga un volumen constante.

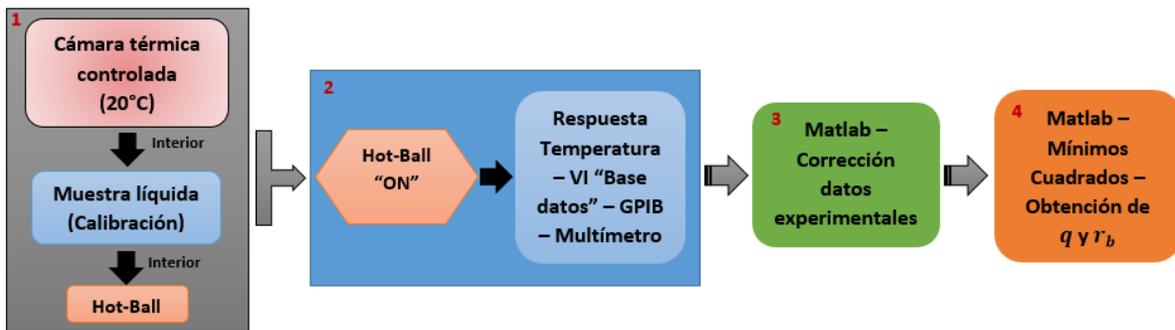


Figura 75. Diagrama, pasos para la calibración del sensor.

La Figura 75, muestra un diagrama esquemático en el cual se ilustra el método seguido para realizar la calibración del sensor Hot-Ball. Como primer punto en la calibración de dicho sensor, se debe establecer una temperatura de trabajo de 20°C dentro de la cámara térmica, y al interior de esta, la muestra líquida de calibración junto con el sensor Hot-Ball colocado. No obstante, para poder realizar las mediciones de manera correcta, se debe esperar un tiempo para que la temperatura de la muestra de calibración se establezca a la temperatura ambiente establecida por la cámara térmica. Cabe decir que la temperatura al interior de la muestra debe ser medida por el sensor Hot-Ball, ya que este medirá los cambios de



temperatura cuando el mencionado sensor activa la fuente de calor presente al interior del mismo.

Con la muestra líquida estable a 20°C (temperatura detectada por el sensor Hot-Ball), se procede a activar la fuente de calor presente dentro del Hot-Ball y, al mismo tiempo, realizar la captura de la respuesta transitoria de temperatura. Para poder realizar la captura de los datos de temperatura, se utilizó la base de datos creada en LabVIEW, incluyendo para este caso, el manejo y lectura del multímetro HP344001 por medio del protocolo de comunicación GPIB. Se debe explicar que los datos obtenidos por el sensor y el multímetro (Ohm) son convertidos en °C, lo cual se logra gracias a la utilización y programación del modelo matemático obtenido para el termistor, mostrado en el capítulo anterior.

Una vez obtenidos los datos de la evolución de temperatura, se realizó, con ayuda de Matlab, la corrección de los datos de temperatura obtenidos. Esta corrección se hace al analizar el comportamiento de la temperatura al interior de la muestra antes de ser activado el Hot-Ball, obteniendo de dicho análisis la pendiente de los datos de temperatura en estado estable (antes de activar el sensor) y, posteriormente, restando el valor de dicha pendiente a cada punto de la evolución de temperatura (activando el sensor), de esta forma, se obtiene una aproximación del valor real de la evolución de temperatura cuando es activado el Hot-Ball dentro del líquido en análisis. Este proceso de corrección de datos se realiza para asegurar que los datos experimentales adquiridos tengan un error mínimo durante la calibración y/o obtención de la conductividad térmica. El proceso de corrección descrito se ilustra en la Figura 76.

