



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

SISTEMA DE MEDICIÓN DE EFUSIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS MEDIANTE SENSOR
PIROELÉCTRICO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Erick Gutiérrez Zeferino

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Omar González Morán

Fecha: Diciembre 2020



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Orizaba, Veracruz, 18/12/2020

Dependencia: División de Estudios de

Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCION: I

C. ERICK GUTIERREZ ZEFERINO
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE.-

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:

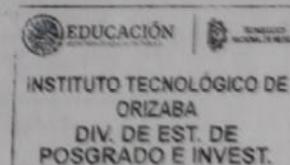
"SISTEMA DE MEDICIÓN DE EFUSIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS MEDIANTE SENSOR PIROELÉCTRICO".

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Dr. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



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





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Orizaba, Veracruz, **Octubre 6, de 2020.**

Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

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

La cual lleva el título de:

**SISTEMA DE MEDICIÓN DE EFUSIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS MEDIANTE
SENSOR PIROELÉCTRICO**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTIN FLORES
CUAUTLE

FIRMA

SECRETARIO: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

VOCAL SUP.: M.C. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ
SÁNCHEZ

FIRMA

FTI-TI-013



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Dios, por brindarme hambre de conocimiento, resiliencia para aprender de mis errores, salud y la oportunidad de crecer profesionalmente.

A mamá y a papá, que siempre han creído en mí, dándome esa confianza infinita y la libertad de elegir mi propio camino. Por haber aportado significativamente en el crecimiento de mis valores como la responsabilidad, el respeto hacia los demás y especialmente la humildad y el ser agradecido.

A mi asesor, usted sí que es otro rollo como maestro, como persona y como amigo. Le agradezco todas sus enseñanzas que sobrepasaron la línea de maestro – estudiante yendo más allá.

A mis profesores de maestría por brindarme sus conocimientos y contagiarme de la inquietud de no quedarme con un solo conocimiento, si no, ir por más.

A mi abuelita Esperanza y a mis tí@s Estela, Alejandro, Marcela, por brindarme su hogar con mucho amor y de una manera desinteresada, estoy en deuda con ustedes a lo que por el momento solo les puedo decir GRACIAS.

A mis comensales; mis cuates; mis amigos; Doña Lina; Jezreel, Señor Carlos Colombia, Claudia, al Rafael, Hugo y a Dinorah Dinorita. Por apoyarme, acompañarme y ayudarme en mis días más oscuros, más nublados de mente y ser la compañía perfecta a la hora de compartir los sagrados alimentos. Hicieron de la maestría uno de los más bellos recuerdos que siempre tendré en mi memoria.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante los estudios de Maestría.

“Los logros de cualquier persona generalmente dependen de muchas manos corazones y mentes”

Walter Elias Disney

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.....	2
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABLAS.....	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 RESUMEN DEL CAPITULO	12
1.2 PROBLEMÁTICA	13
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.4 HIPÓTESIS	15
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	17
1.7 METODOLOGÍA.....	18
1.8 ESTADO DEL ARTE	19
1.9 ESTADO DEL CAMPO	21
1.10 APLICACIONES DE LA MEDICIÓN DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA	22
CAPÍTULO II. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	26
2.1 RESUMEN CAPÍTULO	26
2.2 PROPIEDADES DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA	26
2.2.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (K).....	27
2.2.2 DENSIDAD (ρ)	27
2.2.3 CALOR ESPECIFICO C_p	28
2.3 EFECTO PIROELÉCTRICO	28

2.3.1 MATERIALES PIROELÉCTRICOS	30
2.3.2 APLICACIONES DE LOS MATERIALES PIROELÉCTRICOS	32
2.4 TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS EMPLEADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA ..	34
2.4.1 TERMOREFLECTANCIA.....	36
2.4.2 TERMOGRAFÍA INFRARROJA	36
2.4.3 LENTE TÉRMICA.....	37
2.4.4 TÉCNICA FOTOACÚSTICA.....	37
2.4.5 ESPECTROSCOPIA FOTOMPIROELÉCTRICA	37
CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AMBIENTE CONTROLADO.....	40
3.1 RESUMEN CAPÍTULO	40
3.2 ESTRUCTURA DE LA CELDA DE MEDICIÓN	40
CAPÍTULO IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE FUENTE REGULADORA DE FRECUENCIA	48
4.1 RESUMEN CAPÍTULO	48
4.2 PROPIEDADES DE LA FUENTE MODULADORA DE LUZ ENFOCADAS A LA TÉCNICA FOTOMPIROELÉCTRICA INVERSA.....	48
4.3 DISEÑO DE FUENTE MODULADORA DE LUZ	49
4.4 DISEÑO ESQUEMATICO DE LA PLACA PARA LA FUENTE MODULADORA DE LUZ	57
4.5 MANUFACTURA DE PLACA DE CONTROL DE FUENTE MODULADORA DE LUZ	58
4.5.1 PLACA DE LEDS	59
4.6 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA FUENTE MODULADORA DE LUZ	60
CAPITULO V DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA	63
5.1 RESUMEN DEL CAPITULO	63
5.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA.....	63
5.3 ELECTRÓNICA DE CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	66
5.3.1 SIMULACIÓN, DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PLACA DE POTENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL PID DE TEMPERATURA.....	68

5.3.2 PRUEBA DE CONTROL DE TEMPERATURA A POTENCIA CONSTANTE.	70
5.4 SINTONIZACION DEL CONTROL PID DE TEMPERATURA UTILIZANDO MATLAB	71
5.5 ETAPA DE PROGRAMACIÓN	76
5.6 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PLACA DE CONTROL (SHIEL ARDUINO DUE).....	76
5.7 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE GABINETE DE CÁMARA DE CONTROL PID DE TEMPERATURA	79
5.8 PRUEBAS DE CONTROL PID DE TEMPERATURA	81
5.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE EFUSIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS MEDIANTE UN SENSOR PIROELÉCTRICO	88
CONCLUSIONES	90
TRABAJO FUTURO	93
APENDICE A: DISEÑO Y MEDIDAS DE LA CELDA DE MEDICIÓN.....	100
APÉNDICE B: DISEÑOS Y MEDIDAS DE FUENTE MODULADORA DE LUZ.	103
APÉNDICE C: DISEÑOS Y MEDIDAS DE CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA.	104
APÉNDICE D: HOJAS DE DATOS DE COMPONENTES UTILIZADOS:	105
APÉNDICE E: CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN.	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	TPS-EFF (Transient Plane Source-EFFusivity) medidor portátil para la obtención directa de la efusividad térmica [1].	23
Figura 2.	Grafica representativa del TPS-EFF (Transient Plane Source-EFFusivity) [1].	23
Figura 3.	Efusividad térmica en la fabricación de fármacos [2], [29].	24
Figura 4.	Ejemplificación de la efusividad térmica al contacto con distintos materiales.	26
Figura 5.	Si un cristal piroeléctrico con un momento dipolar intrínseco se forma en un circuito con electrodos conectados en cada superficie, un aumento de la temperatura T hace que la polarización espontánea P_s disminuya a medida que los momentos dipolares disminuyen en magnitud [37].	29
Figura 6.	Materiales que según su composición generan una señal eléctrica [36].	30
Figura 7.	Técnicas fototérmicas [20], [41]–[44].	35
Figura 8.	Configuración experimental de la técnica IPPE [8], [18].	39
Figura 9.	Diseño esquemático de la celda de medición A) vista inferior, B) vista lateral izquierda, C) Vista superior, los espacios específicos están marcados con letras minúsculas en color rojo de acuerdo con la lista anterior.	41
Figura 10.	Pieza para colocación de leds infrarrojos.	42
Figura 11.	Pieza para colocación de sensor piroeléctrico.	42
Figura 12.	Esquema de acoplamiento de elementos a la celda de medición.	43
Figura 13.	Colocación de elementos a la celda de medición en pieza maquilada.	44
Figura 14.	Colocación de capa de cinta doble cara y poliestireno.	45
Figura 15.	Elementos que se acoplan entre la celda de medición y la celda Peltier.	45
Figura 16.	Vista de elementos del ambiente controlado.	46
Figura 17.	Vistas de ambiente controlado construido.	47
Figura 18.	Esquema de luz pulsada de la técnica fotopiroeléctrica inversa.	49
Figura 19.	Espectro electromagnético, ubicación del led infrarrojo de alta potencia SFH 4356.	49
Figura 20.	Gráfica de caracterización de led infrarrojo SFH 4356.	50
Figura 21.	Diagrama electrónico de conexión de fuente moduladora de luz (Etapa control)..	52
Figura 22.	Simulación de señal de salida de fuente moduladora de luz (S_3).	52
Figura 23.	Diagrama electrónico de conexión de fuente moduladora de luz (Etapa Potencia).	54
Figura 24.	Gráfica de saturación de corriente de leds infrarrojos.	55

Figura 25.	Simulación de comportamiento de la fuente moduladora de luz.	56
Figura 26.	Simulación de señal de salida de fuente moduladora de luz (S_4).	57
Figura 27.	Esquemático de la fuente moduladora de luz.....	58
Figura 28.	Diagrama PCB de Fuente Moduladora de LUZ/FRECUENCIA.....	59
Figura 29.	Esquemático y PCB de placa de leds.	59
Figura 30.	Instalación de la placa de leds en acople de celda de medición.....	60
Figura 31.	Gabinete de fuente moduladora de luz.	60
Figura 32.	Esquema de conexión de fuente moduladora de luz, generador de funciones y celda de medición. 61	
Figura 33.	Diagrama de flujo del funcionamiento del control PID de temperatura.	63
Figura 34.	Comparación de sensores de temperatura (TMP75, ADT7420 y Multímetro FLUKE) 64	
Figura 35.	Gráfica de sensor de temperatura ADT7420 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).	65
Figura 36.	Gráfica de sensor de temperatura TMP75 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).	65
Figura 37.	Gráfica de sensores de temperatura TMP75, ADT7420 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).	65
Figura 38.	Esquemático de la etapa de potencia de la cámara de control de temperatura.....	69
Figura 39.	Elaboración de ruteado y maquilado de placa de potencia.....	70
Figura 40.	Gráficas de enfriamiento y calentamiento, respectivamente, de la celda de medición en potencia directa.	70
Figura 41.	Diagrama de bloques del control PID de temperatura.	71
Figura 42.	Configuración de datos de entrada en el software MATLAB, utilizando el comando "systemIdentification".	72
Figura 43.	<i>Toolbox</i> del comando systemIdentification. Se seleccionan las variables de entrada y salida. 72	
Figura 44.	Proceso de modelación para la estimación de variables de entrada mediante la ventana "Process Models".	73
Figura 45.	Modelo importado y grado de similitud de la modelación del sistema.....	73
Figura 46.	Función de transferencia del proceso de estimación de Matlab.....	74
Figura 47.	Herramienta "pidtool" de Matlab.	74

Figura 48.	Pasos a seguir para la sintonización del control PID.	75
Figura 49.	Ajuste de respuesta PID para selección de parámetros K_p , K_i y K_d	75
Figura 50.	Arduino Due, Desglose de pines de control a utilizar.	77
Figura 51.	Esquemático de la etapa de control de la cámara de control PID de temperatura..	78
Figura 52.	Ruteado y maquilado de placa de etapa de control de cámara de control PID de temperatura.	79
Figura 53.	Diseño de la cámara de control de temperatura (vistas).....	79
Figura 54.	Vistas, acabado y elementos que conforman la cámara de control PID de temperatura.	81
Figura 55.	Gráficas resultantes de la primera sección, a) Desglose general., b) Rango de oscilación de la respuesta transitoria del sistema con un tiempo de muestreo de la temperatura de 500 ms.	83
Figura 56.	Gráficas resultantes de la segunda sección, a) desglose general., b) Rango de oscilación de la respuesta transitoria del sistema en un tiempo de muestreo de la temperatura de 250 ms.	85
Figura 57.	Gráficas con el control PID de temperatura activo: a) Calentamiento a 40 °C, b) temperatura ambiente constante a 25 °C, c) enfriamiento a 10 °C.....	87
Figura 58.	Estructura del sistema de medición de efusividad térmica de líquidos mediante un sensor piroeléctrico.....	89
Figura 59.	Apéndice A: Celda de medición (C-1).	100
Figura 60.	Apéndice A: Acople para leds infrarrojos (C-2).	101
Figura 61.	Apéndice A: Acople para sensor piroeléctrico (C-3).....	102
Figura 62.	Apéndice C: Fuente moduladora de luz (Fuente – 1).....	103
Figura 63.	Apéndice C: Cámara de control de temperatura (Cámara – 1).....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Artículos científicos referentes a la investigación de la medición y aplicación efusividad térmica con diversos tipos técnicas y muestras.....	19
Tabla 2.	Desglose de técnicas utilizadas para la medición de la efusividad térmica.	21
Tabla 3.	Patentes relevantes de la efusividad térmica en el estado del campo.....	21
Tabla 4.	Configuración de transistores.	53
Tabla 5.	Comparación de dispositivos medidores de temperatura.....	64
Tabla 6.	Elementos electrónicos para el control PID de temperatura.....	66
Tabla 7.	Elementos de la placa de potencia.....	68
Tabla 8.	Dispositivos conectados a la placa de potencia.	68
Tabla 9.	Ubicación de conexión de pines y dispositivos controlados por el Arduino Due.	77
Tabla 10.	Parámetros de sintonización del control PID de temperatura (Primera sección, tiempo de muestreo 500 <i>ms</i>)	82
Tabla 11.	Características de la respuesta transitoria de un sistema de control PID de temperatura (primera sección, tiempo de muestreo 500 <i>ms</i>).....	83
Tabla 12.	Parámetros de sintonización del control PID de temperatura (segunda sección, tiempo de muestreo 250 <i>ms</i>).	84
Tabla 13.	Características de la respuesta transitoria de un sistema de control PID de temperatura (segunda sección, tiempo de muestreo 250 <i>ms</i>	85

RESUMEN

El trabajo de tesis presentado tiene como objetivo general el desarrollo de un sistema de medición de efusividad térmica en líquidos mediante el uso de un sensor piroeléctrico, el método que se seleccionó es parte de las denominadas técnicas fotopiroeléctricas. Este tipo de técnicas están dentro del campo de métodos utilizados para la medición de propiedades térmicas de los materiales y más específicamente en líquidos, con una alta precisión y exactitud con referencia a los datos establecidos en la literatura sobre medidas en propiedades térmicas. La técnica fotopiroeléctrica frontal o inversa se utiliza para obtener la efusividad térmica de muestras líquidas y, se basa en la radiación incidente directa en la superficie de un sensor piroeléctrico, cuya luz es modulada por un amplificador lock-in, la señal de esta técnica se puede obtener en función de la frecuencia de modulación de luz (f) que puede ser variada. La parte posterior del sensor piroeléctrico está en contacto térmico con la muestra en una celda de tamaño específico, donde las mediciones se realizan a temperatura ambiente o se controlan de acuerdo con las características del experimento. Los elementos clave que se requieren desarrollar para el uso de este tipo de técnica fotopiroeléctrica son: una fuente de luz modulada, un sistema electrónico de modulación de luz, una celda de medición para la colocación de muestras líquidas y una cámara de temperatura controlada. Mediante el uso de un control de temperatura PID se puede variar la temperatura de la celda de medición.

ABSTRACT

The main goal of the present work is the development of a system for measuring thermal effusivity in liquids by using a pyroelectric sensor; the selected method is part of the so-called photopyroelectric techniques. These types of techniques are within the field of methods used for the measurement of thermal properties of materials, and more specifically, in liquids, with high precision and accuracy regarding the established data in the literature. The front or reverse photopyroelectric technique is used to obtain the thermal effusivity of liquid samples. It is based on direct incident radiation on the surface of a pyroelectric sensor, whose light is modulated by a lock-in amplifier, the signal of this technique can be obtained depending on the light modulation frequency (f) that can be varied. The back of the pyroelectric sensor is in thermal contact with the sample placed into a cell. Measurements are made at room temperature or temperature-controlled. The key elements that need to be developed for the use of this type of photopyroelectric technique are a modulated light source, an electronic light modulator, a measuring cell for the deposit of liquid samples, and temperature control. Using a PID temperature control, the temperature cell can be changed.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 RESUMEN DEL CAPITULO

El propósito de este trabajo es desarrollar un sistema que se utilice para la medición de la efusividad térmica en líquidos mediante un sensor piroeléctrico. En los últimos años, científicos mexicanos y extranjeros han aportado grandes avances en las investigaciones referentes a las propiedades térmicas de los materiales, por medio del desarrollo de diversas técnicas de medición. Las técnicas más utilizadas en la medición de parámetros térmicos en muestras líquidas son por medio del uso de las técnicas fotopiroeléctricas. El sistema se llevará a cabo durante tres etapas de desarrollo, la primera etapa se realizará por medio de la elaboración de una celda de medición (capítulo III), en donde se concentrarán las diferentes muestras líquidas a experimentar. En la segunda etapa se muestra el diseño y elaboración de una fuente moduladora de luz a diferentes frecuencias que manda la señal a un arreglo de leds infrarrojos (capítulo IV). Siguiendo con la tercera etapa se realizará un sistema de ambiente controlado por medio de un control PID de temperatura con dos modos de operación (modo enfriamiento y modo calentamiento), esto debido a las características de sensibilidad ante fluctuaciones de temperatura que tienen los dispositivos a utilizar.

Las investigaciones actuales referentes a las propiedades térmicas de los materiales y más específicamente al estudio de la efusividad térmica, tienen aplicaciones tanto en la industria textil con la elaboración de telas especiales para la contención del calor corporal [1]. En el campo de la medicina como detectores de enfermedades como la diabetes mellitus y para la fabricación de píldoras con una específica reacción a cierta efusividad térmica [2], [3].

1.2 PROBLEMÁTICA

En el Instituto Tecnológico de Orizaba, específicamente en la Maestría de Ingeniería Electrónica, está en un auge de desarrollo en sus diversas áreas de investigación, tal es el caso del área en sensores e interfases multimodales que busca estar a la vanguardia con la experimentación, creación de nuevos sensores y sistemas para la medición de las propiedades térmicas de los materiales, por tal motivo se plantea la creación de un sistema de medición de efusividad térmica mediante el uso de un sensor piroeléctrico, con el cual se puedan realizar mediciones en diversas muestras líquidas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para lograr un mayor alcance en investigaciones sobre las diversas propiedades térmicas de los materiales, se necesita de la construcción de un sistema que sea capaz de medir dichas propiedades en líquidos. Por tal motivo se requiere tener una herramienta propia y de bajo costo, para poder realizar pruebas experimentales para la comprobación de características térmicas en líquidos, enfocados principalmente en la medición de la efusividad térmica mediante la utilización de técnicas fotopiroeléctricas.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible tener un sistema preciso de medición de efusividad térmica en líquidos a temperatura ambiente mediante el uso de un sensor piroeléctrico con el cual se puedan realizar mediciones experimentales de diversos líquidos.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de medición de efusividad térmica en líquidos mediante la utilización de un sensor piroeléctrico.

1.5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y elaborar una fuente moduladora de luz.

Una fuente moduladora de luz utilizando un led infrarrojo como luz pulsante, que mediante la frecuencia se puedan originar perturbaciones al tener un acercamiento a un sensor piroeléctrico.

- Diseñar y elaborar una celda de medición de líquidos.

Una celda para la medición de propiedades térmicas de líquidos, acondicionada para evitar perturbaciones ambientales.

- Diseñar y elaborar un sistema de ambiente controlado.

Elaborar una cámara de control PI de temperatura para el control del ambiente de la celda de medición.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances:

Desarrollo de sistema de medición de efusividad térmica.

Limitaciones

No se contemplan las mediciones en muestras desconocidas.

1.7 METODOLOGÍA

Primera etapa:

Análisis de las diferentes técnicas utilizadas en los últimos 10 años para la obtención de la efusividad térmica poniendo énfasis en las técnicas o métodos relacionados en el análisis de muestras líquidas.

DESARROLLO DE AMBIENTE CONTROLADO

Segunda etapa:

Diseño y elaboración de una fuente moduladora de luz, utilizando un conjunto de leds infrarrojos con control de corriente y voltaje, una entrada para la conexión de un generador de funciones y/o amplificador lock-in.

Diseño y elaboración de una celda de medición acondicionada para evitar perturbaciones ambientales que puedan provocar errores en la medición.

Diseño y elaboración de un control PID de temperatura que tenga dos configuraciones de funcionamiento: modo enfriamiento y modo calentamiento.

UNIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE PARA INICIO DE EXPERIMENTACIÓN

Tercera etapa:

Comienzo de la ambientación del área de experimentación, uniendo todas las partes físicas elaboradas en la fase dos.

Elaboración de código general: Se elaborará el código general de control de las diversas variables a controlar.

1.8 ESTADO DEL ARTE

Hablar de investigaciones referentes a las propiedades térmicas de los materiales es un campo realmente extenso, por tal motivo, este trabajo estará enfocado en las características térmicas relacionadas con muestras líquidas y las distintas técnicas o métodos utilizados para su medición. La propiedad principal que se abordará será la efusividad térmica, la cual se puede definir como una medida de qué tan bien un material puede intercambiar calor con cualquier otro con el que este en contacto [4].

En la Tabla 1 se muestra una recopilación de los artículos científicos de los últimos 10 años, que tienen como objetivo general la medición de la efusividad térmica en diversos tipos de muestras mediante el uso de diferentes técnicas y métodos.

Tabla 1. Artículos científicos referentes a la investigación de la medición y aplicación efusividad térmica con diversos tipos técnicas y muestras.