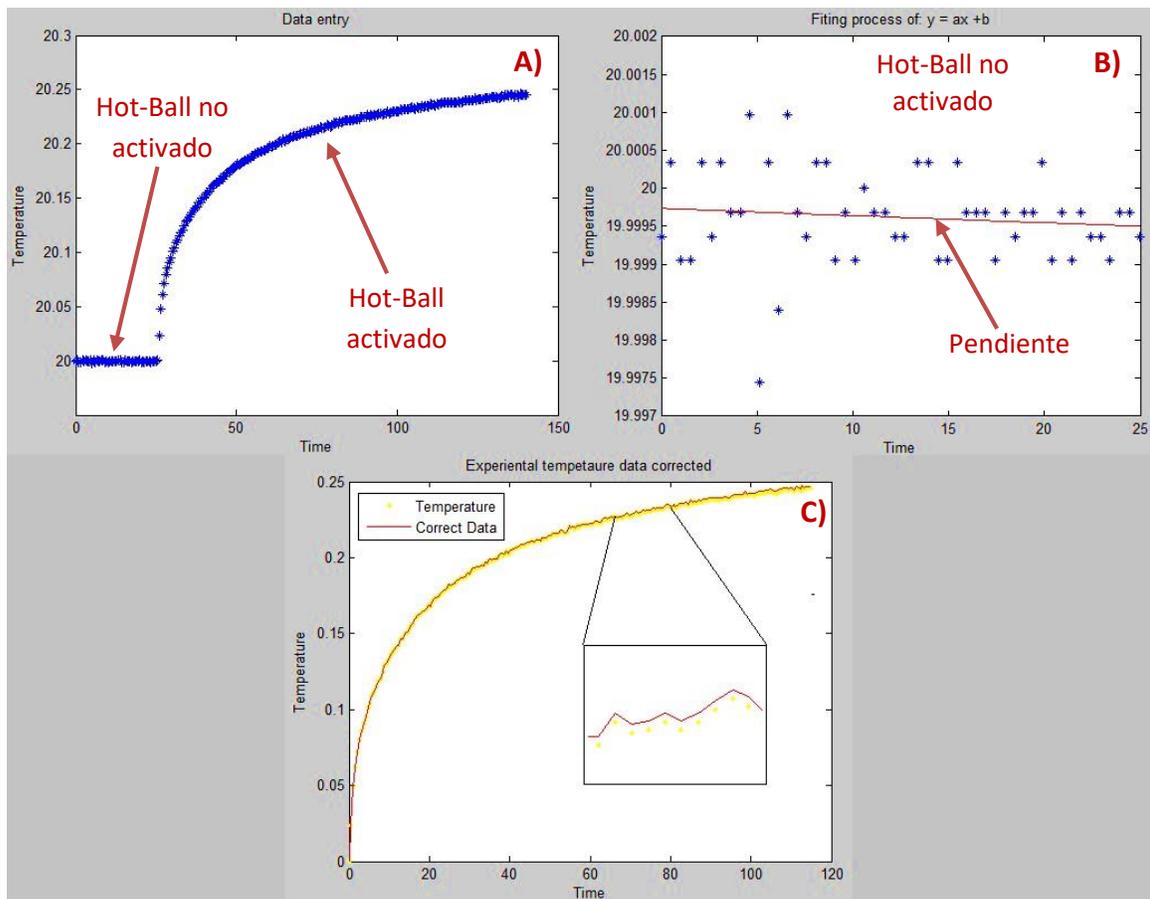


Figura 76. Proceso de corrección de datos.

Para finalizar el proceso de calibración, con la ecuación mostrada en (91) y con los datos experimentales corregidos, se procede a obtener los valores de r_b y q . Cabe mencionar que, para lograr obtener los valores de las variables mencionadas, se realizó un programa de ajuste de datos por mínimos cuadrados con la ayuda de la herramienta Matlab (se anexa en Apéndice H), teniendo como base la ecuación antes indicada, en la cual se sustituyen los valores de la conductividad y difusividad térmica del líquido patrón. En la Figura 77 se muestra la gráfica con la curva de los valores experimentales y, al mismo tiempo, la curva de predicción de datos obtenida, como ya se mencionó, por medio del ajuste realizado por mínimos cuadrados, de la cual se obtuvieron los siguientes coeficientes:

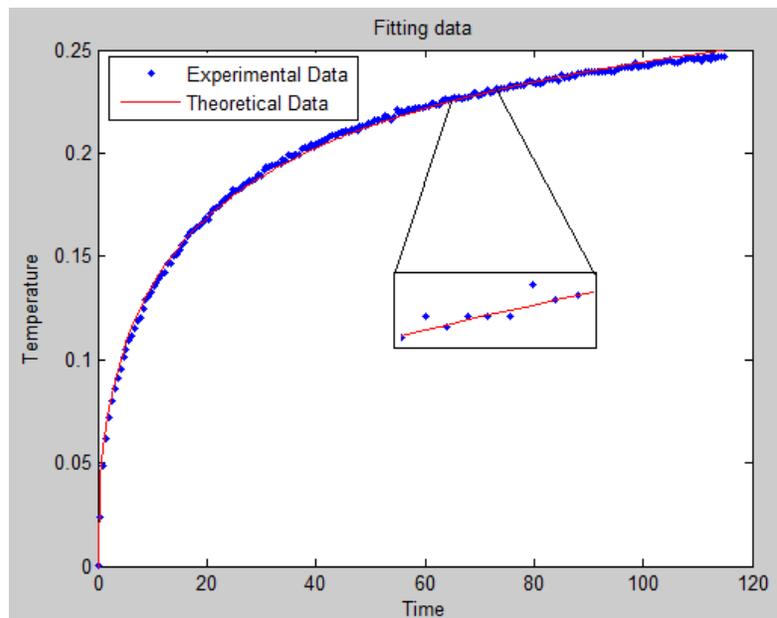


Figura 77. Ajuste, curva de calibración

Coefficientes

$$q = 0.001392 \quad (0.001359, 0.001425)$$

$$rb = 0.001861 \quad (0.00183, 0.001892)$$

Dónde: q se expresa en *Watts* y r_b se expresa en *metros*.

5.2.2 Determinación y validación del valor de la conductividad térmica

Con los datos obtenidos durante la calibración del sensor Hot-Ball, es posible realizar pruebas para determinar la conductividad térmica de los líquidos, y de este modo comprobar el correcto funcionamiento del sistema de medición de conductividad térmica. Para lograrlo, se siguió el procedimiento llevado a cabo durante la calibración del sensor, solo que, para el caso de la determinación del coeficiente de la conductividad térmica de una muestra líquida, es necesario sustituir los valores encontrados de r_b y q en la ecuación característica del Hot-Ball (91), y a continuación determinar la conductividad térmica de la muestra por medio del ajuste de mínimos cuadrados (Figura 78). Cabe decir que, para garantizar que el coeficiente de conductividad térmica obtenido por el sistema es el correcto, se propuso utilizar muestras líquidas (muestras patrón) con valores conocidos y corroborados teóricamente.