Nombre	Muestra o propósito del artículo	Técnica o método utilizado	Error (%)	Año
Medición de la efusividad térmica de la piel humana utilizando el método fotoacústico [5].	Piel	Fotoacústica	9%	2010
Método fotoacústico para medir la efusividad térmica del Nanofluido Fe_3O_4 [6].	Nanofluido Fe_3O_4	Fotoacústica	$\pm 5\%$	2011
Medición no destructiva de la efusividad térmica de un sólido y líquido utilizando una técnica 3ω independiente basada en un sensor de serpentina [7].	Sólidos, líquidos y sólidos con superficies porosas.	3ω basada en un sensor de serpentina	8.5%	2011
Investigación sobre la efusividad térmica de nanofluidos que contienen nanopartículas de Al_2O_3 y CuO [8].	Nanofluidos Al_2O_3 y CuO .	Fotopiroeléctrica frontal	$< 2\%$	2012
Efusividad térmica y conductividad térmica de mezclas de biodiesel / diésel y alcohol / agua [9].	Mezclas de biodiesel/ diésel y alcohol/ agua.	Fotopiroeléctrica frontal	$1\% > 2\%$	2012
Desarrollo de métodos de termorreflectancia de calentamiento por luz pulsada en configuraciones de calentamiento posterior / detección frontal y calentamiento frontal / detección frontal [10].	$10 \mu m$ en película fina.	Termorreflectancia	N/m	2012
Efusividad térmica de los aceites vegetales obtenidos por una técnica fototérmica [11].	Aceites vegetales como la soja, el maíz y el aguacate.	Fotopiroeléctrica frontal	$> 1\%$	2012
Mediciones absolutas de efusividad térmica utilizando la técnica electropiroeléctrica [12].	Líquidos agua, etanol, glicerol, metanol, etilenglicol y propilenglicol.	Electropiroeléctrica (EPE)	3%	2013
Un método simple para determinar la efusividad térmica de los defectos [13].	Defectos en acero, resina epoxica, aceite, cera (parafina) y agua.	Termografía pulsada	8%	2014

Un dispositivo de medición fotopiroeléctrico para la investigación y el seguimiento de líquidos [14].	Aceite mineral, glicol etileno y agua.	Fotopiroeléctrica frontal	N/m	2014
Mediciones absolutas simultáneas de la difusividad térmica y la efusividad térmica en sólidos y líquidos utilizando calorimetría fotopiroeléctrica [15].	Sólidos y líquidos.	Fotopiroeléctrica auto-normalizada	N/m	2015
Medición de la efusividad térmica basada en el análisis del flujo de calor 3D mediante calentamiento de punto modulado utilizando una matriz de desfase de fase con una combinación de efusividad térmica y capacidad de calor volumétrica [16].	Silicio (Si), germanio (Ge), alúmina (Al_2O_3), zirconia estabilizada con itria (YSZ).	Microscopio térmico	5% – 15%	2016
Un nuevo modelo para determinar la efusividad térmica de los defectos por termografía pulsada [17].	Defectos en aceite, cera, agua y aire.	Termografía pulsada	< 3%	2016
Propiedades térmicas y tribológicas del aceite de jatropha como aditivo en el aceite comercial [18].	Aceite de Jatropha-curcas, aceite crudo y refinado.	Fotopiroeléctrica frontal	< 4%	2017
Caracterización térmica de glucosa en solución acuosa por técnicas fotopiroeléctricas [3].	Glucosa en solución acuosa.	Fotopiroeléctrica frontal	3%	2017
Mediciones de efusividad térmica de los aislantes térmicos mediante la técnica fotopiroeléctrica en la configuración frontal [19].	Aislantes térmicos: Poliéter éter cetona (PEEK), papel de acuarela, corcho, madera de haya, material Basotect, Poliestireno extruido y balsa.	Fotopiroeléctrica frontal	5% – 10%	2017
Caracterización térmica del aceite de ricino como aditivo en aceite lubricante utilizando técnicas fototérmicas [20].	Aceite de ricino comparado con aceites de motor SAE40W.	Fotopiroeléctrica frontal	N/m	2018
Materiales de efusividad térmica ultra-alta para la recolección de energía térmica ambiental resonante [21].	Espumas de cobre y níquel con grafeno y octadecano depositados por vapor químico como un material de cambio de fase.	Resonadores térmicos	N/m	2018
Caracterización del daño por impacto en compuestos GFRP / CFRP mediante la determinación de la efusividad / difusividad térmica [22].	Plástico reforzado con fibra de vidrio / plástico reforzado con fibra de carbono.	Termografía infrarroja	0.6% – 2.4%	2019
Sensor de termorreflectancia flexible a microescala para mediciones locales de la efusividad térmica de fluidos y tejidos biológicos [23].	Fluidos y tejidos biológicos. Aceite vegetal, la mantequilla, el hígado de cerdo y la clara de huevo y la yema de codorniz.	Termorreflectancia	3%	2020

Como resumen general de la tabla anterior, se demuestra que la medición de la efusividad térmica se puede obtener de diferentes tipos de muestras, ya sean líquidas, sólidas, gases, muestras de humanos, plasma, etc. Utilizando diferentes tipos de técnicas y métodos para su obtención.

Una de las técnicas más eficaces para la medición de la efusividad térmica en líquidos y con menor porcentaje de error en comparación con los datos obtenidos y establecidos en la literatura, fue la técnica fotopiroeléctrica frontal, cuyo porcentaje de error está en el rango de 1 a 2 %.

Tabla 2. Desglose de técnicas utilizadas para la medición de la efusividad térmica.

Técnica o método utilizado.	Líquidos	Solidos	Otros	%Error
Método fotoacústico	x		X	≥ 5
Técnica 3ω basada en un sensor de serpentina (no destructiva).	x	x		8.5
Técnica de configuración piroeléctrica frontal.	x			< 2
Termografía infrarroja (IR).		x		0.6 – 2.4
Técnica electropiroeléctrica (EPE).	x			3
Técnica de Termografía pulsada.	x	x		≥ 3
Microscopio térmico, Flujo de calor 3D.	x			5 – 15
Termorreflectancia	x			3

1.9 ESTADO DEL CAMPO

El estado del campo se basa en la investigación de las invenciones, técnicas o métodos patentados que se han utilizado para la medición de la efusividad térmica y su aplicación en diversas áreas. En la Tabla 2 se muestra un conjunto de invenciones que han hecho uso de la medición y aplicación de la efusividad térmica.

Tabla 3. Patentes relevantes de la efusividad térmica en el estado del campo.

Título	Número de Patente	Inventor	Resumen	Año
Método y aparato para medir propiedades termofísicas [24].	US6595685B2	Tetsuya Baba., Naoyuki Taketoshi., Kimihiro Hatori., Tetsuya Otsuki.	“La invención relaciona a un aparato y método para medir la distribución de la efusividad térmica de la región de microescala del espécimen enfocando un rayo láser de calentamiento y un rayo láser de sonda en el mismo punto sobre el espécimen así mismo detectando la reflexión del rayo láser de sonda”.	2003
Dispositivo y método de detección de medición anormal para termómetro de radiación infrarroja[25].	JP3939487B2	Kimio Otsuka Akihiro Shimase Tatsuo Togawa	“La presente invención, relata la medida de las propiedades termofísicas tales como la efusividad térmica”.	2007

<p>Método de tomografía térmica de efusividad térmica a partir de imágenes térmicas pulsadas [26].</p>	<p>US20080111078A1</p>	<p>Jiangang Sun, Westmont.</p>	<p>“Un método implementado por un ordenador para el tratamiento térmico automatizado. La tomografía computarizada incluye la aportación de calor, en donde, con una lampara flash en la superficie de una muestra, la cantidad de calor y el aumento de temperatura necesarios, dependen de la conductividad térmica y el grosor de la película de la muestra que se inspecciona. Una vez que el infrarrojo ha recogido los datos, un ordenador de adquisición y control de datos procesa los datos de infrarrojos recogidos para formar una red tridimensional de efusividad térmica”.</p>	<p>2008</p>
<p>Método para determinar la efusividad térmica y / o conductividad térmica del material laminar [27].</p>	<p>US7490981B2</p>	<p>Ivan Petrovic</p>	<p>“Es desglosado un método para determinar la efusividad térmica y/o conductividad térmica de un material laminado o de sustrato recubierto con un espesor inferior a unos 100 um. El método tiende a proporcionar una muestra mediante la estratificación de más de 2 materiales en laminas o sustratos recubiertos y medir la efusividad térmica y/o la conductividad térmica de la muestra mediante una sonda de efusividad térmica y/o una sonda de conductividad térmica”.</p>	<p>2009</p>
<p>Papel térmico [28].</p>	<p>US20060122059A1</p>	<p>Sharad Mathur Ivan Petrovic David Lewis Xiaolin Yang Ernest Finch.</p>	<p>“La invención presente proporciona un precursor compuesto de papel térmico que comprende una capa de sustrato, y una capa de base colocada en la capa de sustrato, la capa de base comprende un aglutinante y al menos un mejorador de porosidad donde el precursor compuesto de papel térmico tiene una efusividad térmica que es al menos 2% menor que la efusividad térmica del precursor compuesto de papel térmico sin mejorador de porosidad. El precursor del compuesto de papel térmico es útil en la fabricación de compuestos de papel térmico.</p>	<p>2006</p>

1.10 APLICACIONES DE LA MEDICIÓN DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA

Con el estudio y la medición de la efusividad térmica se han tenido avances tecnológicos en diversas áreas, como, por ejemplo; la creación de un instrumento para la medición por contacto, que mediante el estudio de la háptica describe el sentido del tacto, localizado en la superficie de la piel. La sensación de calor y frescura (efusividad térmica) conforma la sensación de confort, o el efecto deseado, que va a la superficie del material tocado. Este es un campo de medición importante para la creación de telas, tejidos textiles, entre otros materiales.



Figura 1. TPS-EFF (Transient Plane Source-EFFusivity) medidor portátil para la obtención directa de la efusividad térmica [1].

“El TPS-EFF (Transient Plane Source-EFFusivity) es un medidor portátil para la determinación directa de la efusividad térmica de los textiles y otros materiales de baja efusividad, de acuerdo con la norma ASTM D7984-16. Con una sola medición de 2 o 10 segundos de duración, se puede medir con precisión la efusividad térmica de los materiales” [1].



Figura 2. Grafica representativa del TPS-EFF (Transient Plane Source-EFFusivity) [1].

En la Figura 2 se muestra una relación sobre la sensación térmica que se tiene por medio del tacto de la mano hacia diferentes materiales textiles. En donde se observa que, entre mayor efusividad térmica, mayor será la sensación de frío y entre menor efusividad térmica mayor conservación de calor.

Otra de las aplicaciones importantes de la efusividad térmica es en el área de la industria farmacéutica, en donde puede utilizarse fácilmente para supervisar una serie de procesos incluyendo la granulación húmeda, la mezcla, y el secado, así como una herramienta útil para supervisar el proceso de lubricación y estimar la dureza de las pastillas [2], [29].



Figura 3. Efusividad térmica en la fabricación de fármacos [2], [29].

En los últimos años, una de las aplicaciones donde la medición de efusividad térmica y sus propiedades son de gran importancia, es en la creación de combustibles orgánicos que puedan sustituir a los hidrocarburos. Este es el caso del biodiesel, que ha sido considerado una opción atractiva ya que es biodegradable, menos contaminante y se deriva de la materia prima natural y renovable [11], [18], [20]. El biodiésel se produce a partir de una gran variedad de materias primas, incluyendo los aceites vegetales (girasol, colza, soja, coco, aceituna, etc.), grasas animales y aceites de desecho. Los aceites vegetales y las grasas animales son triacilglicérols, constituidos químicamente por ésteres de ácidos grasos con glicerol. Hay diferentes métodos para producción de biodiesel y la más utilizada es la transesterificación, que consiste en la reacción entre los triglicéridos y el alcohol, generalmente metanol o etanol, produciendo ésteres y glicerina. Actualmente algunos países ya han adoptado una sustitución gradual del diésel por el biodiesel, en vista de su completa compatibilidad. Así, varias propiedades físicas y químicas (punto de nube, viscosidad cinemática, densidad, número de cetano, punto de inflamación, etc.) deben ser conocidas para una amplia investigación de un biodiesel fabricado. En este sentido, la determinación de las propiedades térmicas es definitivamente importantes, ya que su uso tecnológico inevitablemente tiene que ver con la termodinámica de procesos. Muchos modelos de combustión computacional han sido desarrollados para simular el rendimiento del diésel real motores, que requieren el conocimiento de las propiedades dinámicas como la difusividad y la conductividad térmica. En donde la efusividad térmica es una propiedad esencial para describir el comportamiento de flujo de calor [30].

Otra investigación, es para el desarrollo de aceites sintéticos o bio-aceites procedentes de fuentes vegetales (aceite de ricino, soja, girasol, algodón, semillas de canola, palma y semillas de Jatrofa), para su uso como aditivo en el aceite de motor debido a sus propiedades como viscosidad, densidad, etc., con lo cual se busca disminuir la huella de carbono producida por la contaminación de combustibles fósiles. El conocimiento del comportamiento de las propiedades térmicas, como la

efusividad permite esperar condiciones específicas al ser útiles como un indicador para predecir si un lubricante ofrecerá o no un bajo daño por desgaste antes de ser usado en una prueba de desgaste específica o si el aditivo proporciona una buena lubricidad en términos de fricción [18], [20].

Un campo de estudio de las propiedades térmicas en donde se tiene que poner gran atención es en los dispositivos de recolección de energía, que, por medio de un resonador térmico se realiza la conversión de fluctuaciones de temperatura diurna en energía eléctrica, en donde, utilizando un compuesto de cambio de fase térmicamente conductor como material de alta efusividad térmica. El compuesto consiste en una espuma de níquel altamente porosa y termoconductora impregnada con ecoisano como material de cambio de fase para mejorar la capacidad térmica. El simple hecho de generar energía eléctrica mediante fluctuaciones de temperatura y sin la intervención de ningún motor, turbina o quemando algún hidrocarburo, ya por si solo es un enorme avance tecnológico amable con el medio ambiente, aunque por el momento no se genera gran cantidad de energía, pero se espera gran crecimiento en un próximo futuro de estas tecnologías [31].

Las aplicaciones y estudio de la efusividad térmica y/o propiedades térmicas de los materiales, tienen una elevada importancia en la creación de nuevos materiales, nuevos métodos de generar electricidad, en la sustitución parcial o total de combustibles o aditivos fósiles, en el campo de la medicina, en la fabricación de fármacos, etc.

CAPÍTULO II. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

2.1 RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se explicarán los conceptos generales y propiedades de la efusividad térmica, el efecto piroeléctrico, los materiales piroeléctricos, además de las técnicas utilizadas para la medición de las propiedades térmicas de los materiales.

2.2 PROPIEDADES DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA

La efusividad térmica es la capacidad de un material (líquidos, sólido o gas) de intercambiar calor con su entorno. Este concepto puede ser comparado con la efusividad o sensación de una persona cuando se reencuentra con otra que no ha visto en mucho tiempo, en donde por lo común, el reencuentro suele ser muy emotivo, muy caluroso, muy efusivo. Otra manera de ejemplificar la efusividad térmica es a través la sensación que se tiene en la mano al tocar un objeto, por ejemplo, cuando en una habitación que se encuentra a un temperatura determinada, temperatura ambiente $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, se le pide a la persona que toque con la palma de su mano una mesa de madera (material A), y al momento de tocarla sentirá que esta “tibia” o “cálida”, por otro lado, si se le pide que con la misma mano toque algún metal (material B), por ejemplo, el respaldo de una silla o mesa, este sentirá al momento que esta “frio”. Esto, ¿A qué se debe?, si por las reglas de la termodinámica, la temperatura de los objetos que se encuentren en una habitación deberá ser la misma temperatura que la existe en la habitación. Lo anterior se debe a las propiedades mismas del material en donde la efusividad térmica mide que tan bueno es un material al intercambiar calor con cualquier otro con el que entre en contacto. En la Figura 4 se ejemplifica el efecto o sensación de la efusividad térmica [4].



Figura 4. Ejemplificación de la efusividad térmica al contacto con distintos materiales.

La definición de la efusividad térmica de forma matemática se ejemplifica por medio de la siguiente formula:

Ecuación 1.

$$\varepsilon = \sqrt{k\rho c}$$

$$\varepsilon = \text{efusividad térmica} \left(W s^{\frac{1}{2}} cm^{-2} K^{-1} \right)$$

$$K(\text{Kappa}) = \text{conductividad térmica} (W cm^{-1} K^{-1})$$

$$\rho(\text{Rho}) = \text{densidad} (g cm^{-3})$$

$$C_p = \text{calor específico} (J g^{-1} K^{-1})$$

2.2.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (Kappa K)

Se define como la medida de la cantidad de calor que fluye entre dos materiales o dos puntos por conducción. Las unidades de la conductividad térmica se pueden deducir a partir de la ecuación de Fourier o fórmula de densidad de flujo de calor, en donde:

$$\text{Ecuación 2.} \quad \dot{q} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \rightarrow K = \frac{-\dot{q}}{\frac{A}{dx}} \rightarrow K = \frac{W}{m \cdot K} \therefore \frac{\text{Energía}}{\text{Longitud} \cdot \text{Tiempo} \cdot \text{Temperatura}}$$

De manera matemática se expresa como la cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo t , por unidad de área A , y por unidad de gradiente de temperatura $\nabla T = \partial T / \partial r$ (se mide en K o $^{\circ}C$). El signo negativo indica que el flujo de calor tomara lugar en la dirección contraria del gradiente de temperatura. La conductividad térmica es directamente proporcional a la velocidad de difusión del calor y a la cantidad de calor que puede almacenar o liberar un material [32].

La conductividad térmica depende de:

- La homogeneidad del material.
- Fase en la que se encuentra: solido, liquido o gas.
- Estructura microscópica del material.
- Composición química.
- Temperatura y presión.

2.2.2 DENSIDAD (RHO ρ)

La densidad (ρ): es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia:

$$\text{Ecuación 3.} \quad \rho = \frac{m}{V} \therefore \text{Densidad} = \frac{\text{masa}(g)}{\text{volumen}(cm^3)}$$

donde m es la masa de una muestra de la sustancia y V su volumen. La densidad es una propiedad característica de cualquier sustancia pura, en el sistema internacional de unidades es el Kg/m^3 o bien el g/cm^3 [33].

2.2.3 CALOR ESPECIFICO (C_p)

El calor específico se define como el número de Joules requerido para elevar la temperatura de 1.00 kg de una sustancia a 1.00 K, o el número de calorías necesario para elevar la temperatura de 1.00 g de una sustancia en 1.00 °C.

Ecuación 4.
$$\text{calor específico} = \frac{\text{joules}}{Kg \cdot K} \text{ o } \frac{\text{calorías}}{g \cdot ^\circ C}$$

Es una propiedad física de la materia que mide la cantidad de calor necesaria para producir un cambio de temperatura por unidad de masa de una sustancia determinada [33].

2.3 EFECTO PIROELÉCTRICO

El fenómeno de la piroelectricidad tiene al menos 2300 años de antigüedad. La primera descripción de este fenómeno fue publicada por el filósofo griego Theophrastus (372 – 287 a. C.) en su libro “ON STONES” [34], Después, durante la edad media fue encontrado un libro impreso titulado “Hortus Sanitatis Major”, el cual contiene algunos capítulos que describen minerales con características piroeléctricas. Una de las investigaciones serias que describen este fenómeno fue presentada durante el siglo XIX por el científico David Brewster, quien fuera el primero en utilizar el término piroelectricidad en un artículo publicado en 1824, titulado “Observaciones de la piroelectricidad de minerales”. Las primeras mediciones precisas de las cargas piroeléctricas fueron realizadas por Jean-Mothée Gaugain en el año 1856, mediante el análisis con un electroscopio de autodescarga [35].

La palabra piroelectricidad tiene una descripción griega “pyro” que significa fuego y “electric” que significa electricidad. Es una propiedad que presentan específicos materiales que sometidos a variaciones de temperatura experimentan cambios en la polarización eléctrica, estos cambios inducen un campo eléctrico en el interior del material debido al movimiento de cargas positivas y negativas en los extremos opuestos de la superficie del elemento. Esta propiedad o efecto piroeléctrico se diferencia del efecto piezoeléctrico que da lugar a cargas eléctricas cuando se deforma un material [36].

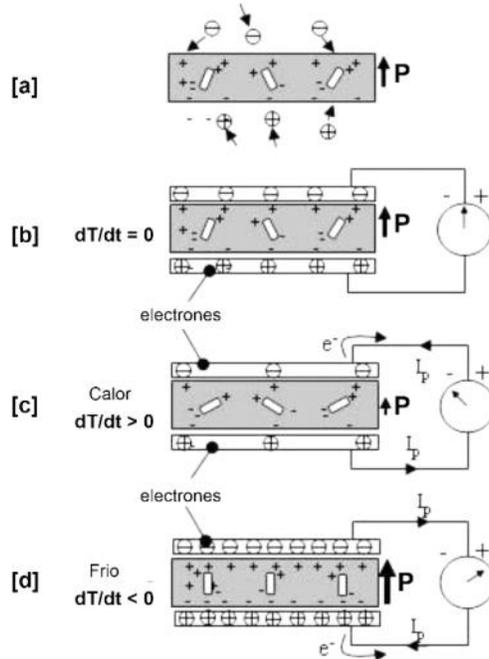


Figura 5. Si un cristal piroeléctrico con un momento dipolar intrínseco se forma en un circuito con electrodos conectados en cada superficie, un aumento de la temperatura T hace que la polarización espontánea P_s disminuya a medida que los momentos dipolares disminuyen en magnitud [37].

Las leyes del efecto piroeléctrico fueron postuladas por Jean-Moathé Gaugain, las cuales establecen lo siguiente: Si el cambio de temperatura ΔT , es uniforme en todo el material, el efecto piroeléctrico se describe mediante el coeficiente piroeléctrico \bar{p} que es un vector de la forma:

$$\text{Ecuación 5.} \quad \Delta \bar{P} = \bar{p} \Delta T$$

En donde \bar{P} = polarización espontanea es el momento dipolar eléctrico por unidad de volumen, podría ser expresada como la carga de superficie enlazada por unidad, en un área determinada normal a la superficie libre. Esta propiedad es característica de los dieléctricos, se define en forma matemática:

$$\text{Ecuación 6.} \quad P = \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Donde: $\Delta p = \sum p_m$ es la suma vectorial de todos los momentos dipolares que existen en el volumen elemental ΔV ; p_m es el momento dipolar de cada átomo o molécula que existe en Δ [36], [38]. Dentro de los mismos límites de temperatura, la carga desarrollada por el efecto de calentamiento o de enfriamiento son de igual magnitud, pero las polaridades de las cargas se invierten.

2.3.1 MATERIALES PIROELÉCTRICOS

Por encima de la temperatura de Curie (T_c), un material es paraeléctrico (no polar) y por debajo los ferroeléctricos son polares y pueden exhibir piroelectricidad. Estos materiales generalmente tienen coeficientes piroeléctricos más grandes que los no ferroeléctricos, y son de mayor interés para aplicaciones. Estos pueden clasificarse por medio de su composición molecular; por monocristales, cerámicos, polímero y materiales de película fina. O por su polarización espontánea: iónica, electrónica, dipolar y de orientación o carga espacial. Otro factor para que exista el efecto piroeléctrico en el caso de un material sólido, es el requerimiento de tres condiciones: la estructura molecular debe tener un momento dipolar distinto de cero; el material no debe tener centro de simetría y el material no debe tener eje de simetría rotacional o un solo eje de simetría rotacional que no esté incluido en un eje de inversión. De las 32 simetrías de grupo de puntos de cristal, solo 10 permiten la existencia de piroelectricidad [37].

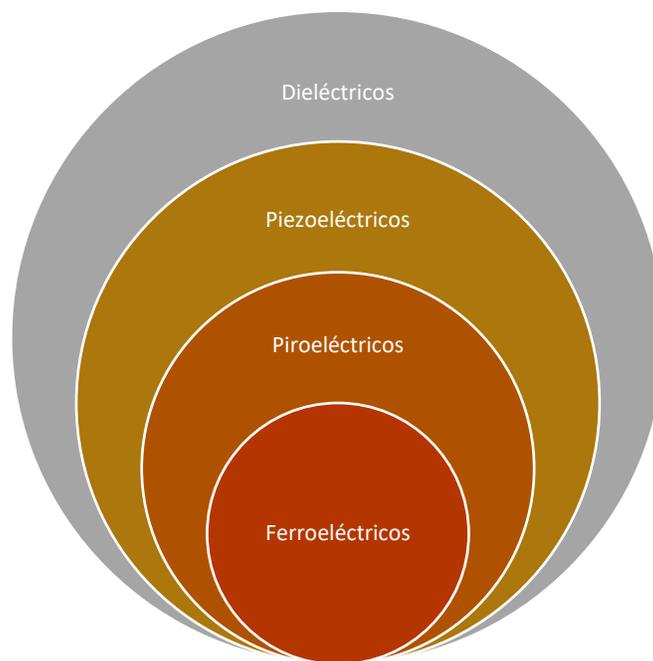


Figura 6. Materiales que según su composición generan una señal eléctrica [36].

También, otra forma de diferenciar a los materiales piroeléctricos es por su forma de generar una señal eléctrica, que van desde:

- Ferroeléctricos: Generan una señal eléctrica debido a un campo eléctrico que incide sobre o alrededor de ellos.
- Piroeléctricos: Generan una señal eléctrica debido a fluctuaciones en la temperatura.

- Piezoeléctricos: Generan una señal eléctrica al ser sometidos a una tensión mecánica, en su masa adquiere una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencial al igual que cargas eléctricas en su superficie.
- Dieléctricos: Impiden el paso de electrones.

El Sulfuro de Triglicina (*TGS*) es potencialmente un material excelente para fines de conversión de energía piroeléctrica. El *TGS* tiene la composición química de $(NH_2 - CH_2COOH + 3H_2SO_4)$ y los cristales basados en el grupo de Glicina ($NH_2 - CH_2OOH$) son polares y exhiben una referencia alta de piroelectricidad para circuitos térmicos y eléctricos, tienen una baja Temperatura de Curie de $49\text{ }^\circ\text{C}$. Esta baja temperatura del *TGS* puede mejorarse a través la adición de Deuterio (2H), creando la forma Deuterio de Sulfuro de Triglicina (*DTGS*) y, para el incremento del coeficiente piezoeléctrico se realiza mediante la sustitución con ácido sulfúrico para formar Triglicina de Fluoruro Bórico (*TGFB*), con la sustitución por el Tantalato de Litio ($LiTaO_3$) o con el Nitrovorato de Litio ($LiNbO_3$). El *TGS* es soluble en agua, higroscópico y relativamente de baja resistencia [39].

Los cristales simples de estructura perovskita ferroeléctrica como el Niobato de magnesio con Circonato de Plomo y Titanato de Plomo dopado con Manganeso ($Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3}) - O_3 - xPbTiO_3$), son materiales relativamente nuevos que se están explorando para varias aplicaciones de transductores debido a su alto coeficiente piezoeléctrico y piroeléctrico. Estos cristales tienen una temperatura de Curie relativamente baja ($121\text{ }^\circ\text{C}$). Debido a su naturaleza de cristal único, los materiales son relativamente caros y pueden formarse en formas limitadas [39].

La familia de Circonato-Titanato de Plomo o *PZT* ($PbZr_{1-x}Ti_xO_3$) sigue siendo una cerámica comercial ampliamente utilizada debido a su relativa facilidad de fabricación en forma policristalina y buenas propiedades piezoeléctricas, además de ser el mejor material piroeléctrico cerámico que puede ser encontrado en el mercado. Debido a su composición estos pueden ser fabricados en varias formas y tamaños. Esta cerámica *PZT* modificada con Lantano *PLZT* ($Pb_{1-x}La_x)(Zr_{1-y}Ti_y)O_3$, tiene propiedades piroeléctricas con una alta capacidad de detección y bajos niveles de ruido [39], [40].

Los materiales libres de plomo son en la actualidad de gran interés para el cuidado del medio ambiente y de la salud. El monocristal de titanato de bismuto ($Bi_4Ti_3O_{12}$) y bismuto dopado con manganeso (*Mn*) es un material potencial de captación de energía piroeléctrica. Han sido examinados ya que las composiciones poseen excelentes coeficientes piezoeléctricos, piroeléctricos

y altas temperaturas de Curie ($T_C > 200\text{ }^\circ\text{C}$). Las cerámicas basadas en estos materiales pueden ser difíciles de polarizar debido a sus altas conductividades eléctricas y pérdida dieléctrica. Para superar estas deficiencias, a menudo se dopan [39].

El monocristal Tantalato de Litio (LiTaO_3), es un material óptico y ferroeléctrico comercialmente importante que se ha explorado para aplicaciones piroeléctricas. El LiTaO_3 es térmicamente estable con un alta T_C de $665\text{ }^\circ\text{C}$. Aunque posee una capacidad de carga eléctrica menor ante las variaciones de temperatura en comparación con el TGS , en este material se encuentran una gama más amplia de aplicaciones debido a su baja pérdida dieléctrica y estabilidad térmica y física [39].

Los materiales anteriores son típicamente de tipo cerámico y, por lo tanto, son relativamente de alta densidad, alta rigidez y quebradizos. Si la flexibilidad mecánica y la tenacidad son deseables, se puede considerar un polímero piroeléctrico Fluoruro de Polivinilideno o PVDF que es uno de los materiales piroeléctricos más utilizados para la detección de propiedades térmicas de algunos materiales [39], [40].

Los materiales compuestos también están atrayendo interés en un esfuerzo por combinar ferroeléctricos cerámicos de alta actividad con una matriz flexible y de baja permitividad. Estos han sido examinados para hacerlos detectores piroeléctricos [39].

2.3.2 APLICACIONES DE LOS MATERIALES PIROELÉCTRICOS

El efecto piroeléctrico se aplica en la detección de radiación térmica a temperatura ambiente. Un ejemplo de la aplicación de este efecto es cuando se disponen dos electrodos metálicos en dirección perpendicular a la de polarización, formándose un condensador que actúa como sensor térmico. Cuando el sensor absorbe radiación cambia su temperatura y con ello su polarización, produciendo una carga superficial en las placas del condensador.

Los detectores térmicos piroeléctricos tienen cinco ventajas principales:

- Sensibilidad sobre un ancho de banda espectral muy grande, en principio, sobre todo el espectro electromagnético, dependiendo de las características de absorción del material piroeléctrico y sus electrodos.
- Sensibilidad en un rango de temperatura muy amplio, desde unos pocos grados Kelvin hasta cientos, dependiendo del material piroeléctrico.
- Bajos requisitos de potencia: lo suficiente para controlar el transistor de efecto de campo que amplifica la señal.

- Respuesta rápida, durante períodos tan cortos como picosegundos.
- Fabricación de bajo costo a partir de materiales económicos.

El componente más importante de cualquier dispositivo piroeléctrico es el material del detector. El sulfato de triglicina (*TGS*) y sus isomorfos tienen propiedades muy favorables, incluidos altos coeficientes piroeléctricos y una permitividad relativamente baja. A pesar de su naturaleza higroscópica, estos materiales son los favoritos para aplicaciones de alta sensibilidad. El equivalente de litio es muy estable debido a su alta T_c e insensibilidad a la humedad y al vacío, y a menudo se usa para aplicaciones espaciales. La primera aplicación relacionada con el espacio fue el radiómetro vertical de perfil de temperatura, lanzado en la órbita de la Tierra en 1972. El *Pioneer Venus Orbiter* lanzado en 1978 se utilizó para mapear las temperaturas de las nubes en Venus. La sonda más sólida de esa misión se dejó caer en la atmósfera del planeta para medir el flujo térmico neto. La misión Galileo lanzada en 1989 incluía un ftopolarímetro-radiómetro para determinar la radiación térmica en Júpiter y sus lunas. Los datos del flujo térmico recopilados por el radiómetro de flujo neto Galileo liberado hacia la superficie de Júpiter ayudaron a los investigadores a analizar la composición química y la estructura de la atmósfera del planeta. La misión *Mars Exploration Rover* lanzada en 2003 llevaba un espectrómetro de emisión térmica en miniatura para identificar minerales por su espectro IR y recolectar datos de temperatura [37], [39].

El polímero de *PVDF* y sus copolímeros tienen bajos coeficientes piroeléctricos, pero su baja conductividad térmica y constante dieléctrica los hacen útiles para detectores y matrices de gran área. Las cerámicas basadas en el sistema de titanato -circonato de plomo son probablemente los materiales más utilizados relativamente baratos de fabricar, son mecánicamente y químicamente robustos [39].

El $LiTaO_3$ se ha combinado con cemento para la recolección piroeléctrica de pavimentos e incluso, se ha utilizado para generar grandes diferencias potenciales para la generación de haces de iones para estudios de fusión nuclear [39].

Las aplicaciones de los elementos de detección hechos de titanato de estroncio de plomo (*PST*) o titanato de estroncio de bario (*BST*) se usan comúnmente en áreas tan diversas como la lucha contra incendios, la policía y la patrulla fronteriza, detección de minas terrestres, vigilancia de edificios, control de procesos, pruebas de visión, reconocimiento facial y control de tráfico [37].

Es probable que se desarrollen dispositivos piroeléctricos cada vez más sensibles. Las investigaciones actuales probablemente han alcanzado el límite de sensibilidad de los materiales puros [37], pero los dispositivos compuestos de múltiples capas que tienen diferentes composiciones y materiales, ofrecen nuevas posibilidades. La incorporación de piroeléctricos de película delgada directamente sobre sustratos de semiconductores está emergiendo como un área de investigación importante y es probable que la detección de imagen IR mediante piroeléctricos sea mucho más generalizada a medida que bajan los costos. Las áreas importantes a tener en cuenta pueden incluir ayudas visuales nocturnas para conductores de automóviles, dispositivos que cuentan y guían a los clientes en grandes almacenes, dispositivos incorporados en electrodomésticos y ayudas de seguridad para personas mayores [37].

Instrumentación electrónica para su aplicación en técnicas de medición de propiedades térmicas, en donde aislando térmicamente de su entorno, el elemento detector está recubierto con una película delgada ennegrecida para aumentar la absorción de luz. Los amplificadores de bajo ruido y alta impedancia son necesarios para detectar la pequeña cantidad de carga producida por el calentamiento, y los circuitos típicos incorporan un transistor de efecto de campo con una resistencia de carga apropiada o un amplificador operacional con una resistencia de retroalimentación para aumentar la señal. Dopando el detector con varios elementos puede controlar la resistencia del detector y, por lo tanto, eliminar la resistencia de carga [37].

2.4 TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS EMPLEADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA EFUSIVIDAD TÉRMICA

Las técnicas fototérmicas, si bien, no son un campo de estudio nuevo, ofrecen una enorme variedad de aplicaciones en diversas áreas, que van desde el estudio de las propiedades térmicas de los materiales, el análisis de nuevos bio-combustibles y/o aditivos que sustituyan a los elaborados por medio de combustibles fósiles, en el estudio de tejidos y sustancias humanas (glucosa), etc. En este trabajo se pondrá un mayor énfasis a las técnicas que han sido utilizadas en metodologías experimentales para la caracterización de propiedades térmicas en sustancias líquidas.

En la Figura 7 se muestra una representación gráfica de las diferentes técnicas que se han desarrollado para el estudio de las propiedades térmicas de los materiales [41].

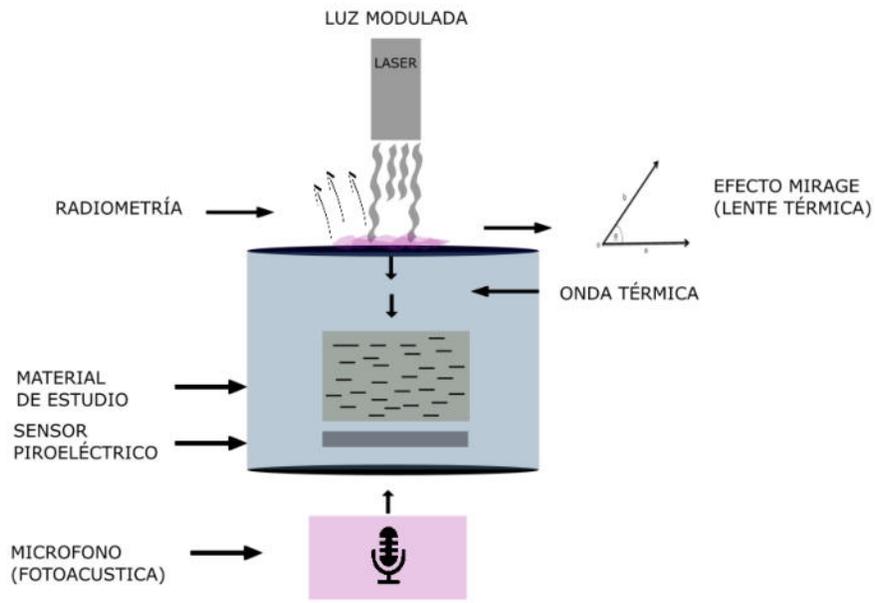


Figura 7. Técnicas fototérmicas [20], [41]–[44].

Su metodología de experimentación se basa en la modulación en frecuencia de diversas perturbaciones: ondas de luz pulsada, sonido, termoreflectoras, radiación infrarroja, etc. Para el caso de las técnicas que utilizan ondas pulsadas, su análisis se enfoca en la detección de ondas térmicas que se producen en un material como resultado de la absorción de un haz de luz de intensidad variable, ya sea modulado o pulsado [41].

Los rasgos más importantes que definen la onda térmica son la longitud de onda y la velocidad de fase, las cuales están determinadas por las propiedades térmicas del material. Si el material bajo estudio es homogéneo, las ondas térmicas se propagan libremente, sin embargo, para materiales heterogéneos, las ondas térmicas sufrirán un proceso de dispersión cuando en su avance se encuentre con discontinuidades. La transmisión, así como la dispersión de la onda térmica, depende de las propiedades físicas del material bajo estudio, como consecuencia, las ondas térmicas llevan información sobre la estructura interna, las propiedades ópticas y térmicas del material. El análisis de esta información mediante diversas técnicas de detección permite obtener información de las propiedades antes mencionadas. Entre las técnicas más utilizadas se puede mencionar: la termorreflectancia, radiometría infrarroja, lente térmica, la fotoacústica, la espectroscopia fotopiroeléctrica, entre otras [4].

2.4.1 TERMOREFLECTANCIA

La termorreflexión o termorreflectancia, es un método óptico sin contacto que aprovecha las variaciones de reflectividad local inducidas por el calentamiento, para deducir una medida de temperatura, con lo cual se pueden utilizar para prácticamente cualquier longitud de onda. La sensibilidad de la técnica de termorreflexión está determinada por el grado de cambio en la reflectividad con los cambios en la temperatura. La medida de esta variación se denomina coeficiente de termorreflexión (*CTR*). El coeficiente de termorreflexión varía ampliamente con la longitud de onda de la irradiación de la luz, utilizada para sondear el cambio en la reflectividad de la muestra [11].

La termorreflexión en el dominio del tiempo (*TDTR*) se utiliza ampliamente en el campo de las caracterizaciones mecánicas y térmicas de capas finas en nano y microescala. Al igual que todos los métodos sin contacto utilizados en el marco de la caracterización térmica, el *TDTR* sondea la temperatura media transitoria en la superficie de la muestra que se calienta a partir de una fuente fototérmica. Dentro de este objetivo, se utiliza un láser, llamado bomba, para emitir un pulso de muy corta duración en la superficie de la muestra. El pulso genera ondas acústicas dentro del medio que llevan a deformar localmente la forma en la superficie. Según las propiedades ópticas del medio, el calentamiento local se produce por la clásica dispersión entre los fonones, los electrones y los defectos. Esto permite la presencia de un campo de temperatura transitorio dentro del medio y en la superficie. Un segundo láser de débil magnitud, llamado sonda, se enfoca en el área calentada. El rayo reflejado de la sonda depende de la forma deformada y, por lo tanto, está relacionado indirectamente con la temperatura media en la zona objetivo. La intensidad reflejada se mide a lo largo del tiempo para sondear la respuesta térmica al pulso, que también se llama respuesta al impulso [43].

2.4.2 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía IR, o imágenes IR, es la técnica para registrar y visualizar sin contacto la radiación térmica de los objetos, en primer lugar, destinada a analizar las distribuciones de temperatura de la superficie. La radiación electromagnética (térmica o IR) se produce en sólidos, líquidos y gases debido a las oscilaciones de los átomos en una red o al movimiento rotatorio/oscilatorio de las moléculas. La radiación IR ocupa una amplia banda del espectro electromagnético desde $0,75 \mu\text{m}$ (400 THz), o 750 nm , hasta $1000 \mu\text{m}$ (300 GHz), o 1 mm , entre la luz visible y las ondas de radio [45].

Una de las ventajas en la utilización de esta técnica fototérmica es debido a su carácter no destructivo, remoto y sin contacto, además de permitir el análisis de muestras en forma lineal. Los parámetros térmicos y termoelectrónicos que se pueden obtener a través de un espectro radio térmico son: la velocidad de recombinación frontal y trasera, coeficiente de difusión de portadores, el tiempo de vida de portadores minoritarios, así como la difusividad térmica. Se trata de una técnica muy eficiente en el estudio de muestras que tengan una elevada emisividad (polímeros, cerámicos, metales no pulidos, etc.) [45].

2.4.3LENTE TÉRMICA

Cuando un haz de luz se hace incidir sobre un material, se genera un calentamiento en dicha superficie, esta variación de temperatura se propaga al gas que rodea dicha superficie, con lo cual su índice de refracción (n) es función de la temperatura y del calor generado en el material, un haz de luz (haz de prueba) que se propague por el aire y que pase a través de la zona cuyo índice de refracción sea afectado, sufrirá una desviación periódica. La técnica de lente térmica se basa en la medición de las fluctuaciones periódicas en la desviación del haz de prueba [44].

2.4.4TÉCNICA FOTOACÚSTICA

La fotoacústica se basa en la generación de sonido en un dispositivo denominado celda fotoacústica, a partir de la absorción de radiación modulada y su posterior conversión en calor. La celda fotoacústica consiste en una cavidad cilíndrica, sellada en un extremo por el material bajo estudio y acoplada a un micrófono. Cuando el aire interior de la celda es calentado se produce una fluctuación de presión a la frecuencia de modulación en las ondas térmicas en el material bajo estudio. Como el calentamiento es de forma modulada, se producen en el interior del material fluctuaciones periódicas de temperatura, denominadas ondas térmicas. Actualmente esta técnica se ha probado con diferentes compuestos puros, y se han reportado estudios con aceites esenciales demostrando excelentes resultados [42].

2.4.5ESPECTROSCOPIA FOTOPIROELÉCTRICA

Los experimentos de la espectroscopia fotopiroeléctrica se realizan por medio de radiación modulada. Esta técnica utiliza detectores piroeléctricos, que basan su funcionamiento en el efecto piroeléctrico, el cual consiste en el cambio de polaridad debido a fluctuaciones en la temperatura. Dichos cambios producen el desplazamiento de iones positivos con respecto a iones negativos, con lo cual el material piroeléctrico se polariza eléctricamente. Estas técnicas no destructivas han sido empleadas con el fin de la medición y detección de cambios de parámetros térmicos de los

materiales (capacidad calorífica, conductividad térmica, difusividad térmica y efusividad térmica). Estos cambios pueden deberse a su composición y el cambio en su estructura del material.

La espectroscopia fotopiroeléctrica se ha convertido en uno de los métodos de caracterización de materiales más utilizada en la actualidad, en donde se pueden encontrar investigaciones que van desde semiconductores hasta tejido humano [3], [15], [46], [47].

2.4.5.1 TÉCNICA FOTOPIROELÉCTRICA INVERSA (IPPE)

La configuración fotopiroeléctrica inversa (IPPE inverse photopyroelectric configuration), se utiliza para obtener la efusividad térmica de muestras líquidas y se basa en la radiación incidente directamente en la superficie de un sensor piroeléctrico, dicha radiación es modulada por el oscilador interno de un amplificador lock-in, como se muestra en la Figura 8. La señal de IPPE se puede obtener en función de la frecuencia de modulación de luz (f) que se puede variar en un cierto rango específico. La parte posterior del sensor piroeléctrico está en contacto térmico con la muestra, donde las mediciones se realizan a temperatura ambiente o se controlan de acuerdo con las características del experimento. A frecuencias que provienen de una muestra térmicamente gruesa ($a_s l_s \gg 1$, donde $a_s = \sqrt{(\pi f / \alpha_s)}$ es el coeficiente de difusión térmica de la muestra, l_s y α_s son el espesor y la difusividad térmica de la muestra) y dado que el sensor de piroeléctrico es ópticamente opaco, lo que es independiente de las propiedades ópticas de la muestra, la expresión matemática de la salida del sensor piroeléctrico se expresa mediante la Ecuación 7 [11], [20].

$$\text{Ecuación 7.} \quad \theta(\omega) = \frac{(1 - e^{-\sigma_p l_p})(1+b) + (e^{-\sigma_p l_p} - 1)(1-b)}{(g-1)e^{-\sigma_p l_p}(1-b) + (1+g)e^{\sigma_p l_p}(1+b)}$$

Donde $\omega = 2\pi f$, $\sigma_p = (1 + i)/\mu_p$, $\mu_p = (\alpha_p / (\pi f))^{1/2}$, α_p , l_p son las variables del sensor piroeléctrico de difusividad térmica y espesor, respectivamente, f frecuencia de modulación de luz, $b = e_s/e_p$, $g = e_g/e_p$ with e_s , e_g , e_p son las efusividades térmicas de la muestra, el sensor de gas y el sensor piroeléctrico, respectivamente.