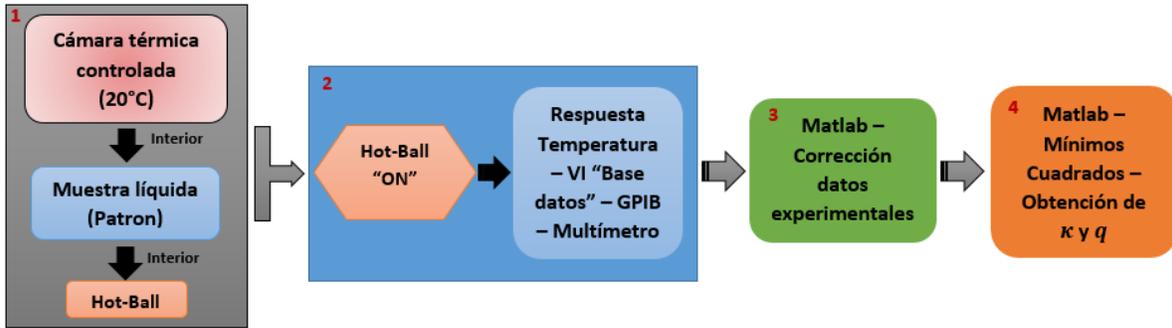


Figura 78. Diagrama, pasos para la determinación de la conductividad térmica

Para las mediciones de validación, se propuso trabajar con 3 diferentes muestras líquidas, la primera de estas fue el aceite de ricino, seguido de la glicerina y por último el aceite de silicona, las cuales, teóricamente, tiene un coeficiente de conductividad térmica de $0.18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [30], $0.29 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [28], and $0.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [31] respectivamente.

Para la ejecución de las mediciones y la determinación de conductividad térmica en líquidos, se siguió el procedimiento ilustrado en la Figura 79, es decir, midiendo cada una de las muestras patrón mencionadas a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dentro de la cámara térmica, seguido de la corrección de los datos muestreados, y finalmente, con los datos rectificados y con la ayuda del método de mínimos cuadrados programado en Matlab (se muestra código en Apéndice I), se procedió a obtener los coeficientes de conductividad térmica.

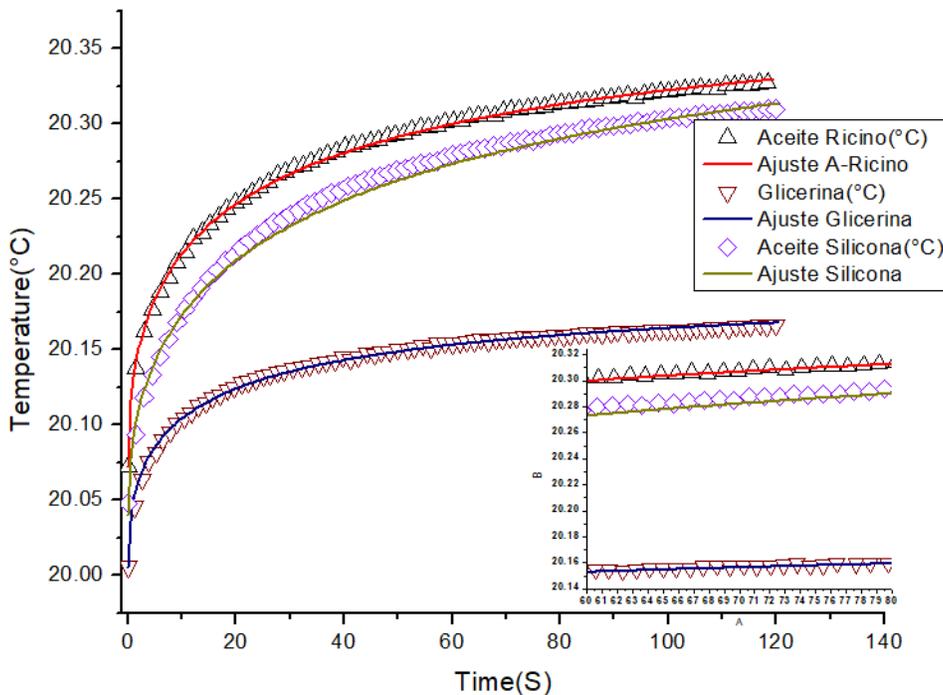


Figura 79. Ajuste y obtención del coeficiente de conductividad térmica de las muestras propuestas



Con los resultados derivados del ajuste realizado por el método de mínimos cuadrados para la obtención del coeficiente de conductividad térmica en cada una de las muestras patrón, se procedió a graficar las curvas de predicción de datos con respecto a las curvas de los valores experimentales. Dichas curvas de predicción muestran de manera visual que tan cercanos son los valores teóricos con respecto de los valores experimentales de cada una de las muestras propuestas (Figura 79). Cabe decir que, si bien la entrada (Step) aplicada durante la activación del sensor Hot-Ball fue del mismo valor para cada muestra, la evolución de la respuesta de temperatura cambia para cada una de estas, puesto que cada líquido presenta una conductividad térmica diferente y entre otras propiedades termofísicas, es decir cada líquido puede considerarse como un disipador de calor de diferente dimensión, el cual disipa teóricamente de manera distinta el calor producido por el sensor Hot-Ball.

Tabla 3. Conductividad térmica teórica vs Conductividad térmica experimental

Muestra líquida	Conductividad térmica (Teórica)	Conductividad térmica (Experimental)	Error porcentual.
Aceite Ricino	0.180 $Wm^{-1}K^{-1}$	0.173 $Wm^{-1}K^{-1}$	3.78 %
Glicerina	0.290 $Wm^{-1}K^{-1}$	0.288 $Wm^{-1}K^{-1}$	0.63%
Aceite Silicona	0.100 $Wm^{-1}K^{-1}$	0.103 $Wm^{-1}K^{-1}$	2.92%

La Tabla 3 muestra la comparación de los valores de conductividad térmica teóricos con respecto a los valores experimentales obtenidos. En dicha tabla se puede observar que los valores del error porcentual para cada una de las muestras son menores al 5%, lo cual, según la teoría [14], lo hace viable para poder determinar los coeficientes de conductividad térmica de diferentes muestras líquidas.