La efusividad térmica de la muestra se puede calcular mediante la normalización (utilizando la Ecuación 7) con un rango de frecuencia específico y señales piroeléctricas que consisten en llevar a cabo la experimentación inicialmente sin ninguna muestra (con aire como muestra), y luego con la muestra bajo análisis. El valor de la efusividad térmica se obtiene ajustando la expresión matemática a los datos experimentales obtenidos.

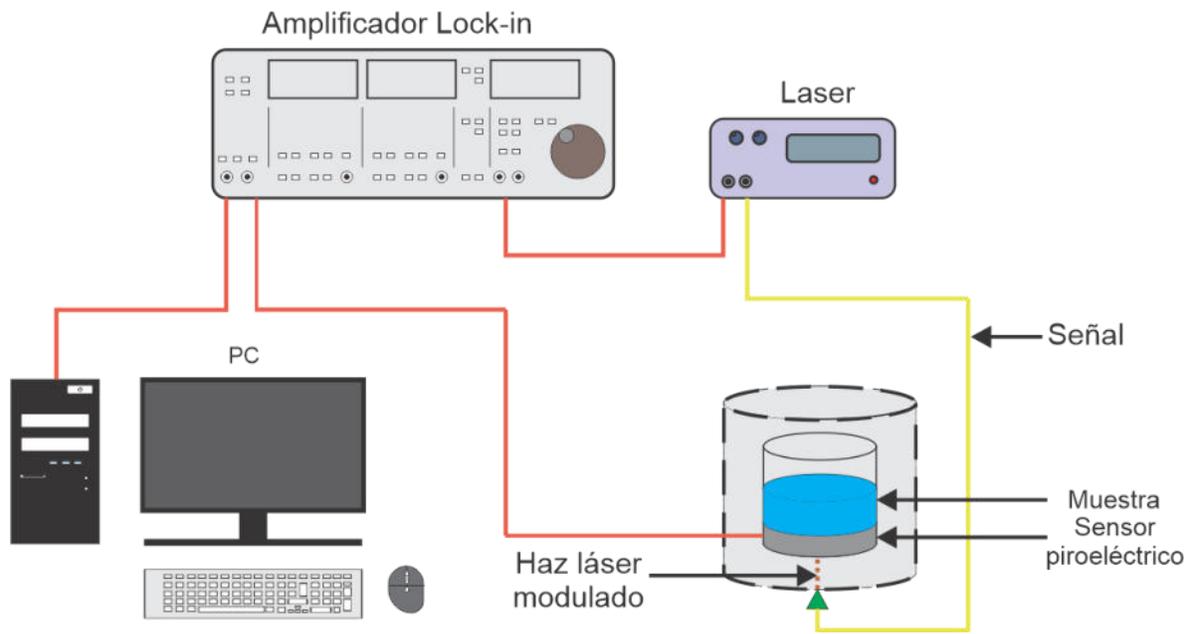


Figura 8. Configuración experimental de la técnica IPPE [8], [18].

CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AMBIENTE CONTROLADO

3.1 RESUMEN CAPÍTULO

La técnica que se elegio para la medición de la efusividad térmica, fue la técnica fotopiroeléctrica frontal, debido a su bajo porcentaje de error en la medición de efusividades térmicas en muestras líquidas. Una vez elegida dicha técnica se prosiguió con el armado de los componentes que emplea para su experimentación, como, por ejemplo, la celda de medición. En el presente capítulo se aborda a detalle el diseño y construcción de la celda de medición, dicha celda es acondicionada con un sensor de temperatura, una celda Peltier, un conector BNC, un acople para el sensor piroeléctrico, un segundo acople para la colocación de leds infrarrojos, varias capas de un material aislante (adiabático) y una jaula de Faraday.

3.2 ESTRUCTURA DE LA CELDA DE MEDICIÓN

El diseño de la celda de medición se realizó con el propósito de que tuviera características específicas para poder realizar mediciones de efusividad térmica, para lo cual, se determinó que contara con los siguientes espacios específicos:

- a) Espacio para un sensor de temperatura.
- b) Espacio para la colocación de una celda Peltier.
- c) Espacio para el montaje de un disipador de temperatura.
- d) Espacio para el montaje de leds infrarrojos (ver capítulo IV).
- e) Espacio para la colocación de un sensor piroeléctrico.
- f) Espacio para la colocación de la muestra.
- g) Conector tipo BNC para la señal de un sensor piroeléctrico.

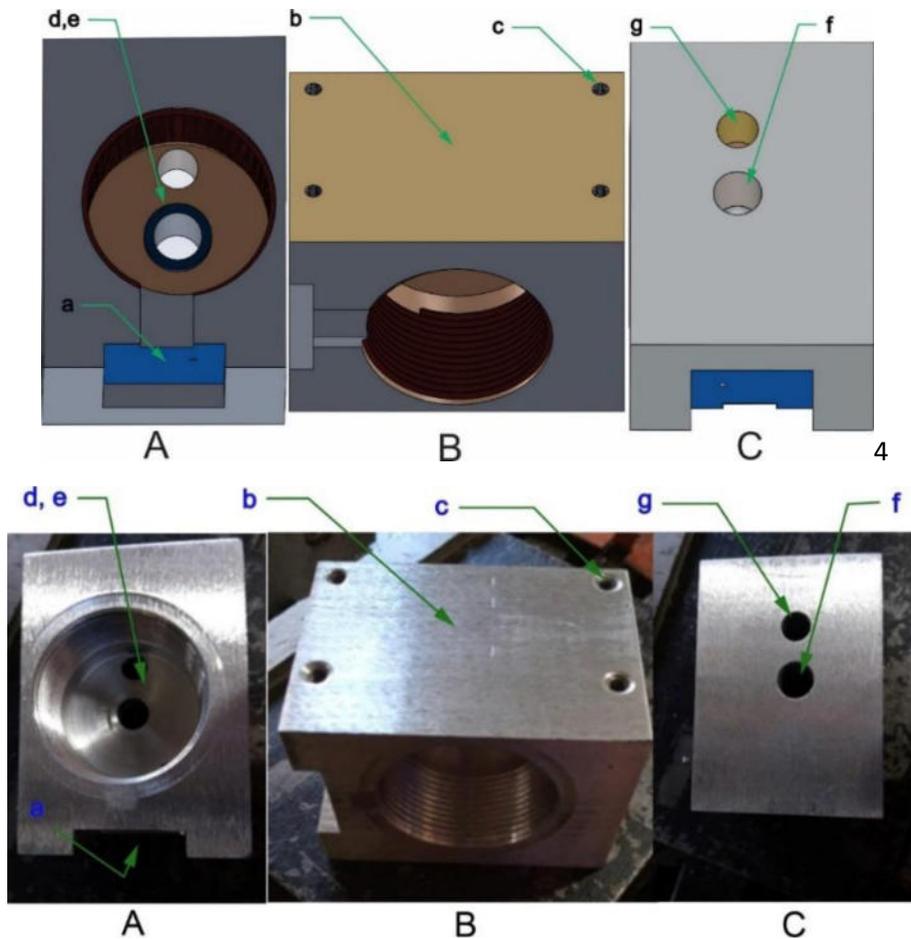


Figura 9. Diseño esquemático de la celda de medición A) vista inferior, B) vista lateral izquierda, C) Vista superior, los espacios específicos están marcados con letras minúsculas en color rojo de acuerdo con la lista anterior.

Esta es la pieza principal en donde se colocarán los elementos antes mencionados, véase que tiene un diseño particular que contempla el montaje de un dissipador de temperatura (b) destinado para la unión de la celda de medición - celda Peltier - dissipador, con lo que se pretende tener un excelente control de temperatura. También, en la colocación del sensor de temperatura que estará midiéndola directamente de manera uniforme sobre toda la pieza. El volumen del espacio en donde se depositará la muestra tiene una medida de 1.57 cm^3 .

Para la colocación de los leds infrarrojos y el sensor piroeléctrico se diseñaron dos acoplamientos respectivamente, y para su fácil manejo se determinó un diseño de ensamblaje, en donde, se unieran a la pieza principal mediante un enroscamiento (rosca estándar), esto con el propósito de poder cambiar el sensor y/o los leds si ocurriese una falla o la ruptura de los mismos. El diseño

utilizado para la fabricación de los acoples se muestra en la Figura 10 y Figura 11, se muestra las mismas piezas ya fabricadas en aluminio. Una vez teniendo el diseño completado se prosiguió con su maquinado. El material seleccionado para su elaboración fue el aluminio con una densidad de 2.7 g/cm^3 , es resistente a la corrosión, característica muy importante debido a que se experimentará con muestras líquidas, excelente conductor de calor, completamente impermeable, metal no tóxico.

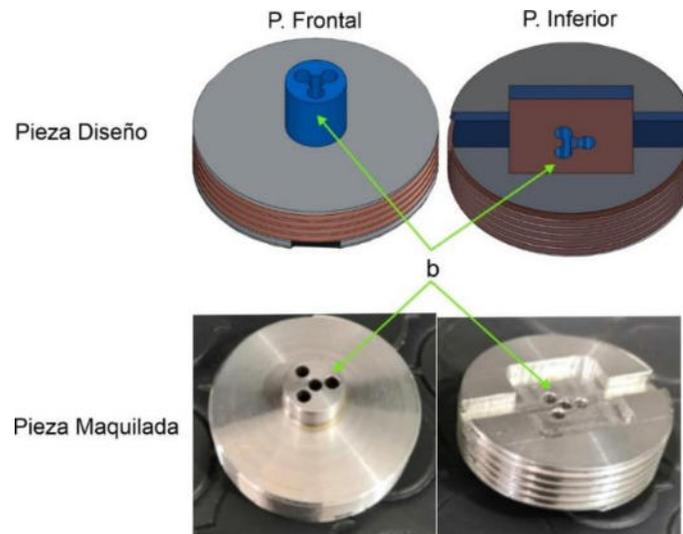


Figura 10. Pieza para colocación de leds infrarrojos.

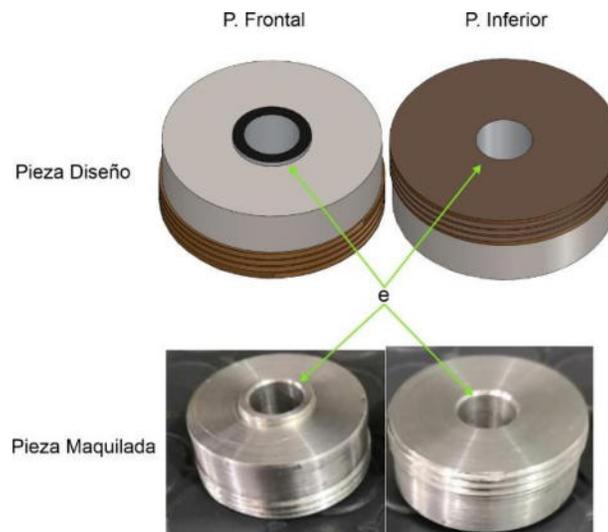


Figura 11. Pieza para colocación de sensor piroeléctrico.

Como siguiente paso, se realizó la colocación de leds, sensor piroeléctrico, sensor de temperatura y conector BNC. En la Figura 12 se muestra un esquema de la colocación de los acoples de leds, sensor

piroeléctrico, sensor de temperatura y conector BNC en forma separada y en la Figura 13 se observan los componentes reales. Para el caso de los acoples, están especialmente diseñados para que embonen perfectamente en su espacio determinado de la celda de medición, haciendo así su fácil armado y desarmado.

El sensor de temperatura utilizado es el *ADT7420* con una resolución de 16 bits que proporciona una resolución de $0.0073\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un voltaje de trabajo que va desde $2.7\text{ V} \leftrightarrow 5.5\text{ V}$ midiendo temperaturas, $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. El sensor de temperatura se ubicó estratégicamente para que estuviera unido térmicamente a la celda de medición, con el objetivo de obtener una medición precisa de la temperatura [48].

Para el caso del acople en donde se pondrá el sensor piroeléctrico, se diseñó de tal forma de que al colocarse la muestra, esta no presente filtraciones. Por medio de la adición de dos elementos llamados sellos o-ring. El sensor piroeléctrico estará conectado directamente al conector BNC, la función de este será captar las señales emitidas al sensor, originadas por la excitación de los leds infrarrojos. Este sensor tiene un diámetro 20 mm , tiene un rango de voltaje $1.5\text{ V} \leftrightarrow 30\text{ V}$ y su puede trabajar a temperaturas que van $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 70\text{ }^{\circ}$ [49].

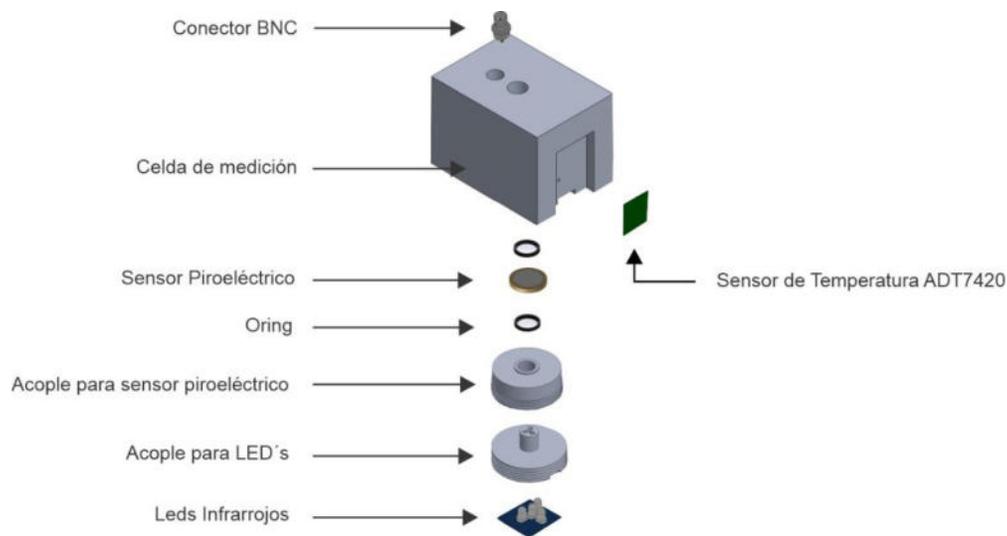


Figura 12. Esquema de acoplamiento de elementos a la celda de medición.

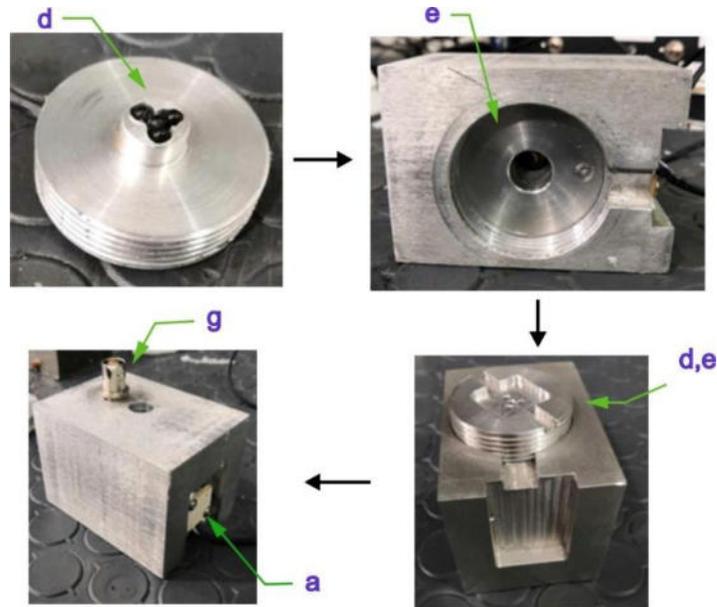


Figura 13. Colocación de elementos a la celda de medición en pieza maquinada.

En el caso del acople de leds, se diseñó específicamente para la ubicación de cuatro leds infrarrojos, dichos leds se alimentan con un voltaje oscilante de $1.25 - 1.85 V$ a una corriente de $100 mA$ por cada led, mediante una fuente moduladora de luz (véase en el capítulo IV). El objetivo principal es la excitación por medio de luz pulsada de los leds al sensor piroeléctrico, el cual esta estratégicamente colocado justo debajo de los leds.

Para poder mantener la temperatura constante en la celda de medición se selló la celda de medición en un medio adiabático, para el cual se utilizaron materiales con una conductividad térmica baja, esto con el objetivo de aislar la celda de medición de variaciones ambientales de temperatura y así mantener una temperatura constante dentro de la celda.

El poliestireno expandido es un material aislante tanto térmico y acústico. La principal característica de este material es su baja conductividad térmica, en donde a una temperatura de $24 ^\circ C$ su conductividad térmica es de $\lambda = 0.03808 W/(m * K)$ [50]

Se le coloco una capa de cinta doble cara para la perfecta adherencia de la primera capa de espuma de poliestireno expandido delgado. La segunda capa ahora fue con el poliestireno normal, con un grosor de 2 cm como se muestra en la figura 14.

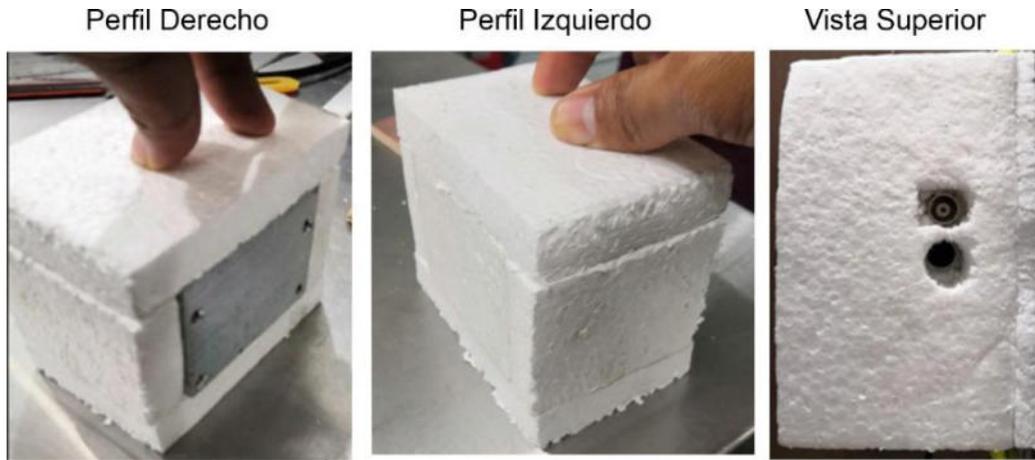


Figura 14. Colocación de capa de cinta doble cara y poliestireno.

La celda Peltier seleccionada es la TEC1-12706 que funciona con 12 *VCD* a una corriente de 4.5 *A*. Con dicha corriente y voltaje cumple el objetivo de alcanzar la temperatura propuesta, que va desde 10 – 40 ° *Celsius* (véase en el capítulo V). Debido a que la celda debe mantener una diferencia de temperatura ($\Delta^{\circ}T$) de entre 66 – 75 ° *C* con un rango de 11 ° *C* de diferencia máximo que debe existir entre el lado caliente y el lado frío para su correcto funcionamiento [50]. Se le acoplo un disipador de temperatura de aluminio de un tamaño de 15.3 x 11.75 x 3.10 *cm* de largo, ancho y de profundidad respectivamente, esto con la finalidad de una correcta disipación de temperatura. Del mismo modo, se le adiciono un set de dos ventiladores mediante una estructura de soporte, el set se colocó estratégicamente para el enfriamiento del disipador si la celda Peltier estuviera en su configuración de enfriamiento.

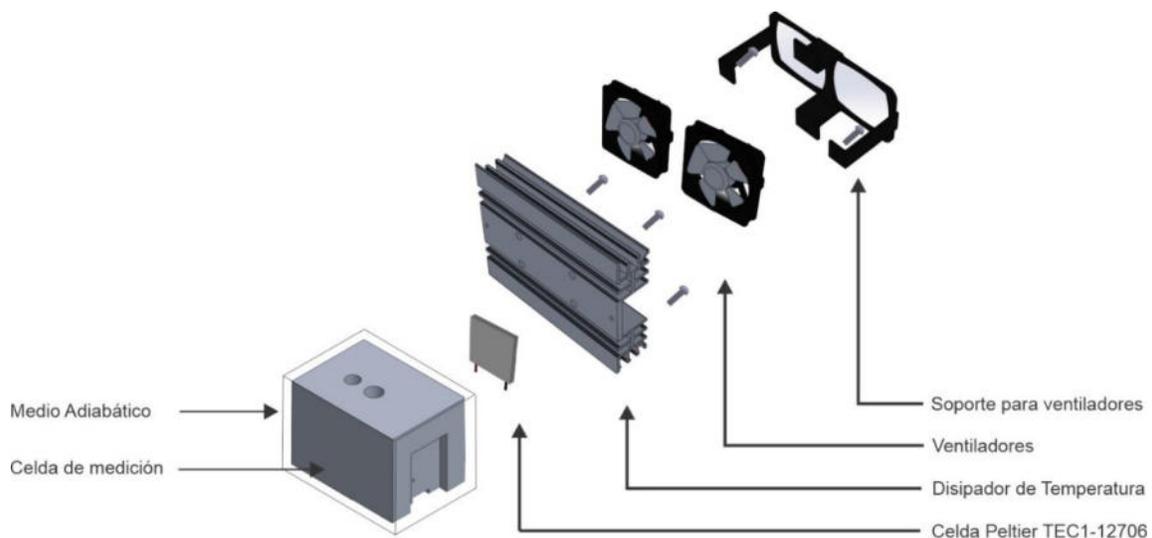


Figura 15. Elementos que se acoplan entre la celda de medición y la celda Peltier.

Una de las partes importantes que se debe tener en cuenta al momento de iniciar con la experimentación, son los campos magnéticos y las ondas electromagnéticas que producen los aparatos electrónicos que están alrededor (celulares, aparatos de medición, etc.) de la celda de medición, de igual manera a los producidos por los mismos seres humanos. Estas perturbaciones provocan falsas o erróneas mediciones, por lo que es importante encerrar a toda la celda de medición en una jaula de Faraday para aislarla de dichas perturbaciones [52].

En la Figura 16 se muestra el esquema de todos los elementos que componen al ambiente controlado, como lo son; el sensor de temperatura, el conector BNC, el sensor piroeléctrico con sus anillos o-ring, el acople para el sensor piroeléctrico, los leds infrarrojos con su acople, el sensor de temperatura, la jaula de Faraday, el medio adiabático, la celda Peltier, el disipador de temperatura, los ventiladores y el soporte para ventiladores.

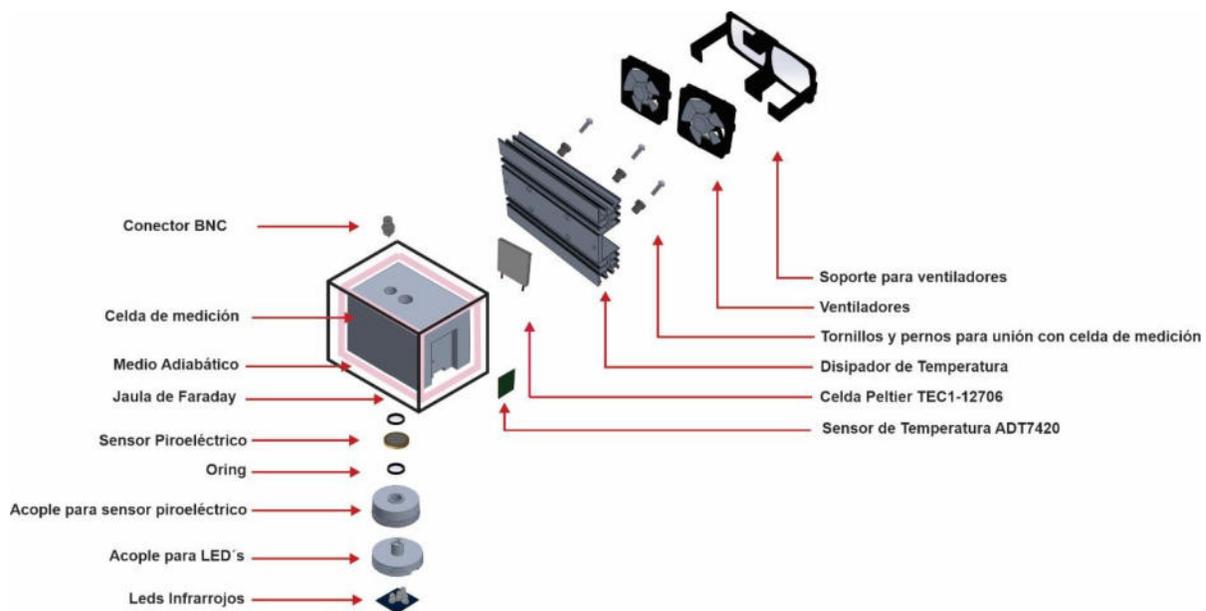


Figura 16. Vista de elementos del ambiente controlado.

Vistas

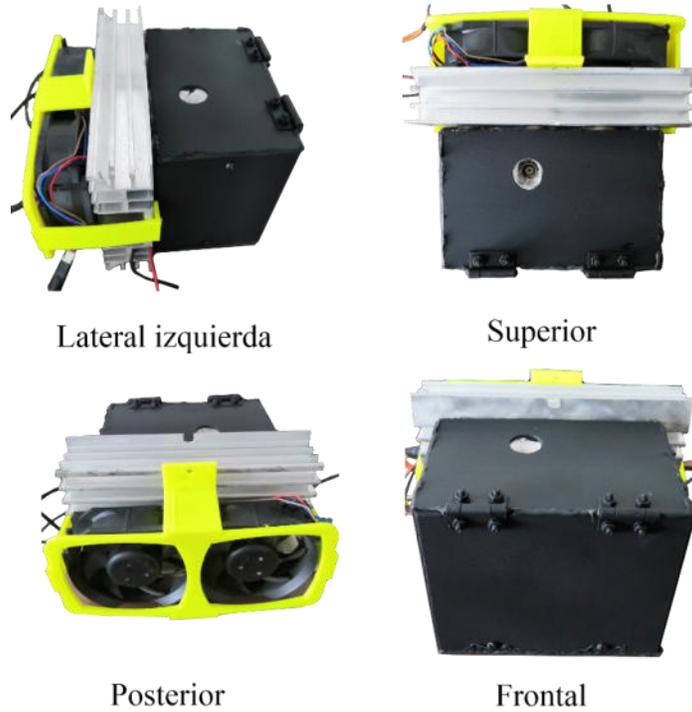


Figura 17. Vistas de ambiente controlado construido.

Para depositar la muestra a medir se requiere retirar dos tornillos y una vez que la muestra este dentro de la celda, se colocan los tornillos en su lugar.

Para efectos experimentales es necesario que la celda de medición llegue en primera instancia a la temperatura determinada para la experimentación, una vez estabilizado el control PID de temperatura de la celda se introduce la muestra liquida a medir.

CAPÍTULO IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE FUENTE REGULADORA DE FRECUENCIA

4.1 RESUMEN CAPÍTULO

El objetivo de este capítulo es la descripción del desarrollo de una fuente moduladora de luz basándose en la técnica fotopiroeléctrica frontal. En donde, se utilizarán 4 leds infrarrojos de alta potencia, la variación de la intensidad luminosa con respecto al rango de voltaje está determinada por las características fotoeléctricas de los leds infrarrojos, rango de voltaje $1.25 V - 1.85 V$ con una corriente máxima de $100 mA$ por cada led [53].

4.2 PROPIEDADES DE LA FUENTE MODULADORA DE LUZ ENFOCADAS A LA TÉCNICA FOTOPIROELÉCTRICA INVERSA

La técnica fotopiroeléctrica inversa es una de las más utilizadas para la medición de la efusividad térmica, es parte de las técnicas fototérmicas, las cuales son un grupo de métodos altamente sensibles que se utilizan para la medición de la absorción óptica, además de dar acceso a una variedad de parámetros termodinámicos y cinéticos de una muestra dada. El termino fototérmico proviene de la detección de relajación térmica del exceso de energía, asociada con la foto-excitación de la muestra mediante una onda térmica o de luz. Las características que definen la onda térmica son la longitud de onda y velocidad de fase, que están determinadas por las propiedades térmicas del material. Cuando se absorbe energía de luz modulada, se produce un calentamiento de la muestra, y posteriormente se disipa total o parcialmente como calor, lo que conduce a cambios de temperatura, así como a cambios en los parámetros termodinámicos de la muestra y sus alrededores. Para un material dado, la región explorada por la onda térmica se puede controlar por medio de la frecuencia de modulación. La captación de variaciones de temperatura en el caso de las técnicas fotopiroeléctricas se realiza por medio de un transductor piroeléctrico [44].

El concepto de técnica fotopiroeléctrica inversa se debe a que la radiación de la luz incide directamente en la superficie de un sensor piroeléctrico, cuyo lado posterior está en contacto térmico con la muestra. Tener diversas longitudes de onda permiten seleccionar aquella longitud a la que el material tiene una buena absorción, esto depende del tipo de material que se vaya a medir, debido a características como su absorción de luz [44].

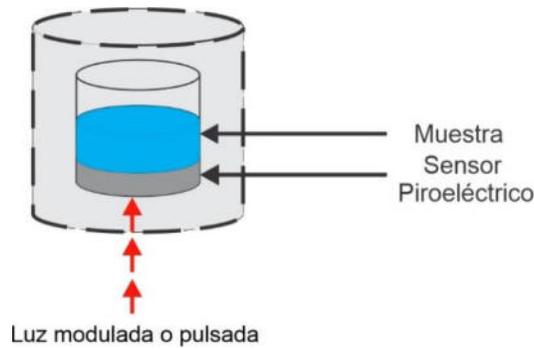


Figura 18. Esquema de luz pulsada de la técnica fotopiroeléctrica inversa.

Para garantizar que la onda de calor modulada llegue a la muestra, el detector piroeléctrico debe de operar en el régimen térmicamente delgado, esto quiere decir que la onda térmica sea capaz de atravesar el detector piroeléctrico y llegar a la muestra, para ello es necesario utilizar bajas frecuencias. La máxima penetración se consigue a frecuencias de $1 - 100 \text{ Hz}$, y a frecuencias en el rango de $\text{kHz} - \text{MHz}$ la distancia recorrida por la onda se reduce sensiblemente [54].

4.3 DISEÑO DE FUENTE MODULADORA DE LUZ

En el caso de este trabajo se eligió utilizar leds infrarrojos (modelo SFH 4356), cuya longitud de emisión de luz infrarroja es de 850 nm , la cual es una longitud de onda que contiene una mayor componente de calor y menor emisión de luz, debido a que se encuentran en la franja del espectro electromagnético del infrarrojo cercano como se muestra en la Figura 19.

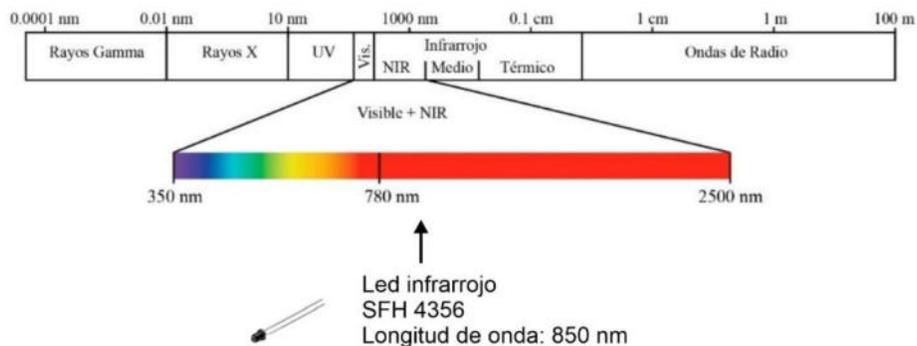


Figura 19. Espectro electromagnético, ubicación del led infrarrojo de alta potencia SFH 4356.

Para encontrar los rangos de voltaje en los que la luz del led infrarrojo cambie desde una mínima emisión hasta un máximo, se utilizó el método de caracterización de componentes, con el cual se determinaron los rangos de voltaje óptimos para llevar a cabo la experimentación.

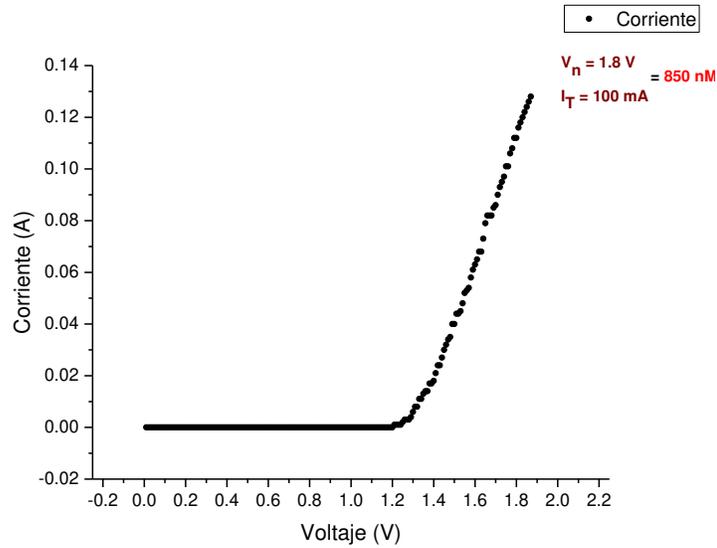


Figura 20. Gráfica de caracterización de led infrarrojo SFH 4356.

Para conseguir que la intensidad de luz varié desde un mínimo hasta un máximo de su potencia, se necesita sobrepasar el voltaje mínimo de encendido del led, para ello es requerido utilizar un amplificador operacional configurado como sumador, en donde el voltaje de una señal senoidal se suma con el voltaje de una señal de corriente directa, con lo que solo varié desde 1.25 V (*minima potencia*) – 1.85 V (*maxima potencia*) con una corriente constante de 100 mA . Teniendo el rango de voltaje y la corriente que se desean alcanzar, se prosiguió con el cálculo de componentes.

Objetivo: variar la intensidad de luz infrarroja desde $1.25 \text{ V} = 0 \text{ nM}$ que es en donde el led se encuentra en un estado de emisión luminosa mínima hasta $1.85 \text{ V} = 850 \text{ nM}$ en donde el led está totalmente encendido, con una corriente constante de 100 mA (los cálculos que se verán a continuación están fijados al encendido de un solo led).

Datos:

$$V_1 = 2 \text{ V (puede ser variado con un potenciómetro)}$$

$$V_2 = 0.550 V_{pp} \text{ con una frecuencia de } 1 \text{ Hz}$$

Para encontrar el valor de S_1 y S_2 , Cálculo de amplificador inversor:

Ecuación 8.
$$S_1 = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_5} \right)$$

$$S_1 = -2 V \left(\frac{10 K}{10 K} \right)$$

$$S_1 = -2 V$$

Ecuación 9.

$$V_{2-rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$V_{2-rms} = \frac{0.550 V}{\sqrt{2}}$$

$$V_{2-rms} = 0.388 V$$

Ecuación 10.

$$S_2 = -V_{2-rms} \left(\frac{R_1}{R_4} \right)$$

$$S_2 = -0.388 V \left(\frac{10 K}{10 K} \right)$$

$$S_2 = -0.388 V_{pp}$$

Cálculo de amplificador como sumador:

$$S_1 = -2 V$$

$$S_2 = -0.388 V$$

Ecuación 11.

$$\frac{S_1 - V_x}{R_7} + \frac{S_2 - V_x}{R_2} = \frac{V_x - S_3}{R_6}$$

$$V_x = 0 V$$

Ecuación 12.

$$\frac{S_1}{R_7} + \frac{S_2}{R_2} = \frac{-S_3}{R_6}$$

Ecuación 13.

$$S_3 = -\frac{R_6}{R_l} (S_1 + S_2)$$

$$R_l = 10 K$$

$$S_3 = -\frac{10 K}{10 K} (-2 + -0.388)$$

$$S_3 = 2.388 V$$

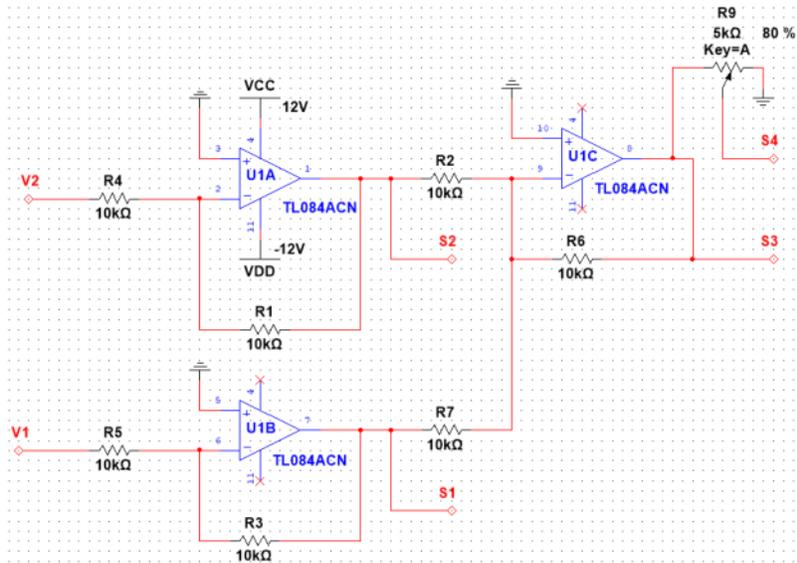


Figura 21. Diagrama electrónico de conexión de fuente moduladora de luz (Etapa control).

En la simulación del circuito:

El valor de $S_1 = -2\text{ V}$, correspondiente a la señal de color amarillo.

El valor de $S_2 = -0.388\text{ V}$

El valor de $S_3 = 2.388\text{ V}$ con un $V_{pp} = 0.550\text{ V}$, corresponde a la señal de color morado, en donde se puede observar una variación que va desde $1.5\text{ V} - 2.54\text{ V}$.

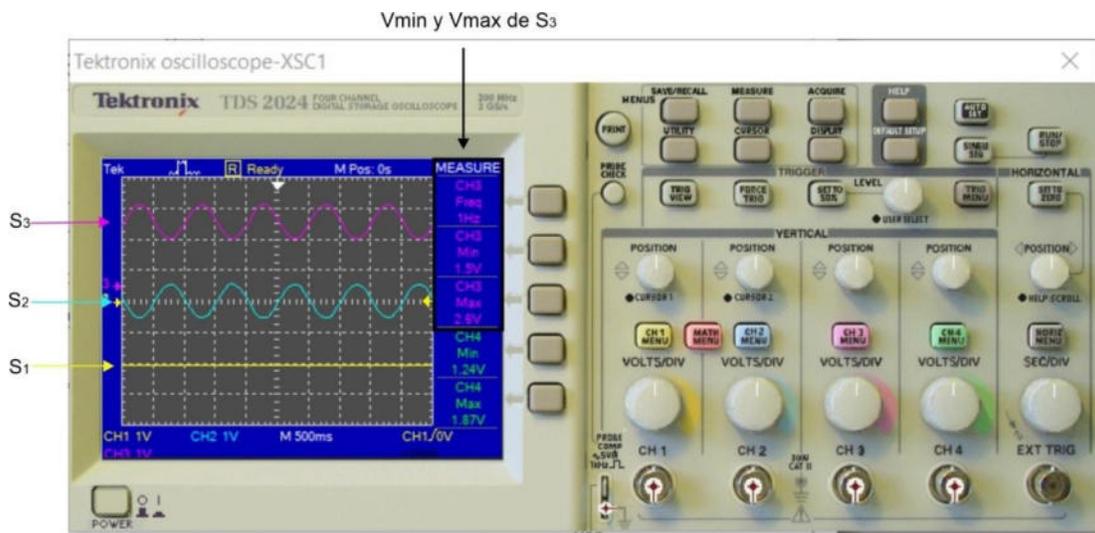
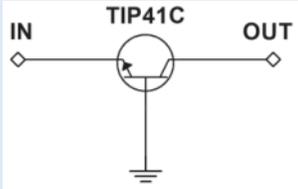
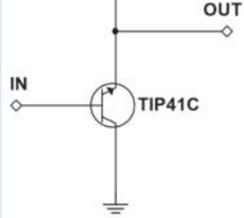
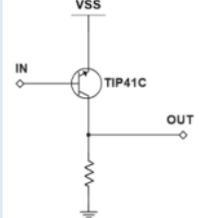


Figura 22. Simulación de señal de salida de fuente moduladora de luz (S_3).

Para alcanzar los 100 mA con los que el led infrarrojo trabaja de forma nominal, se optó por la utilización del transistor de potencia TIP41C, el cual soporta una corriente máxima de hasta 6 A.

Las configuraciones con las que se puede trabajar con un transistor son tres; base común, colector común y emisor común.

Tabla 4. Configuración de transistores.

Base común	Emisor común	Colector común
		
<ul style="list-style-type: none"> • Ninguna ganancia en corriente • Ganancia de tensión • Ganancia de potencia • Tiene un ancho de banda grande • Se utiliza para pre-amplificar 	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancia en tensión • Ganancia en corriente • Ganancia en potencia • Cambia de fase • Bajo ancho de banda 	<ul style="list-style-type: none"> • Nula ganancia en tensión • Ganancia en corriente • Ganancia en potencia • Poca impedancia de salida

Características:

La configuración del transistor para el acople de potencia del circuito fue la de colector común, debido a sus características de ganancia en corriente y poca impedancia de salida. Para el cálculo de la corriente de salida de esta configuración se simuló el comportamiento de los elementos electrónicos calculados, en la Figura 23 se muestra el circuito esquemático.

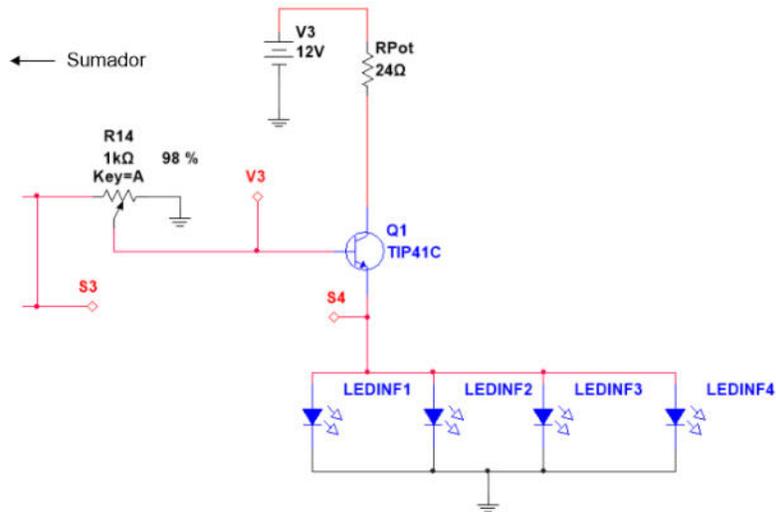


Figura 23. Diagrama electrónico de conexión de fuente moduladora de luz (Etapa Potencia).

Para la elaboración de la gráfica de corriente de saturación del transistor se calculó la corriente de saturación en el colector.