CONCLUSIONES

Conforme a los resultados obtenidos durante la realización del sistema de medición de conductividad térmica, y particularmente de cada uno de los objetivos propuestos, se pueden obtener los siguientes desenlaces del desarrollo del proyecto de tesis.

- Se consiguió diseñar y fabricar los elementos que constituyen al sistema de medición de conductividad térmica de manera eficiente, logrando obtener dos apartados, el primero, una cámara de aislamiento térmico controlada, y el segundo, un sensor para la medición de la conductividad térmica denominado Hot-Ball.
- La cámara de aislamiento térmico obtenida, es capaz de lograr un control estable y preciso de la temperatura al interior de la misma, dicha temperatura controlada oscila en un rango de $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$, llegando a dicho rango en un aproximado de 480 segundos. Por tanto, se puede decir que, gracias a las características logradas por la cámara de aislamiento térmico, se pueden obtener mediciones de conductividad térmica con un alto grado de precisión.
- El sensor Hot-Ball obtenido, es capaz de realizar mediciones de conductividad térmica con un error mínimo, puesto que para su correcto funcionamiento se realizó una caracterización minuciosa del comportamiento del mismo ante diferentes temperaturas, además se realizó una calibración para la ejecución de las mediciones, obteniendo los valores teóricos del radio y de la cantidad de calor liberado al ser activado dicho sensor.
- Los resultados obtenidos de los coeficientes de conductividad térmica de las muestras de aceite de ricino, silicona y glicerina se consideran correctos, puesto que cuenta con un error porcentual debajo del 5%.

Por tanto, se concluye que el sistema de medición de conductividad térmica en líquidos se hace viable para la medición de muestras líquidas desconocidas, ya que los valores obtenidos de esta propiedad están por debajo del valor estándar del error porcentual establecido en la literatura.



BIBLIOGRAFÍA

References

- [1] C. J. Cremers and H. A. Fine, *Thermal Conductivity* (no. v. 21). Springer, 1990.
- [2] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, no. 2, pp. 280-289, 1999.
- [3] J. Lee, H. Lee, Y.-J. Baik, and J. Koo, "Quantitative analyses of factors affecting thermal conductivity of nanofluids using an improved transient hot-wire method apparatus," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 116-123, 2015.
- [4] S. Moroe *et al.*, "Thermal Conductivity Measurement of Gases by the Transient Short-Hot-Wire Method," *Experimental Heat Transfer*, vol. 24, no. 2, pp. 168-178, 2011/03/14 2011.
- [5] J. F. Hoffmann *et al.*, "Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 107, pp. 105-110, 2016.
- [6] S. Komini Babu, K. S. Praveen, B. Raja, and P. Damodharan, "Measurement of thermal conductivity of fluid using single and dual wire transient techniques," *Measurement*, vol. 46, no. 8, pp. 2746-2752, 2013.
- [7] S. W. Hong, Y.-T. Kang, C. Kleinstreuer, and J. Koo, "Impact analysis of natural convection on thermal conductivity measurements of nanofluids using the transient hot-wire method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 15-16, pp. 3448-3456, 2011.
- [8] S. Azarfar, S. Movahedirad, A. A. Sarbanha, R. Norouzebeigi, and B. Beigzadeh, "Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 105, pp. 142-150, 2016.
- [9] J. Xamán, L. Lira, and J. Arce, "Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 617-623, 2009.
- [10] A.-b. Cherki, B. Remy, A. Khabbazi, Y. Jannot, and D. Baillis, "Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite," *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 202-209, 2014.
- [11] C. Moulahi, A. Trigui, M. Karkri, and C. Boudaya, "Thermal performance of latent heat storage: Phase change material melting in horizontal tube applied to lightweight building envelopes," *Composite Structures*, vol. 149, pp. 69-78, 2016.
- [12] J. C. Damfeu, P. Meukam, and Y. Jannot, "Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: Kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan," *Thermochimica Acta*, vol. 630, pp. 64-77, 2016.
- [13] T. Kobari, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, "Development of guarded hot plate apparatus utilizing Peltier module for precise thermal conductivity measurement of insulation materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 91, pp. 1157-1166, 2015.
- [14] L. u. Kubičár, V. Vretenár, V. Štofanič, and V. Boháč, "Hot-Ball Method for Measuring Thermal Conductivity," *International Journal of Thermophysics*, journal article vol. 31, no. 10, pp. 1904-1918, 2010.



- [15] M. Kouyaté *et al.*, "Study of Thermophysical Properties of Silver Nanofluids by ISS-HD, Hot Ball and IPPE Techniques," *International Journal of Thermophysics*, vol. 36, no. 10-11, pp. 3211-3221, 2015.
- [16] X. Xu *et al.*, "Evolution of elastic and thermal properties during TMOS-gel formation determined by ringing bottle acoustic resonance spectroscopy, impulsive stimulated scattering, photopyroelectric spectroscopy and the hot ball method," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 49, no. 8, p. 085502, 2016.
- [17] C. C. Nancy Mathis, "Direct Thermal Conductivity Measurement Technique," United States, 2004.
- [18] A. Hani, "Heat Flow Meter Instruments," United States, 1999.
- [19] K. C. Rolle, *Termodinámica*. Pearson Educación, 2006.
- [20] P. E. Tippens, *Física: conceptos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana, 2010.
- [21] J. A. Manrique, J. Á. M. Valadez, and R. S. Cárdenas, *Termodinámica*. Harla, 1995.
- [22] L. E. Avendaño, U. T. D. PEREIRA, Ed. *FUNDAMENTOS DE INSTRUMENTACION* Universidad Tecnológica de Pereira, 2004.
- [23] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [24] W. Bolton, *Ingeniería de control*. ALFAOMEGA, 2002.
- [25] A. Gilat, *Matlab: una introducción con ejemplos prácticos*. Reverté, 2006.
- [26] J. Wolberg, *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments*. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [27] P. W. Zehna, *Introductory Statistics Minitab Supplement*. Addison-Wesley Longman, Limited, 1998.
- [28] Z. Wu, Z. Feng, B. Sunden, and L. Wadso, *A comparative study on thermal conductivity and rheology properties of alumina and multi-walled carbon nanotube nanofluids*. 2014.
- [29] G. L. Hernandez, A. Cruz-Orea, E. S. Gomez, and J. J. A. F. Cautle, "Comparative Performance of PLZT and PVDF Pyroelectric Sensors Used to the Thermal Characterization of Liquid Samples," *Advances in Materials Science & Engineering*, Article pp. 1-5, 2013.
- [30] G. L. Hernandez, J. C. Benavides-Parra, A. Cruz-Orea, E. S. Gomez, and J. J. A. F. Cautle, "Thermal characterization of castor oil as additive in lubricant oil using photothermal techniques," *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, Article pp. 6-9, 2018.
- [31] E. ToolBox. (2003, 18/01/19). *Thermal Conductivity of common Materials and Gases*. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html



Apéndice A

A.1 Artículos publicados

- Análisis de error en ajustes experimentales. Publicado: Theorema Revista Científica, 2019

A.2 Estancias Nacionales

- Universidad Autónoma del Estado de México: Calibración de Puente H para celda Peltier, 09/07/18 – 03/08/18.

A.3 Estancias Internacionales

- Universidad de Boyacá, sede Sogamoso, Colombia: Caracterización de cámara de temperatura controlada, 31/08/18 – 31/10/18

A.4 Presentaciones en foros internacionales

- Ponencia en calidad de conferencista: “Experiencia en investigación cuantitativa en México”, impartida durante la semana de investigación 2018 en la Universidad de Boyacá, sede Sogamoso, Colombia, 03/09/18 – 07/09/18.

A.5 Asistencia a foros internacionales.

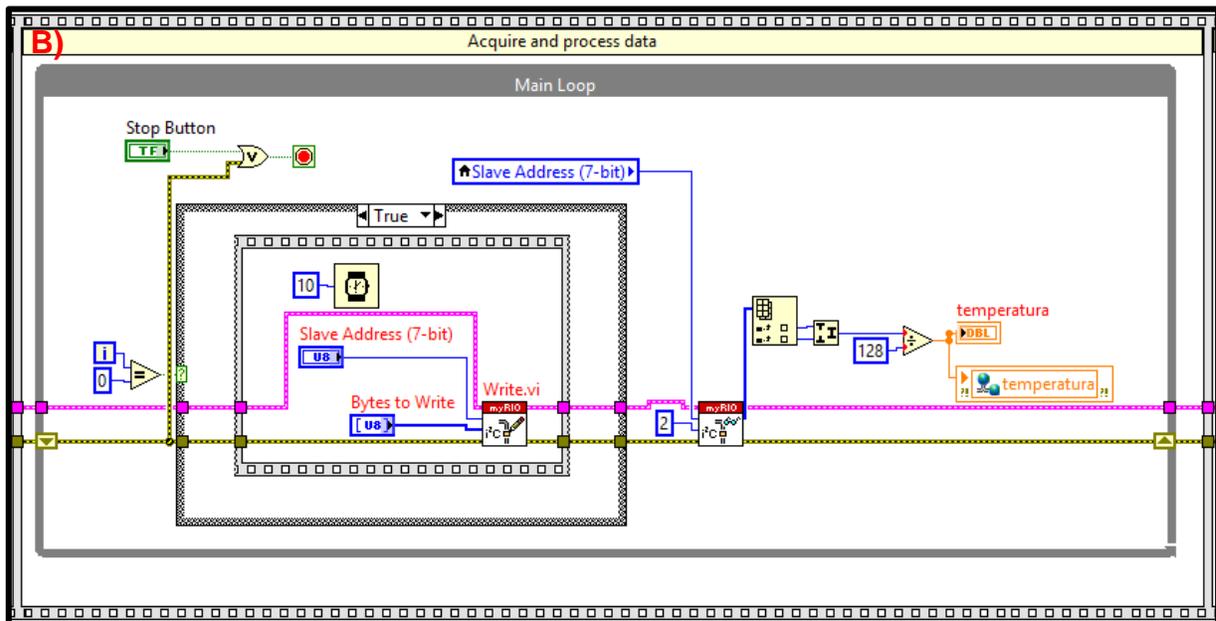
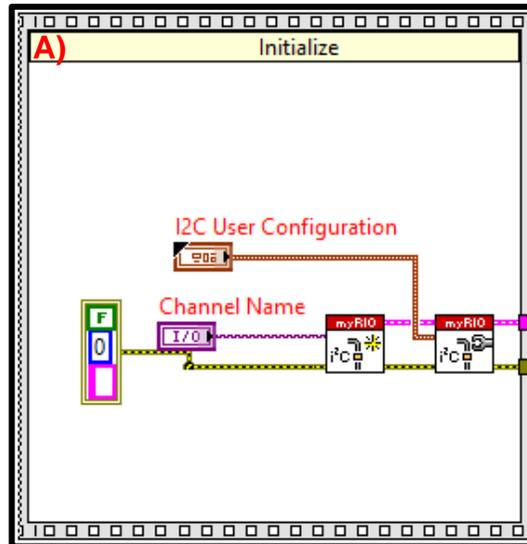
- Seminario Internacional: “Oportunidades y desafíos en el tratamiento sostenible de subproductos en plantas de tratamiento de aguas residuales”, Universidad de Boyacá, Sede Tunja, Colombia, 11/09/18 – 12/09/18