Ecuación 14.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{cc}}{R_{pot}}$$

$$I_{C(sat)} = \frac{12\text{ V}}{24\ \Omega}$$

$$I_{C(sat)} = 0.5\text{ A} \cong 500\text{ mA}$$

Para el cálculo de la corriente en base, por cálculo de corrientes de Thévenin:

Ecuación 15.

$$-V_{B-rms} + I_B R_B + 0.7\text{ V} = 0$$

Ecuación 16.

$$I_B = \frac{V_{B-rms} - 0.7\text{ V}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{2.388\text{ V} - 0.7\text{ V}}{1000\ \Omega}$$

$$I_B = 0.0016\text{ A} \cong 1.68\text{ mA}$$

Ecuación 17.

$$I_C = I_B \times hfe$$

$$hfe = \beta = 75 \text{ tomada de hoja de datos}$$

$$I_C = 0.0016(75)$$

$$I_C = 0.12 A \cong 120 mA$$

Un led infrarrojo alcanza su máxima potencia a un voltaje de $1.85 V$ con una corriente de $100 mA$, si se conectan cuatro leds infrarrojos la demanda de corriente será de $400 mA$. Por lo que, tomando en cuenta la gráfica de saturación de corriente en el colector cuyo valor es de $I_{C(sat)} = 0.545 mA$. Se determinó lo siguiente:

Ecuación 18.

$$V_{CE} = V_{CC} - R_{pot}(I_C)$$

$$V_{CE} = 12 V - 24 \Omega(0.120 A)$$

$$V_{CE} = 9.12 V$$

El voltaje suministrado de colector-emisor a un corriente de $0.120 A$ es de $9.36 V$. Luego entonces si al conectar 4 leds infrarrojos a un voltaje variable de $1.25 V - 1.85 V$, tendremos el siguiente comportamiento visto desde la gráfica de saturación.

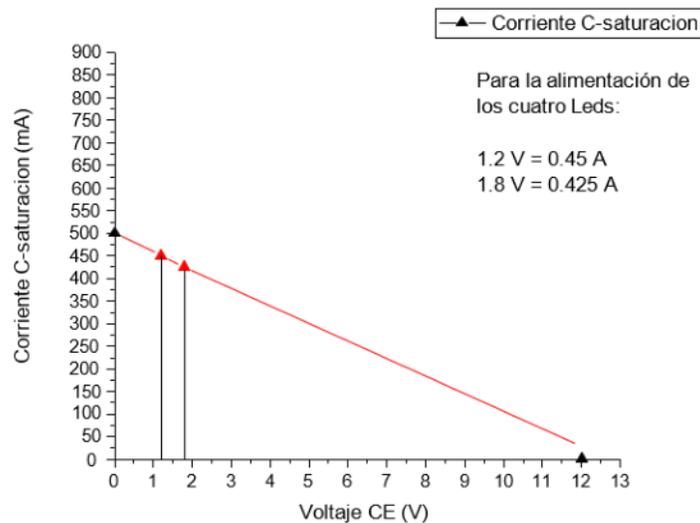


Figura 24. Gráfica de saturación de corriente de leds infrarrojos.

Un led infrarrojo tiene un consumo en potencia de $0.185 Watts$, por lo que el conjunto de 4 leds infrarrojos consume $0.74 W$ aproximadamente.

En la simulación se obtuvo lo siguiente:

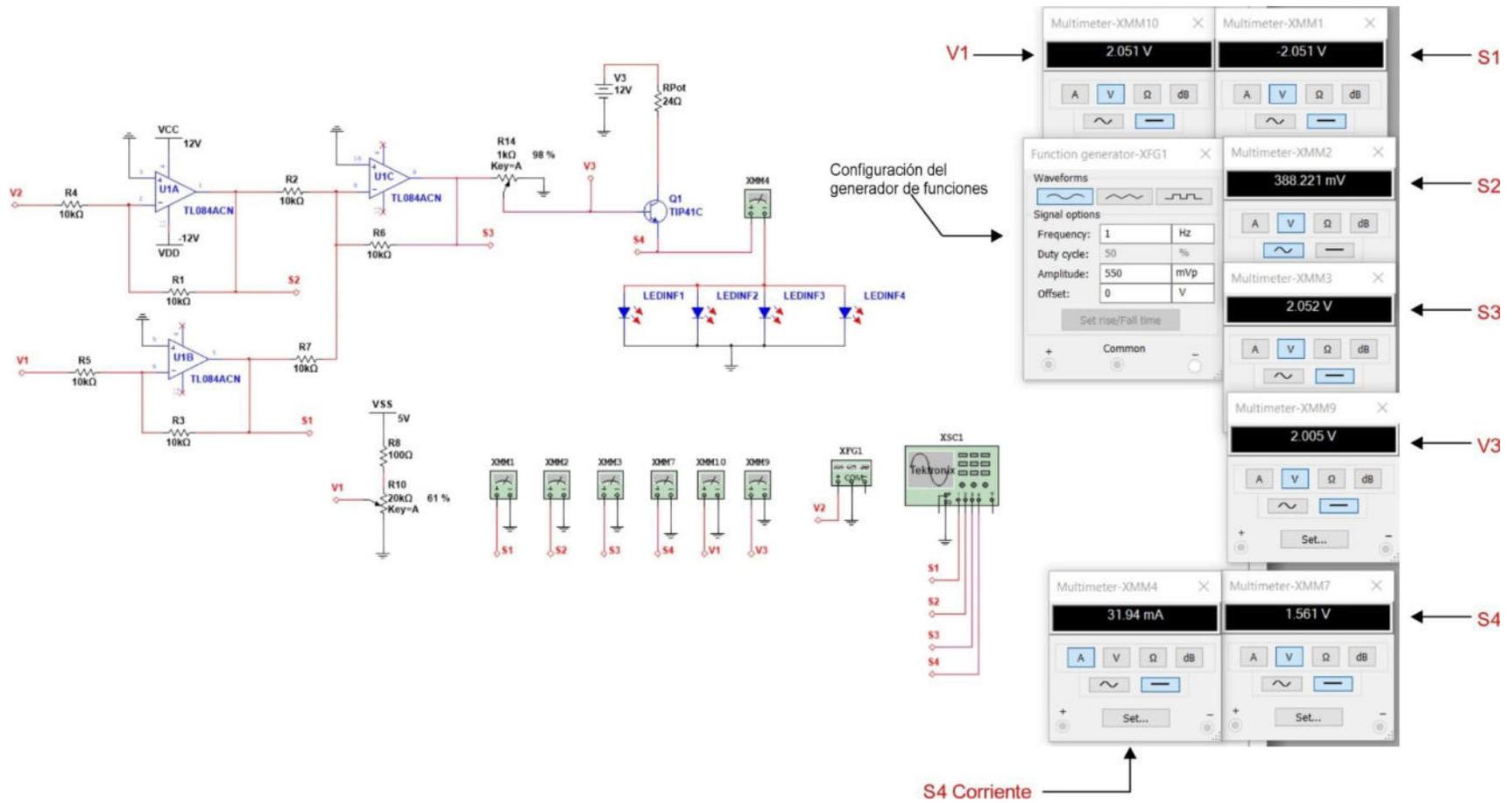


Figura 25. Simulación de comportamiento de la fuente moduladora de luz.

Nota: En la simulación se utilizaron los leds rojos del simulador que consumen 20 mA cada uno, por lo que los valores de corriente no corresponden a los valores reales del led infrarrojo a utilizar.

Con respecto a el comportamiento de las señales, se tiene como resultado

El valor de $S_1 = -2 V$, correspondiente a la señal de color amarillo.

El valor de $S_2 = -0.388 V$

El valor de $S_3 = 2.388 V$ con un $V_{pp} = 0.550 V$.

El valor de $S_4 = 1.24 V_{min} - 1.86 V_{max}$

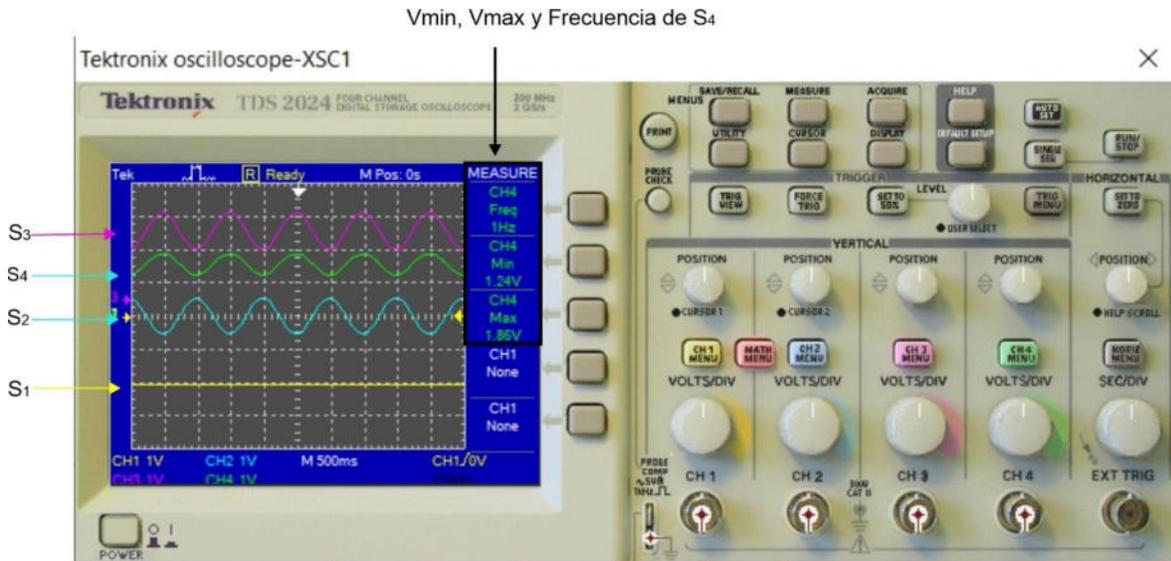


Figura 26. Simulación de señal de salida de fuente moduladora de luz (S_4).

4.4 DISEÑO ESQUEMATICO DE LA PLACA PARA LA FUENTE MODULADORA DE LUZ

Habiendo hecho la simulación y pruebas de componentes para determinar el rango de voltaje con el que trabajaran los leds infrarrojos, su circuito de acondicionamiento de señal para que varíe desde baja potencia hasta máxima potencia, en este caso, el sumador y la etapa de potencia, por medio de un transistor en configuración colector común, para conseguir los $100 mA$ necesarios para alcanzar los $850 nm$ de ancho de banda. Se prosiguió con la etapa de diseño y manufactura de la placa de control de la fuente moduladora de luz.

En la Figura 27 se muestra el esquemático desarrollado en el programa Altium Designer para el diseño de la tarjeta de control de la fuente moduladora de luz, para proporcionar el rango de voltaje ($1.25 V - 1.85 V$) controlado con amplificadores operacionales $TL084$ en su configuración de sumador. Los OPAMs están alimentados por medio de una fuente simétrica de $\pm 12 V_{cc}$, la señal S_1

esta alimentada mediante una fuente regulable de $0 - 5 V_{cc}$. La señal S_2 será la entrada del generador de funciones o para conectar directamente el amplificador lock-in.

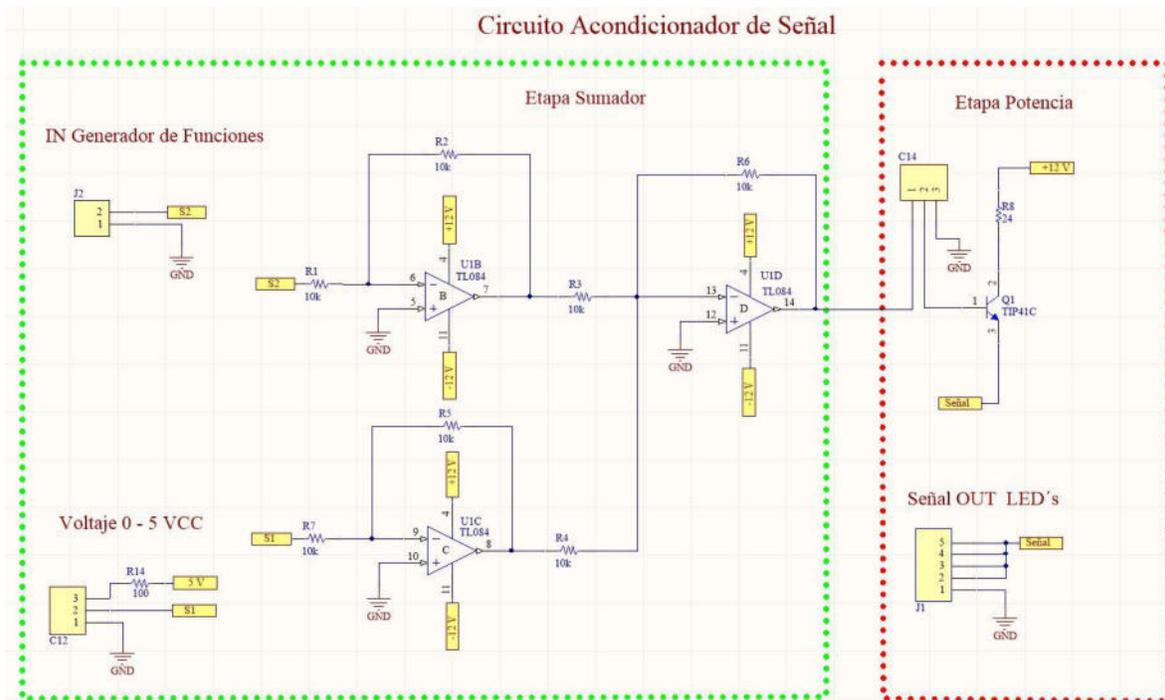


Figura 27. Esquemático de la fuente moduladora de luz.

En la etapa de potencia se tiene un potenciómetro que regula el voltaje de entrada que va directamente a la base del transistor, esto es debido a que el voltaje que se consume entre la base y el emisor es de alrededor de $0.7 V_{cc}$ según el fabricante, con lo que se necesita ajustar el voltaje de entrada para tener una señal de salida con las características deseadas. El transistor utilizado es el *TIP41C*, el cual es un transistor de potencia que soporta $6 A$, el modo de conexión está configurado en colector común, debido a que tiene una alta ganancia en corriente. La señal de salida está directamente conectada al emisor, la cual va a una salida para la posterior conexión de los leds infrarrojos.

4.5 MANUFACTURA DE PLACA DE CONTROL DE FUENTE MODULADORA DE LUZ

Teniendo los cálculos para la elección de componentes, la simulación de comportamiento en conjunto, la posterior comprobación de funcionamiento de cada elemento, el diseño esquemático, se continuo con la elaboración de la placa moduladora de luz que se muestra en la Figura 28.

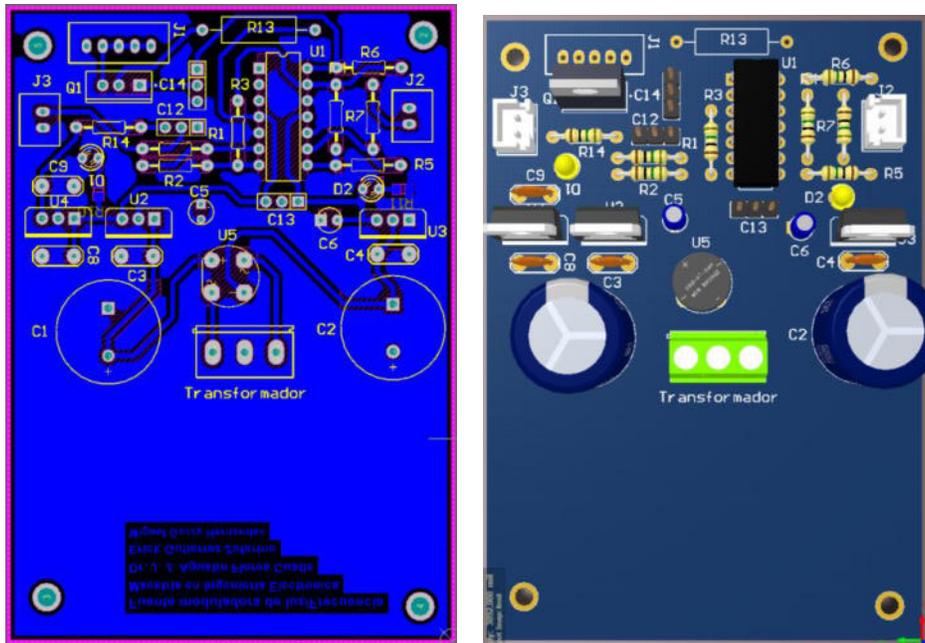


Figura 28. Diagrama PCB de Fuente Moduladora de LUZ/FRECUENCIA.

Esta placa está diseñada para alcanzar una corriente de 500 mA o más ajustando algunos componentes, alcanzar valores de voltaje de $0 - 5\text{ Vcc}$, por ello, se considera funcional para satisfacer las necesidades planteadas anteriormente.

4.5.1 PLACA DE LEDS

Con los cálculos de corriente y voltaje necesarios para la alimentación de los leds infrarrojos, se prosiguió con la elaboración de la placa de estos. La placa elaborada tiene unas dimensiones de $16 \times 17\text{ mm}$, esta no contiene ninguna resistencia de ningún tipo, debido a que en la fuente moduladora de luz se puede controlar el voltaje suministrado.

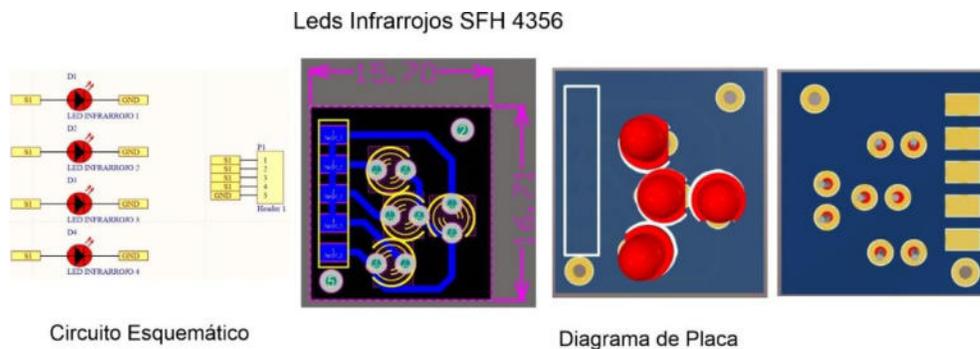


Figura 29. Esquemático y PCB de placa de leds.

La placa de leds infrarrojos se coloca en la ranura predispuesta en uno de los acoples de la celda de medición (como se muestra en la Figura 30). Una vez ubicados los leds a una altura específica, y habiendo sellado y atornillado la parte inferior de la placa para prevenir cortos circuitos debido la sudoración del aluminio ocasionado por el cambio de temperatura. El paso siguiente es montarla a la celda.

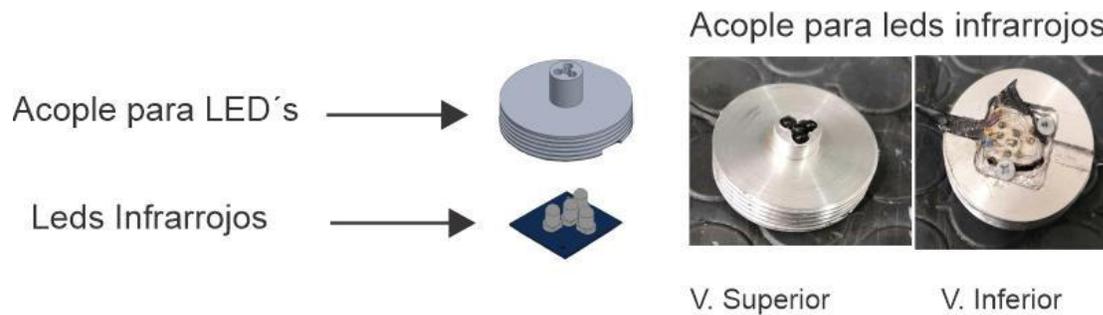


Figura 30. Instalación de la placa de leds en acople de celda de medición.

Para finalizar con la parte de la fuente de modulación de luz, se continuo con su acondicionamiento dentro de un gabinete, el cual tiene una entrada destinada para el generador de funciones o el amplificador lock-in. Una salida que está conectada directamente a la placa de los leds infrarrojos por la que se envía la señal de salida y una salida extra para la alimentación de 5 Vc.

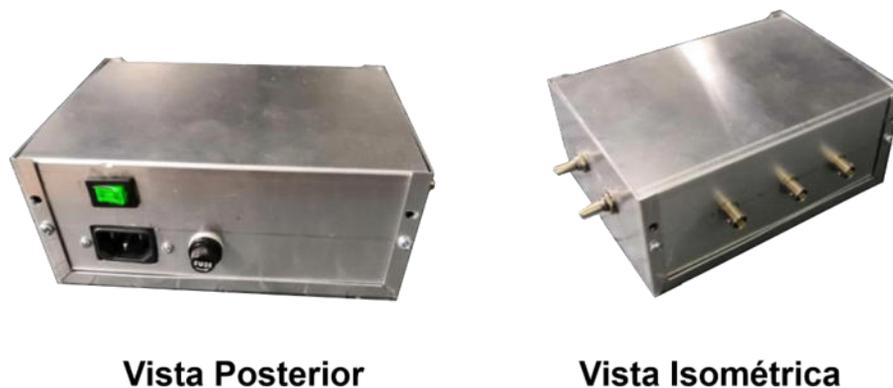


Figura 31. Gabinete de fuente moduladora de luz.

4.6 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA FUENTE MODULADORA DE LUZ

La fuente de modulación de luz estará conectada a la celda de medición y a un amplificador lock-in que es el encargado de enviar la frecuencia con la que se modula la iluminación de los leds.

El amplificador lock-in es un instrumento que puede generar señales de un alto grado de limpieza y alta resolución en el orden de su magnitud y frecuencia. Esto hace que sea el instrumento favorito

para la estimulación de la fuente moduladora de luz. El amplificador tiene otra función primordial para la obtención de la efusividad térmica.