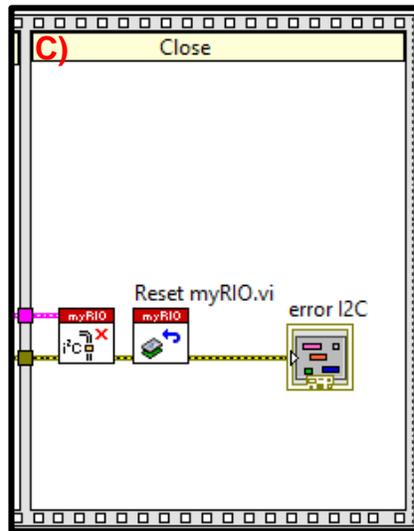


Apéndice B

Código de programación sensor digital ADT7420

A continuación, se muestra el código implementado para la programación del sensor digital de temperatura a través de LabVIEW y del FPGA NI myRIO, donde A) muestra la inicialización del protocolo de comunicación y de las conexiones del FPGA, B) se realiza la adquisición y procesamiento de datos, C) es el cierre del programa y de las conexiones establecidas.

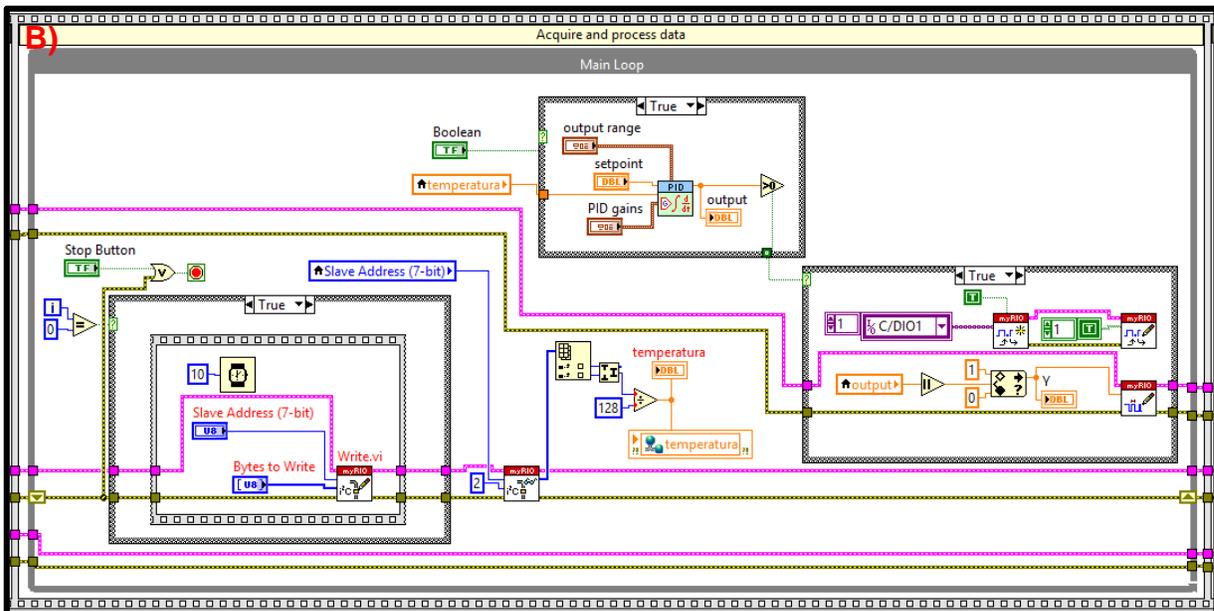
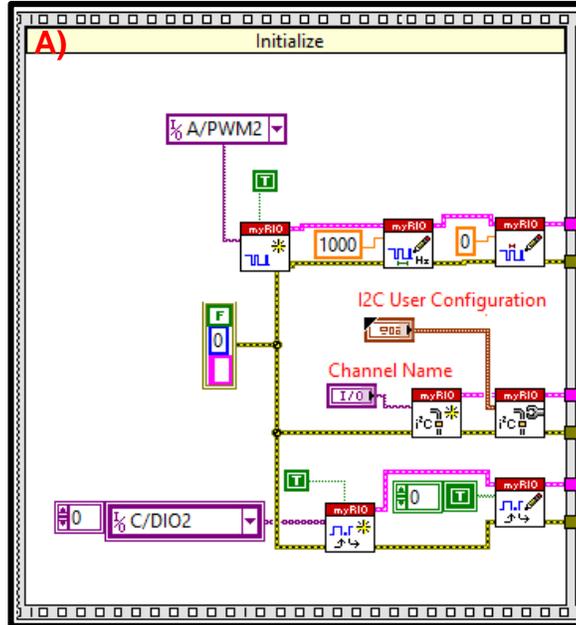


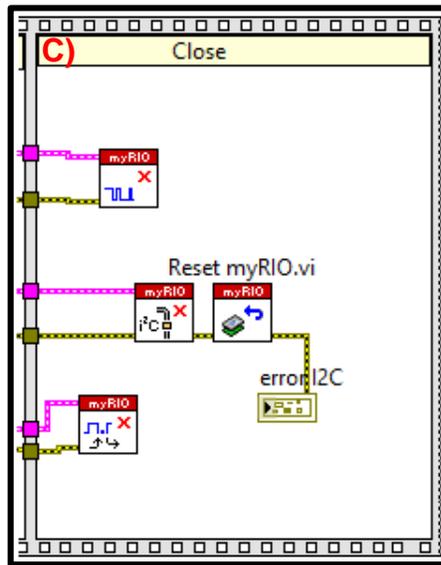




Apéndice C

Código de programación control PID de temperatura

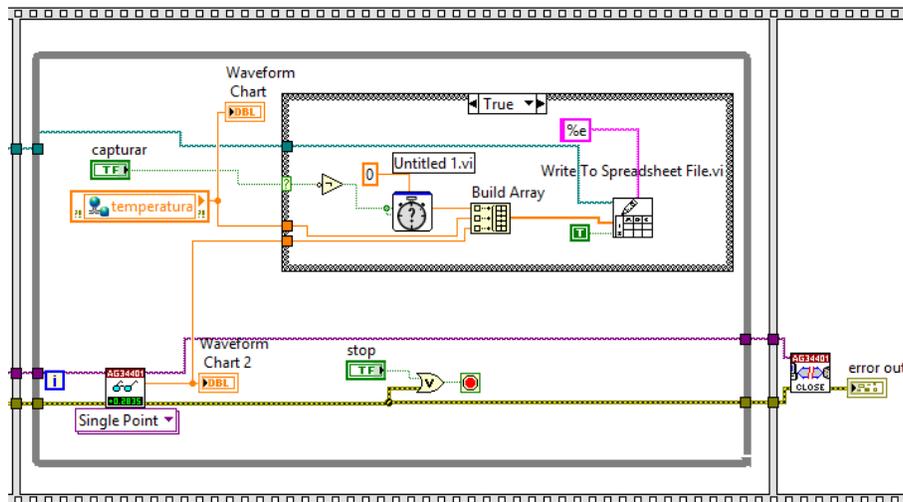
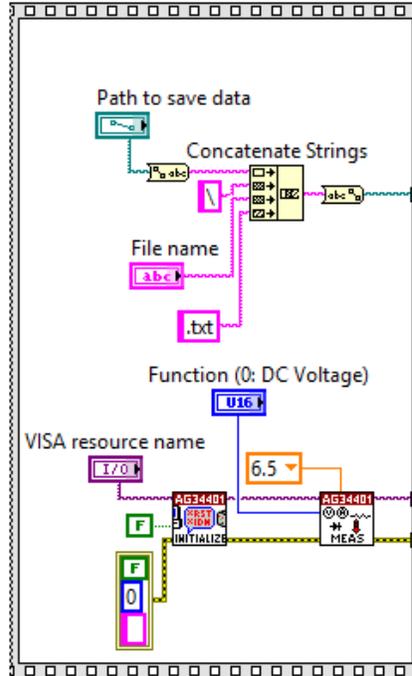






Apéndice F

Código programación base de datos – manejo multímetro HP34401





Apéndice G

Código Matlab modelo matemático del termistor

- Determinación de los coeficientes por sistema de ecuaciones

```
1 - T1 = 12.0138196220399 + 273.15; R1 = 91052.7919672131;
2 - T2 = 20.0029033142857 + 273.15; R2 = 61980.2356969697;
3 - T3 = 32.5025137837838 + 273.15; R3 = 35648.3963586956;
4 - T4 = 41.5038164119601 + 273.15; R4 = 24685.0082653061;
5 - % Para convertir la temperatura de °C a °K se sumo 273.15 a la temperatura
6 - % obtenida
7 -
8 - y = [1/T1; 1/T2; 1/T3; 1/T4];
9 - % se establece el vector con las diferentes temperaturas muestreadas
10 -
11 - A=[(log(R1))^3, (log(R1))^2, (log(R1)), 1;
12 -     (log(R2))^3, (log(R2))^2, (log(R2)), 1;
13 -     (log(R3))^3, (log(R3))^2, (log(R3)), 1;
14 -     (log(R4))^3, (log(R4))^2, (log(R4)), 1];
15 - % se establece la matriz asociada al sistema de acuerdo a la ecuacion de
16 - % Steinhart
17 - fprintf('Coefficients values \n')
18 - x = A^(-1)*y;
19 - a = x(1)
20 - b = x(2)
21 - c = x(3)
22 - d = x(4)
```



- Determinación de los coeficientes por mínimos cuadrados

```
1 %Se abre el archivo .txt con los datos experimentales de resistencia y temperatura
2 - [name,path]=uigetfile('*.txt','Abrir el archivo con los datos Resistencia-Temperatura');
3 - cd(path);
4 - data_file=importdata(name,'\t',2);% pone fuera el encabezado del archivo .txt
5 - data=data_file.data(:,:);
6 - resistance=data(:,1);
7 - temperature=data(:,2);
8
9 % Se define las unidades de la temperatura, la cual que debe estar en °K
10 - temp_units=input('El archivo de temperatura esta en: (Kelvin=0, degrees=1 press ENTER) \n');
11 - if temp_units==1
12 -     temperature=temperature+273.15;
13 - end
14 - inv_temp=1./temperature;
15 %
16 %% Se define la ecuacion de Steinhart
17 - logfittype = fittype({'log(x)^3','log(x)^2','log(x)','1'});
18
19 %% se realiza el ajuste de los parametros buscados
20 - fprintf('Resultado del proceso de ajuste en f(x)=1/T \n')
21 - f = fit(resistance,inv_temp,logfittype)
22
23 %% se muestra el valor de los coeficientes
24 - [result]=coeffvalues(f);
```