Los elementos con los cuales se realizó la comprobación del funcionamiento de la fuente moduladora de luz fueron mediante el uso de un generador de funciones como fuente de modulación para los leds infrarrojos (onda cuadrada) y un osciloscopio para la visualización de las señales excitadas. El esquema de conexión de dichos elementos se muestre en la Figura 32

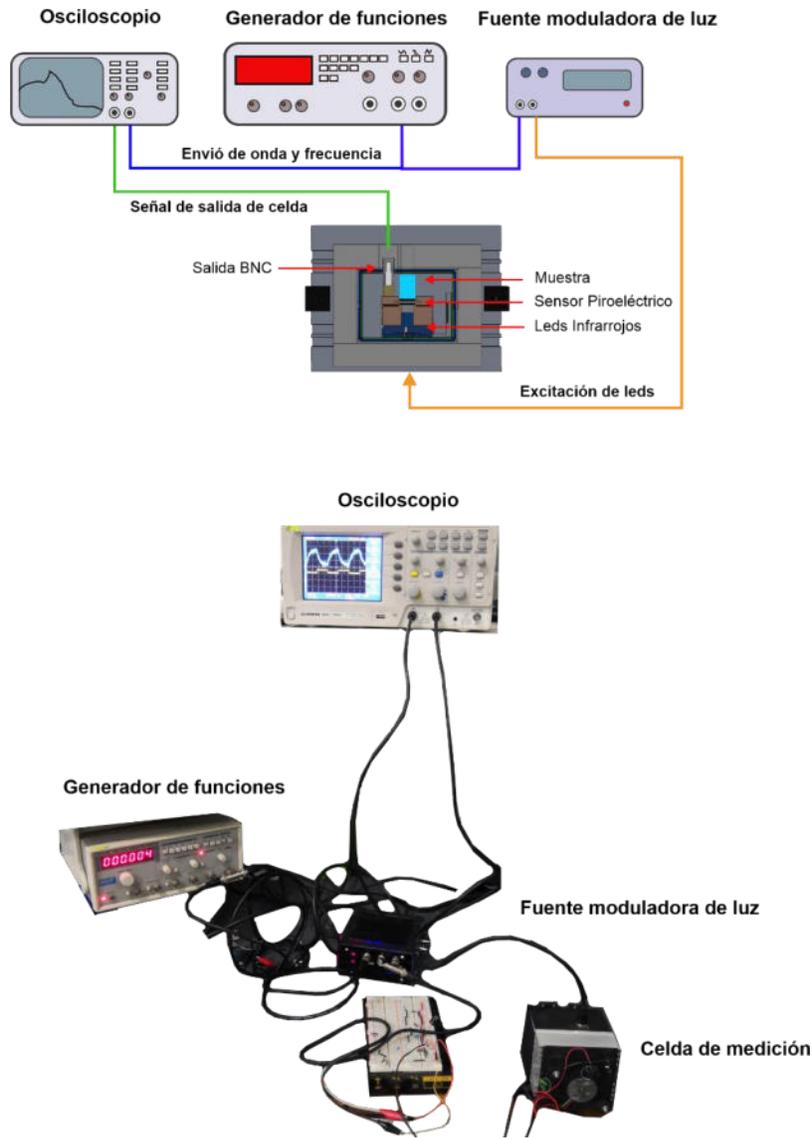


Figura 32. Esquema de conexión de fuente moduladora de luz, generador de funciones y celda de medición.

Las señales captadas con el uso de este arreglo tuvieron una buena aceptación en la similitud de la frecuencia de excitación inicial a la de la señal de salida del sensor piroeléctrico. Con esta prueba se comprobaron los rangos de oscilación a los que estarán trabajando los leds infrarrojos y la buena absorción de luz/calor del sensor piroeléctrico.

CAPITULO V DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

5.1 RESUMEN DEL CAPITULO

En este capítulo se realizó la instrumentación electrónica del ambiente controlado mediante un control PID de temperatura en dos modos de operación: enfriamiento y calentamiento. Para esto, se implementó el microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 implantado en una tarjeta Arduino (Arduino Due), el puente H de potencia VNH5019a, el sensor de temperatura ADT7420 y una Celda Peltier, utilizada para el aumento o descenso de la temperatura. En la Figura 33 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del ambiente controlado.

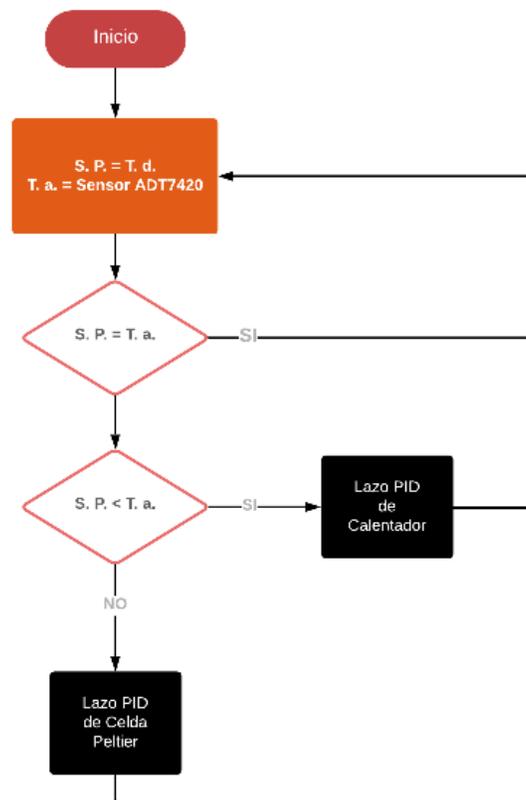


Figura 33. Diagrama de flujo del funcionamiento del control PID de temperatura.

5.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Para tener una alta precisión en el control de temperatura, se optó por la comparación en la medición en tiempo real de tres dispositivos: el sensor de temperatura TMP75; el sensor de

temperatura ADT7420 y como instrumento patrón el multímetro FLUKE (modelo 724, TEMPERATURE CALIBRATOR). Las características de estos dispositivos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de dispositivos medidores de temperatura.

	Sensor de temperatura TMP75	Sensor de temperatura ADT7420	Multímetro FLUKE (modelo 724, TEMPERATURE CALIBRATOR)
Comunicación	<i>I²C</i>	<i>I²C</i>	Contacto PT100
Resolución	Modificable 9 to 12 bits (0.0625 °C)	16 bits 0.0078 °C	0.1 °C
Rango de temperatura	-40 °C to + 125 °C	-40 °C to + 150 °C	-10 °C to 55 °C
Rango de voltaje	2.7 V to 5.5 V	2.7 V to 5.5 V	9 V
Direcciones	8	8	-
Tecnología de montaje	SMD 8 Pin (MSOP)	SMD 16 Pin (LFCSP)	De contacto
Calibración	De fábrica	De fábrica	De fabrica

Para determinar que sensor se utilizara para el ambiente controlado, se hizo una prueba de medición de temperatura, en donde, se utilizó un ventilador como variador de temperatura para realizar la comparación de mediciones entre el multímetro FLUKE y los dos sensores de temperatura (TMP75 y el ADT7420).

Los dispositivos fueron colocados uno encima del otro, de tal manera que no existiese una variación importante provocada por la separación entre ellos. Las mediciones se tomaron conjuntamente en un lapso de un minuto por cada dispositivo, tomando como dispositivo patrón el multímetro FLUKE.



Figura 34. Comparación de sensores de temperatura (TMP75, ADT7420 y Multímetro FLUKE)

Las gráficas resultantes de las pruebas fueron las siguientes:

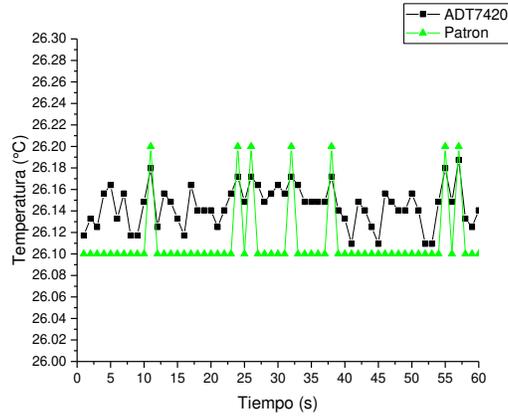


Figura 35. Gráfica de sensor de temperatura ADT7420 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).

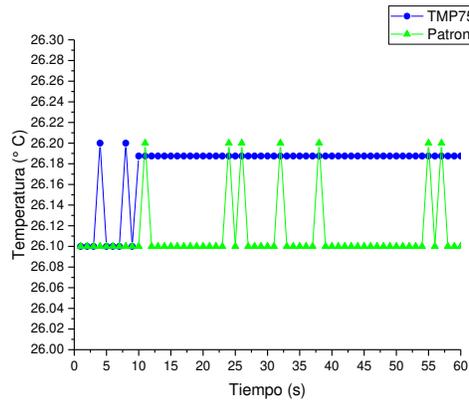


Figura 36. Gráfica de sensor de temperatura TMP75 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).

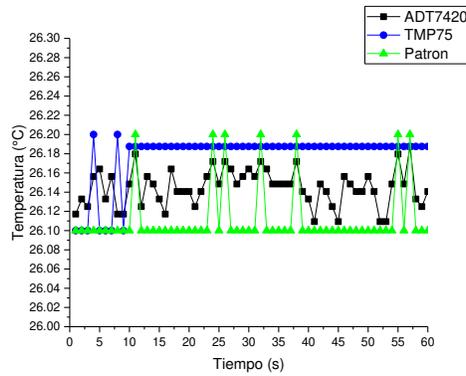


Figura 37. Gráfica de sensores de temperatura TMP75, ADT7420 y Multímetro Fluke (Temperature Calibrator 724).

Se puede decir que la diferencia entre el instrumento patrón y los sensores es hasta de $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo, debido a que el multímetro FLUKE solo puede indicar 1 decimal, podemos concluir que la temperatura obtenida por medio de nuestros sensores es igual a la del instrumento patrón con un rango de incertidumbre de $\pm 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero por lo visto en las gráficas, los valores de los dos sensores se asemejan a los del multímetro.

Habiendo observado las respuestas de las gráficas anteriores, se determinó la elección del sensor de temperatura ADT7420 para utilizarlo en el control PID de temperatura del ambiente controlado.

5.3 ELECTRÓNICA DE CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA

El rango de temperatura que se desea controlar es de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediante un control PID en dos modos de operación: enfriamiento y calentamiento. Los elementos a utilizar para lograr el control son los siguientes:

- Arduino Due: Microcontrolador
- Celda Peltier *TEC1 – 12706*
- Puente H de potencia *VNH5019a*
- Sensor de temperatura *ADT7420*

Se eligió el Arduino Due debido a su alta resolución de 16 bits con lo que da un mayor rango de control de señales tipo PWM (Modulación por ancho de pulso o por sus siglas en inglés: Pulse Width Modulation). Otra ventaja es su cantidad de pines disponibles; digitales, analógicos y con salida PWM.

Tabla 6. Elementos electrónicos para el control PID de temperatura.

Arduino Due	Celda Peltier <i>TEC1 – 12706</i>	Puente H de potencia <i>VNH5019a</i>	Sensor de temperatura <i>ADT7420</i>
Microcontrolador <i>AT91SAM3X8E</i>			Tipo de comunicación I^2C
Voltaje de operación 3.3 V	Voltaje de operación 12 V	Voltaje de operación $5.5 - 24\text{ V}$	Resolución 16 bits $0.0078\text{ }^{\circ}\text{C}$
54 pines I/O (12 con salida PWM)	Diferencia de temperatura (ΔT) de entre $66 - 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un rango de $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ de diferencia máximo que debe de existir entre	Max frecuencia de PWM 20 KHz	Rango de medición de temperatura

	el lado caliente y el lado frío para su correcto funcionamiento		$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$
16 pines analógicos			Voltaje de operación 2.7 V to 5.5 V
Corriente por pin de 5 V = 800 mA	Corriente de operación 4.5 A	Corriente de 12 A continua (30 A máximos)	8
32 bits de resolución			SMD 16 Pin (LFCSP)
			Calibración de fábrica

Tomando en cuenta que se tienen diferentes voltajes de operación de cada dispositivo, se optó por el diseño y construcción de una cámara de control, que cumpliera con las siguientes características:

1. Suministro de voltaje requerido para cada dispositivo (ventilador de ambiente controlado, ventilador de cámara de control de temperatura, celda Peltier, sensor de temperatura y Arduino Due) para su funcionamiento, de igual manera se disponga de la corriente necesaria para poder utilizar la Celda Peltier constantemente.
2. Tuviera una pantalla en donde se mostrará la medición de temperatura en tiempo real en la que se observe el aumento o la disminución de esta. Se mostrará el SETPOINT (temperatura de referencia) al que el actuador trabajara hasta que el sensor de temperatura mande la señal de que se ha llegado. Y, por último, se apreciará el valor PID al que se está trabajando en tiempo real.
3. Un SETPOINT ajustable.
4. Una terminal para conectar el sensor de temperatura.
5. Una terminal para la conexión de la celda Peltier
6. Un reset.
7. Un botón general de encendido/apagado.
8. Leds indicadores de encendido, modo PID enfriamiento y modo PID Calentamiento.
9. funcionamiento sin la necesidad de estar conectada una computadora.
10. Una salida para su programación.
11. Fácil montaje y desmontaje para mantenimiento y/o reparación.
12. Ergonómica

Doce características requeridas para hacer un ambiente controlado, eficiente, resistente a fallas, de fácil uso, y con un control PID de precisión para el aumento o disminución de temperatura.

5.3.1 SIMULACIÓN, DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PLACA DE POTENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL PID DE TEMPERATURA.

Para llegar a lo anterior, primero se inició con las pruebas utilizando el método clásico, empezando por la simulación del funcionamiento de la fuente que proporcionaría la alimentación para la elda Peltier, ventiladores, etc. En la Tabla 7 se describen los elementos que conforman el diseño de la placa de potencia, y en la 0 los dispositivos que estarán alimentados directamente de la placa de potencia

Tabla 7. Elementos de la placa de potencia.

Cantidad	Elemento	Corriente nominal	Voltaje de operación
1	Transformador de potencia	10 A	110 VCA Primario 12 a 16 VCA Secundario
1	Puente de diodos de potencia D25XB	25 A	100 – 800 VCD
1	Fuente regulable a 5 VCD con el LM7805	1.5 A	Entrada: 7 a 25 VCD Salida: 5 VCD
1	Capacitor 4500 μF		0 a 35 VCD
2	Circuito de Optoacoplamiento para alimentación de ventiladores con el opto PC816	50 mA	Entrada 5 VCD Salida 5 a 70VCD

Tabla 8. Dispositivos conectados a la placa de potencia.

Dispositivo	Voltaje de operación	Corriente de operación
Celda Peltier	12 – 16 V	4.5 – 6 A
Arduino Due	5 – 12 V	800 mA
Ventilador (Cámara de control de temperatura y Ambiente controlado).	12 V	1.2 A
Puente H de potencia VNH5019a	5.5 – 24 V	12 A continua (30 A máximos)
	Rango de voltaje: 5 – 12 V	Suma de corriente consumida total: 6.5 A \pm 500 mA

Sumando las corrientes de operación de cada dispositivo, se tiene como resultado un consumo de $6.5 A \pm 500 mA$ total, por lo anterior se seleccionó un transformador cuyas características de salidas y de potencia, cumplieran con el consumo de energía que requiere cada dispositivo, utilizando un transformador cuya salida de la bobina secundaria es de $12 VCA$ con una corriente de $10 A$.

Al término de este paso, se continuo con la elaboración de su placa en donde se inicio con el esquemático de la que seria la placa de potencia de la camara de control de temperatura. Dicha placa tendra las conexiones de salida del transformador, una seccion de regulacion a $5 VCD$ para la alimentación de la etapa de control, una seccion de regulacion a $12 VCD$ para la alimentacion de los ventiladores y una salida directa en VCD para la conexión con el puente H.

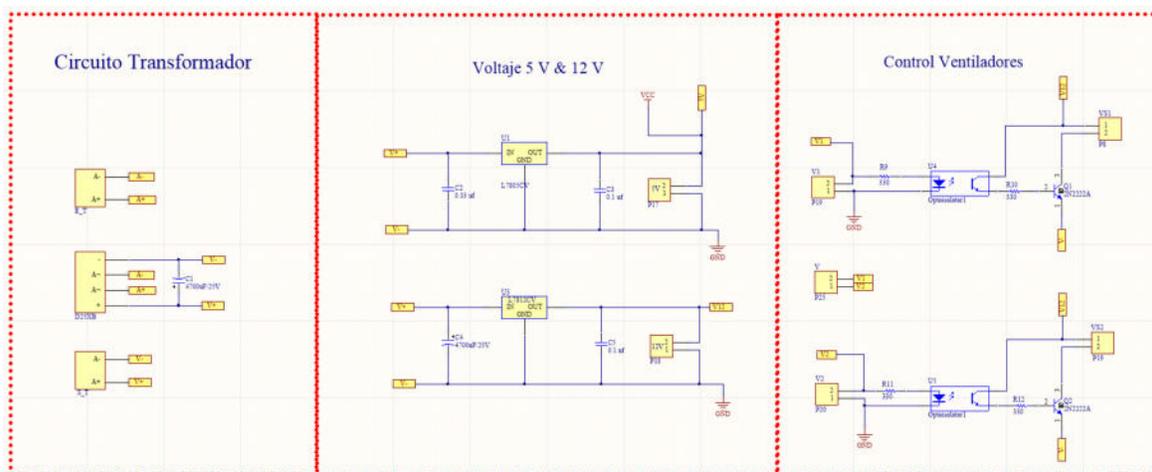


Figura 38. Esquemático de la etapa de potencia de la cámara de control de temperatura.

El paso siguiente fue la elaboración del ruteado y consecuentemente el maquilado de la placa de potencia. Para la cual, en la sección de alimentación del puente H, tendría un ruteado con un grosor de $5 mm$ para evitar sobrecalentamientos en la placa y/o ruptura de algunas de las pistas por el alto consumo de corriente. Para las demás opciones se selección un grosor $1.5 mm$.



Figura 39. Elaboración de ruteado y maquilado de placa de potencia.

5.3.2 PRUEBA DE CONTROL DE TEMPERATURA A POTENCIA CONSTANTE.

Con la elaboración de la placa de potencia se comenzó con las pruebas de enfriamiento y calentamiento directo sin ningún tipo de control, lo anterior con la finalidad de obtener una base de datos de la medición de la temperatura, para el inicio de la sintonización del control PID de temperatura. Se realizó la medición de la temperatura conectando directamente la celda Peltier en su configuración de enfriamiento por un tiempo de 20 minutos. Los valores obtenidos se muestran en la Figura 40.

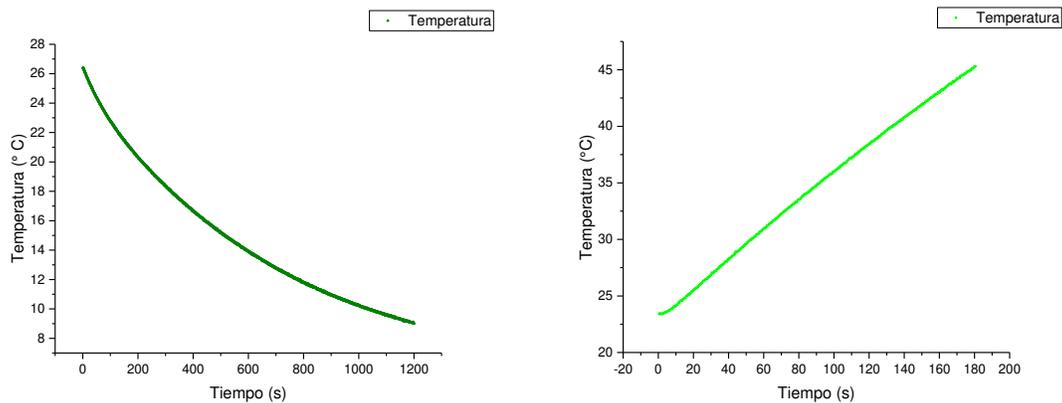


Figura 40. Gráficas de enfriamiento y calentamiento, respectivamente, de la celda de medición en potencia directa.

En la gráfica anterior se puede observar que la temperatura a la cual se quiere descender puede ser alcanzada en potencia directa desde una temperatura ambiente de $26.429\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es el objetivo, en un tiempo de $1000\text{ s} = 16.66\text{ min}$. La medición de la temperatura en configuración de

enfriamiento se interrumpe a los 20 *min*, dando como resultado una temperatura final en la celda de medición de 8.968 °C.

En el caso de la configuración de la celda Peltier en modo calentamiento, la temperatura a la cual se quiere aumentar puede ser alcanzada en potencia directa desde una temperatura ambiente de 23.414 °C a 40 °C, se cumple en un tiempo de 134 s = 2.23 *min*. La medición de la temperatura en configuración de calentamiento se interrumpe a los 3 *min*, dando como resultado una temperatura final en la celda de medición de 45.273 °C

5.4 SINTONIZACION DEL CONTROL PID DE TEMPERATURA UTILIZANDO MATLAB

EL tipo de sistema que se selecciono es el mas viable y recomendado para el caso de un control de temperatura, este tipo de sistema es llamado control con realimentacion o tambien control en lazo cerrado, en la Figura 41 se ilustra el diagrama de bloques representativo de dicho sistema, con el cual se muestra el funcionamiento de las diferentes partes que conforman el control PID.

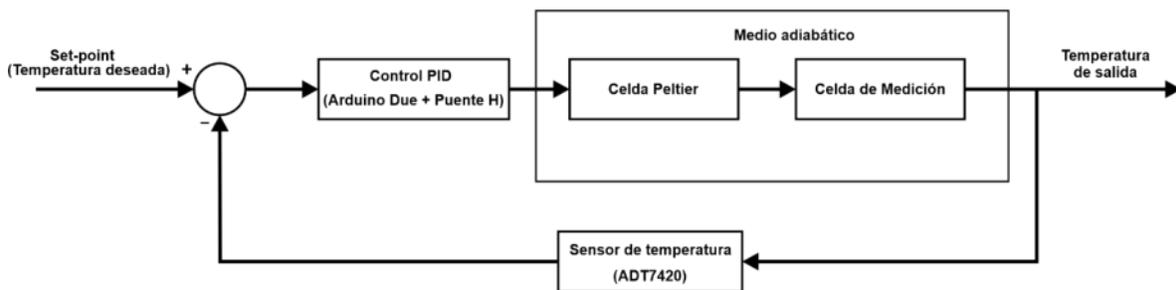


Figura 41. Diagrama de bloques del control PID de temperatura.