Apéndice H

Código Matlab corrección de datos experimentales y determinación de los coeficientes de calibración.

```
1 %% CLEANING THE WORK SPACE
2 - clear all;
3 - close all;clc;
4 %GLOBAL TEXT
5 - fprintf(' HOT-BALL CALIBRATION \n');
6 - fprintf(' FIRTS VERSION DECEMBER 2018 \n');
7 - fprintf(' PABLO FERNANDO GRAJALES CARRILLO \n \n');
8
9 %% OPEN THE FILE RESISTANCE-TEMPERATURE DATA
10 - [name,path]=uigetfile('*.','OPEN THE FILE WITH HOT-BALL DATA');
11 - cd(path);
12 - data_file=importdata(name,'\t'); % OBTAIN THE ARRAY DATA, AND DIFFERENTIATE
13 % THE COLUMNS OF THE ARRAY
14 - time=data_file(:,1); % CREATE AN ARRAY OF EACH PARAMETERS IN THE MEAN ARRAY
15 - temperature=data_file(:,2);
16 - Acti = data_file(:,3);
17
18 %% CREATE TWO NEW ARRARY, THE FIRST ONE WITH THE VALUES OF TEMPERATURE STABLE
19 % AND THE SECOND ONE WITH THE RESPONCE OF TEMPERATURE WITH A STEP IN
20 - L = length(Acti);
21 - Activation =0;
22 - x = 0;
23 - count =0;
24 - for N =1: 1: L
25 -     x = x+1;
26 -     if Acti(N) == 0
27 -         time2(x,1) = time(x,1);
28 -         temperature2(x,1) = temperature(x,1);
29 -         count = x;
30 -     else if Acti(N)== 1
31 -         time3((x-count),1) = time((x),1);
32 -         temperature3((x-count),1) = temperature((x),1);
33 -     end
34 -     end
35 - end
36 - L2 = length(time3);
```



```

37 %% OBTAINING THE COEFFICIENT OF THE TEMPERATURE BEFORE ACTIVE THE HOTBALL
38 % PLOT VALUES OF TEMPERATURE
39 - figure(1)
40 - plot(time2,temperature2,'*b')
41 - xlabel('Time')
42 - ylabel('Temperature')
43 - title('Data entry')
44 % EQUATION OF A STRAIGHT IS AJUSTED
45 - Recfitttype = fitttype({'x','l'});
46 - f = fit(time2,temperature2,Recfitttype) % OBTAINING THE COEFFVALUES
47 - [result] = coeffvalues(f);
48 - fitplot = result(1).*time2 + result(2); % IS CREATED AN ARRAY WITH THE
49 % THEORETICAL VALUES OF A STRAIGHT
50 - figure (2) % PLOTTING THE REAL AND THEORITICAL VALUES OF TEMPERATURE
51 - plot(time2,temperature2,'*b')
52 - hold on
53 - plot(time2,fitplot,'-r')
54 - title('Fiting process of: y = ax +b')
55 - xlabel('Time')
56 - ylabel('Temperature')
57
58 %% THE VALUES OF THE EXPERIMENTAL TEMPERATURE ARE CORRECTED
59 - time3_1 = time3 - time3(1,1);
60 - temp = temperature3 - result(2);
61 - temp2 = temp - (result(1).*time3_1);
62 - figure (3)
63 - plot(time3_1,temp,'.b')
64 - hold on
65 - plot(time3_1,temp2,'-r')
66
67 %% FITTING THE EQUATION OF HOTBALL TO OBTAIN CALIBRATION PARAMETERS
68 - HotballEqn= '(Q/(4*pi*R*0.1691))*(1-(exp((8.81E-8*x)/(R^2))*erfc(sqrt(8.81E-8*x)/R)))';
69 - TypeHB = fitttype(HotballEqn);
70 - f2 = fit(time3_1,temp2,TypeHB)
71 - [result2] = coeffvalues(f2);
72 - Q = result2(1);
73 - R = result2(2);
74 - HB=(Q./(4.*pi.*R.*0.1691)).*(1-(exp((8.81E-8.*time3_1)./(R.^2)).*erfc(sqrt(8.81E-8.*time3_1)./R)));
75 - figure(5)
76 - plot(time3_1,temp2,'.b')
77 - hold on
78 - title('Fitting data')
79 - xlabel('Time')
80 - ylabel('Temperature')
81 - plot(time3_1,HB,'-r')

```



Apéndice I

Código Matlab determinación del coeficiente de conductividad térmica por mínimos cuadrados.

Como se mencionó anteriormente, este código realiza la corrección de datos experimentales de temperatura de la misma manera que en el Apéndice F, sin embargo, a diferencia del código programado en el apéndice mencionado, este programa sustituye los valores de los coeficientes de calibración (r_b y q) en la ecuación característica del sensor Hot-Ball. Por lo anterior, solo se muestra el código programado para la determinación de la conductividad térmica del líquido en análisis.

```
1 %% FITTING OF THE HOT-BALL EQUATION TO OBTAIN THE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY
2 HotballEqn= '(0.001392/(4*pi*K*0.001861))*(1-(exp((a*x)/(0.001861^2))*erfc(sqrt(a*x)/0.001861)))';
3 TypeHB = fittype(HotballEqn);
4 f2 = fit(time3_1,temp2,TypeHB)
5 [result2] = coeffvalues(f2);
6 K = result2(1);
7 a = result2(2);
8 q = 0.001392;
9 rb = 0.001861;
10 HB = (q./(4.*pi.*K.*rb)).*(1-(exp((a.*time3_1_1)./rb.^2).*erfc(sqrt(a.*time3_1_1)./rb)));
11 figure(4)
12 plot(time3_1_1,(temp2_1+result(2)),'.y')
13 hold on
14 title('Fitting muestra: Aceite...')
15 xlabel('Time (S)')
16 ylabel('Temperatura (°C)')
17 plot(time3_1_1,(HB+result(2)),'-r')
```