Con el fin de lograr una alta precisión en la sintonización del control PID de temperatura, se tomaron como referencia los datos obtenidos de la celda Peltier en modo enfriamiento. Con una base de datos solida se prosigue con la sintonización del control PID utilizando el software MATLAB.

En el espacio de *Workspace* se colocan dos columnas de datos, una llamada tiempo y otra temperatura. Se capturaron 2400 datos de medición que corresponden a los 1200 *segundos*. Una vez ordenados se escribe en la columna de comandos (*Command Window*), “*systemIdentification*” mostrada en la Figura 42, este comando permite construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos utilizando mediciones de señales de entrada y de salida. Para este caso, la señal de salida es la temperatura y el dominio está en función del tiempo.

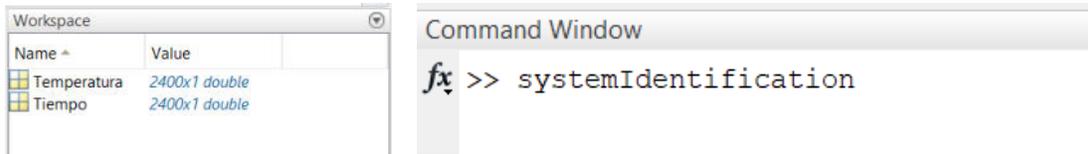


Figura 42. Configuración de datos de entrada en el software MATLAB, utilizando el comando "systemIdentification".

El comando "systemIdentification" arroja su toolbox que proporciona técnicas de identificación de sistemas como máxima verosimilitud, minimización de errores de predicción e identificación de sistemas sub-espaciales. Utilizando este comando se puede identificar el tipo de sistema a partir de los datos medidos y posteriormente predecir el comportamiento que tendrá la temperatura con respecto al tiempo. En la Figura 43 se muestran los datos y variables a ingresar para el procesamiento de datos.

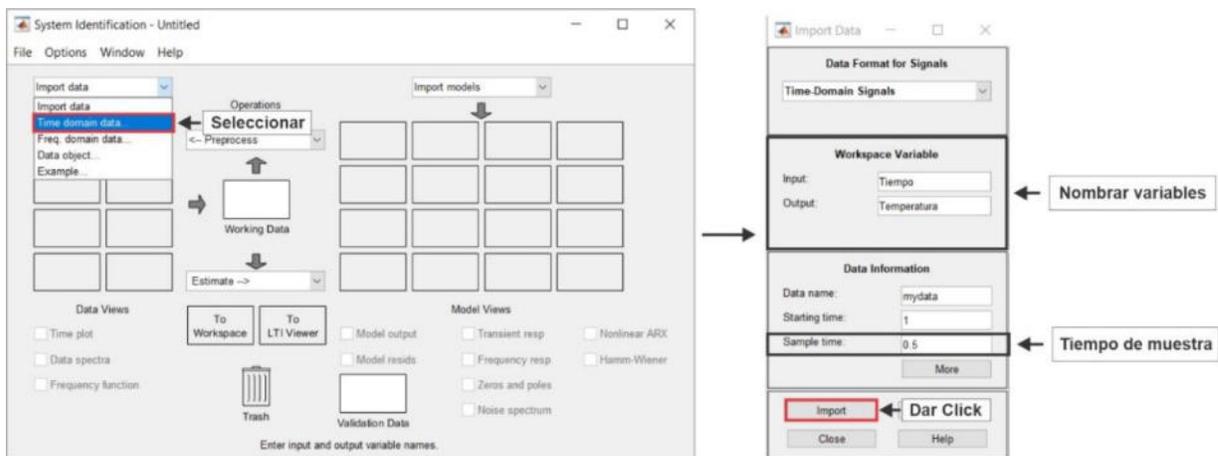


Figura 43. Toolbox del comando systemIdentification. Se seleccionan las variables de entrada y salida.

El tiempo de muestreo que se utilizo es de 0.5 s por captura de temperatura. Una vez nombrando las variables y modificando el tiempo de muestreo se da click en "Import", esto importara los datos de entrada (tiempo) y salida (temperatura) en forma de gráfica, que se ubicara en uno de los espacios del apartado "Import data". El siguiente paso es trabajar con los datos de la gráfica dando click en el apartado "Estimate" y después seleccionando "Process Models". Esto redirigirá a la ventana en donde se realizará el modelado de proceso de estimación mediante la función de transferencia de primer orden:

Ecuación 19.
$$\frac{K}{(1+Tp1 s)}$$

En la ventana de *Process Models* se visualizarán los tipos de variables K y Tp1, su valor (*Value*), su estimación inicial que será automático (*Initial Guess*) y el límite (*Bounds*).

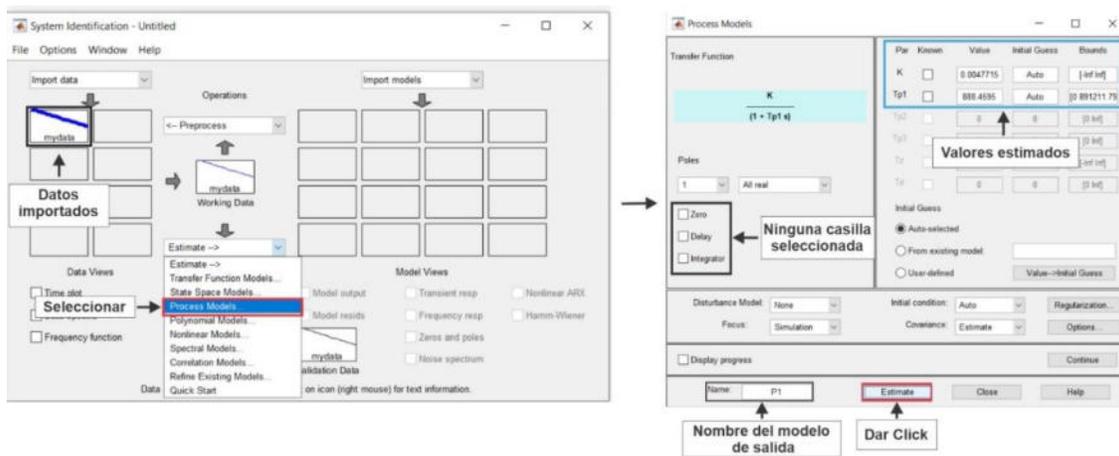


Figura 44. Proceso de modelación para la estimación de variables de entrada mediante la ventana “*Process Models*”.

Al darle click en “*Estimate*” en la ventana de “*Process Models*” automáticamente se importa el modelo a la ventana de *System Identification* en donde se guarda con el nombre de P1. Hasta este paso ya es posible ver la estimación que genera el software MATLAB de la lectura de datos ingresados, esta estimación se ve en forma gráfica en la ventana “*Model output*”. El porcentaje del grado de similitud que arroja el modelo procesado es del 96.73%, lo cual representa un alto grado de precisión en la comparación de las dos graficas.

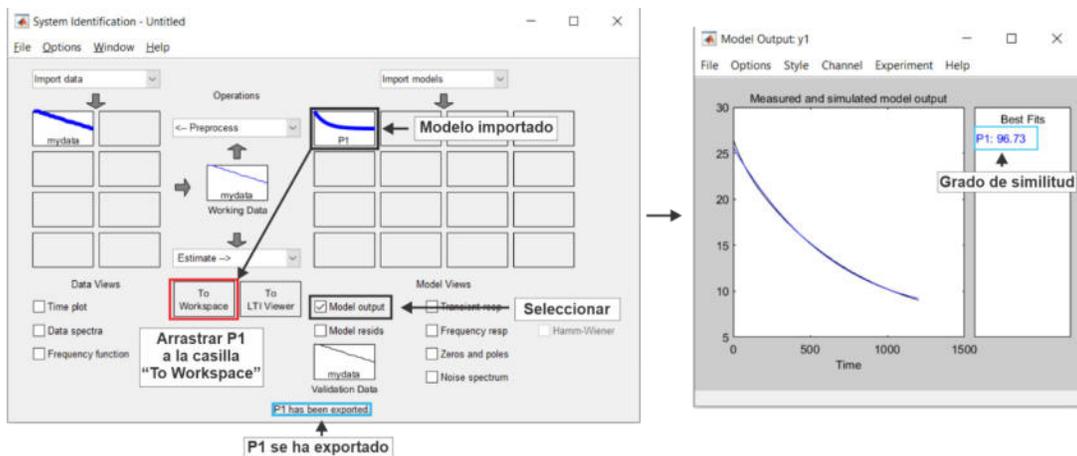


Figura 45. Modelo importado y grado de similitud de la modelación del sistema.

El paso siguiente es obtener los valores de la función de transferencia guarda con el nombre "P1" anotando los comandos correspondientes en la ventana de *Command Window* de Matlab.

```

Command Window
>> systemIdentification
>> G=tf(P1)

G =

From input "u1" to output "y1":
0.004771
-----
888.5 s + 1

Name: P1
Continuous-time transfer function.

fx >>
    
```

Figura 46. Función de transferencia del proceso de estimación de Matlab.

Función de transferencia de nuestra estimación:

Ecuación 20.
$$F.T. = \frac{0.004771}{888.5s+1}$$

Matlab tiene un comando para sintonizar un control en forma de Proporcional (P), Integral (I), Derivativo (D) o los tres juntos en un control PID, la respuesta de la función de transferencia obtenida, dicho comando tiene por nombre "pidtool". Este comando se escribe en la ventana de *Command Window* y se ejecuta, direccionando a su ventana de operaciones.

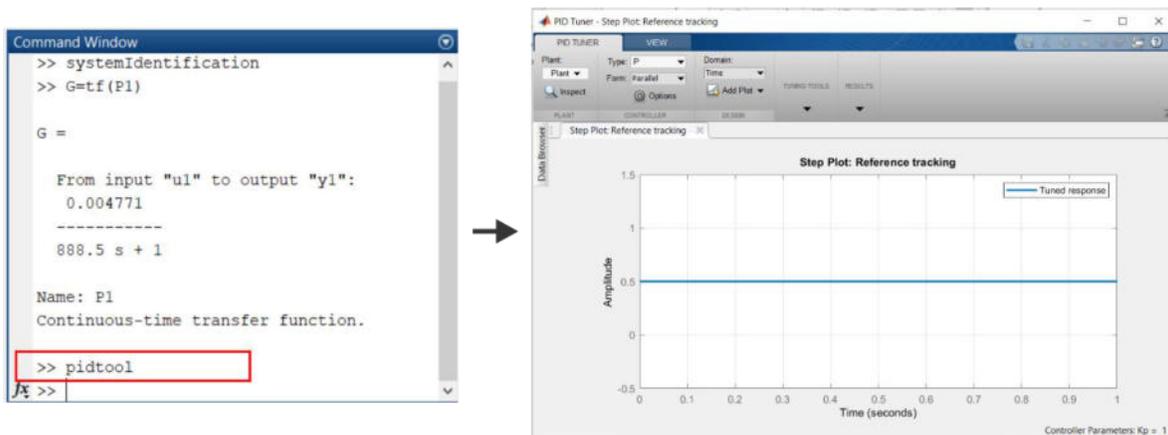


Figura 47. Herramienta "pidtool" de Matlab.

Una vez estando en la ventana de *PID Tuner* (sintonización de PID) se continúan con los pasos siguientes:

- Dar click en la opción *PID Tuner/Plant/Import*.

- Para este punto se seleccionará la letra G en donde están contenidos los datos de nuestra estimación.

Dar click en el tipo de control que se quiere obtener: *Type/PID*

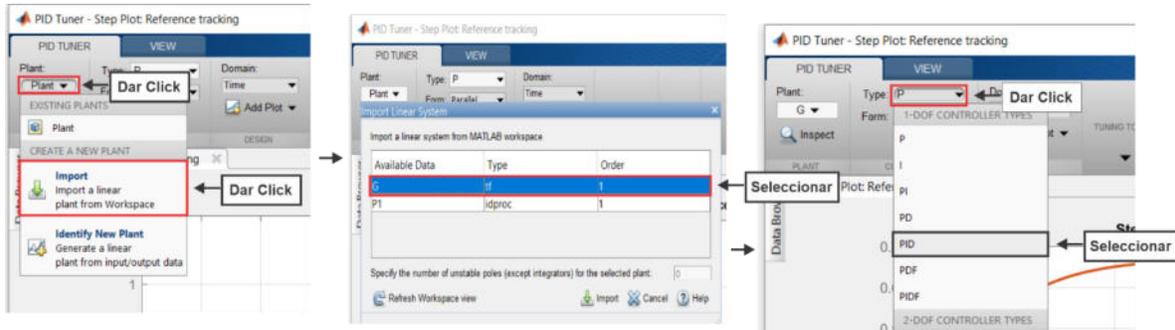


Figura 48. Pasos a seguir para la sintonización del control PID.

Al seleccionar el tipo de control que se decidió utilizar se mostró la ventana de simulación de la respuesta del control PID. Esta herramienta tiene la facilidad de poder hacer un ajuste del sistema haciendo que se obtenga una respuesta rápida o lenta, y/o un control agresivo o robusto. Debido a las características a las cuales estará dispuesto este control de temperatura se determinó que se ajustaran los valores a un tipo de control rápido (315.5) y agresivo (0.3), lo cual arrojó los parámetros de control siguientes: $K_p = 1099$, $K_i = 3.04$ y $K_d = 0$.

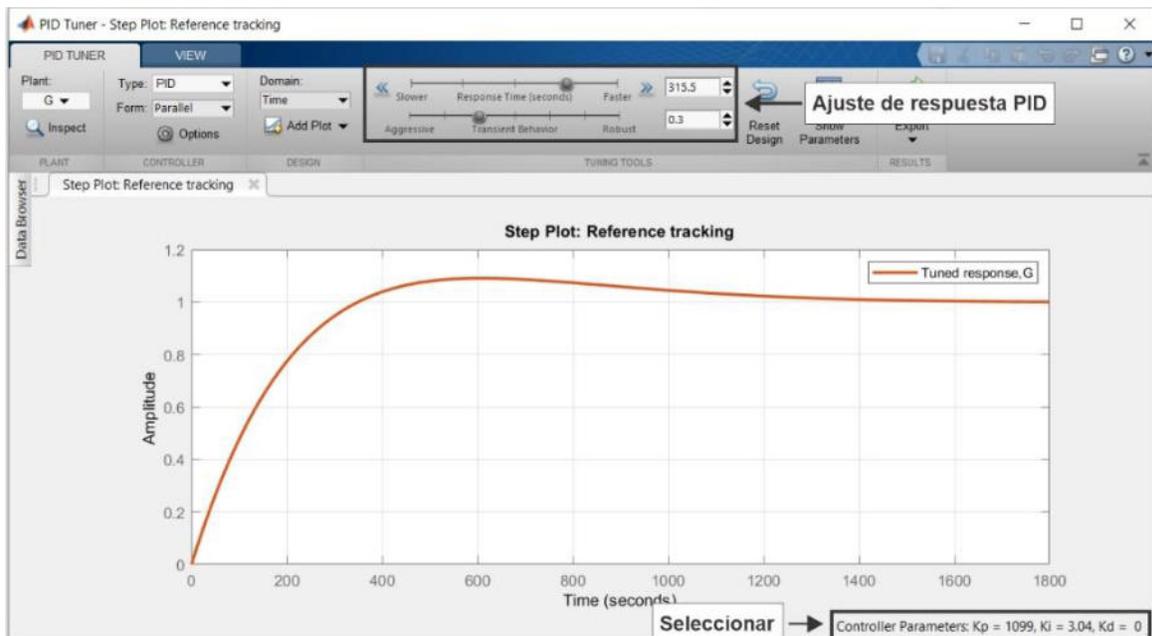


Figura 49. Ajuste de respuesta PID para selección de parámetros K_p , K_i y K_d .

Una de las razones por las que se eligió utilizar las herramientas de Matlab para la elaboración del control PID de temperatura, fue debido a su facilidad en el ajuste de los parámetros de control (K_p , K_i , K_d), haciendo posible determinar una respuesta de control lenta y robusta con una alta precisión y exactitud, o rápida y agresiva con el riesgo de que pueda ocurrir una inercia térmica al momento de la activación del control. Al tener acceso a este tipo de herramientas se hace un ajuste de respuesta PID de una manera rápida y sencilla. **Con el uso de la herramienta “*pidtool*” de Matlab, la variable de derivación del control PID, no se tomó en cuenta debido a que su valor era demasiado insignificante, por lo tanto, el sistema queda con un control PI.**

5.5 ETAPA DE PROGRAMACIÓN

Al tener los parámetros de control K_p , K_i y K_d , se siguió con el paso de la programación para la ejecución del control PID de temperatura. El software que se selecciono fue el entorno Arduino (programación en C).

Descripción de la programación: Este código está diseñado para el control PID de temperatura, utilizando una celda Peltier (TEC1-12706) como actuador y un sensor de temperatura ADT7420. Debido a la utilización de la celda Peltier se puede descender y aumentar la temperatura por medio del Puente H de potencia (VNH5019) que realiza el cambio de polaridad de la celda. Para el manejo del *setpoint* se utiliza un potenciómetro de precisión, el cual trabaja en un rango de 5° a 45° como valor mínimo y máximo respectivamente. El microcontrolador procesa los datos de los parámetros PID ingresados y mediante una pantalla LCD de 24x4 se visualizan en tiempo real los valores de Control PID ya sea que este en modo enfriamiento (led indicador azul) o calentamiento (led indicador rojo), valor de u (bits de resolución), el valor del *setpoint* establecido (la temperatura a alcanzar) y la temperatura medida en tiempo real. Este código funciona independientemente de la conexión con un PC.

5.6 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PLACA DE CONTROL (SHIEL ARDUINO DUE)

El cerebro del control PID de temperatura será el Arduino Due, del cual ya se vio anteriormente sus especificaciones técnicas. En la Figura 50 se indican los pines analógicos, digitales, PWM, de alimentación y pines de comunicación, que se utilizaran en la placa de control, cada uno de estos pines tendrá una función determinada.

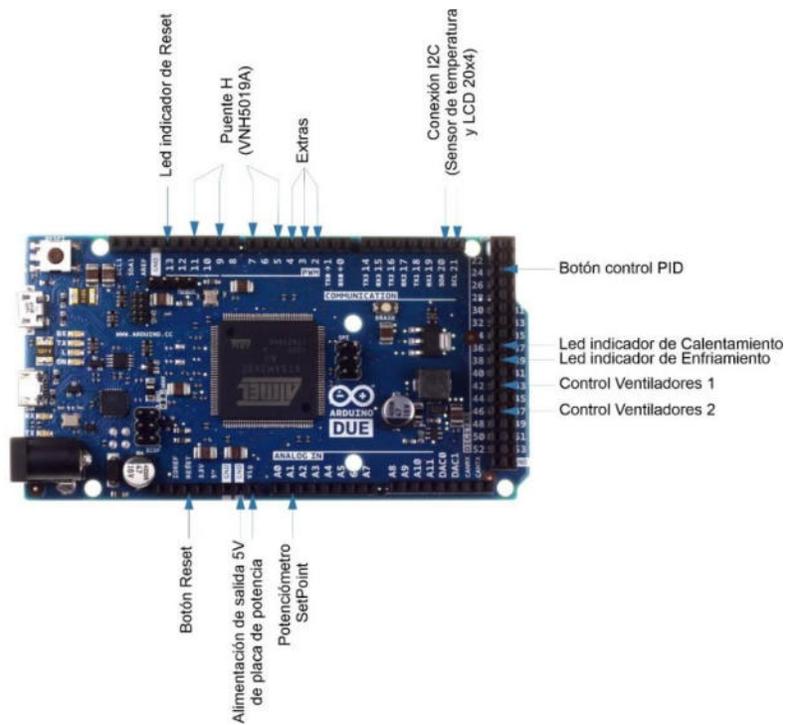


Figura 50. Arduino Due, Desglose de pines de control a utilizar.

Tomando como base el diseño del Arduino Due, se decidió elaborar un *shield* cuyo acoplamiento sea mediante la unión de pines macho, dicho *shield* tendrá el mismo diseño que la tarjeta Arduino Due, los pines se seleccionaron específicamente para unirse con los pines hembra del Arduino. Este *shield* contiene las salidas de control de los siguientes elementos: Puente H (*VNH5019A*); del sensor de temperatura (*ADT7420*); pantalla *LCD 20x4*; potenciómetro de precisión (*Setpoint*); botón reset; leds indicadores de reset, enfriamiento y calentamiento; perilla de control PID, extras.

Tabla 9. Ubicación de conexión de pines y dispositivos controlados por el Arduino Due.

Dispositivo	Pines	Tipo de salida y/o entrada
Puente H (<i>VNH5019A</i>)	<i>GND, VCC, 5, 7, 9 y 11</i>	<i>PWM</i>
Sensor de temperatura (<i>ADT7420</i>)	<i>GND, VCC, 20 y 21</i>	<i>SDA y SCL (I²C)</i>
Pantalla <i>LCD 20x4</i>	<i>GND, VCC, 20 y 21</i>	<i>SDA y SCL (I²C)</i>
Potenciómetro de precisión (<i>Setpoint</i>)	<i>GND, VCC, A1</i>	<i>Analógico</i>
botón reset	<i>GND y Reset</i>	<i>Reset</i>

Leds indicadores de reset, enfriamiento y calentamiento	<i>GND, 13, 36 y 38</i>	<i>Digitales</i>
Perilla de control PID	<i>GND y 24</i>	<i>Digitales</i>
Ventiladores	<i>GND, 42 y 46</i>	<i>Digitales</i>
Extras	<i>2, 3 y 4</i>	<i>PWM</i>

Una vez ubicando los pines a utilizar, se prosigió con el diseño del esquemático de la placa de control (Figura 51) en donde se muestra el arreglo de cada salida y entrada de pines de control. Al término del esquemático se continuo con la elaboración del PCB, ruteado y finalmente la construcción de la placa *shield* del control PID de temperatura (Figura 52).

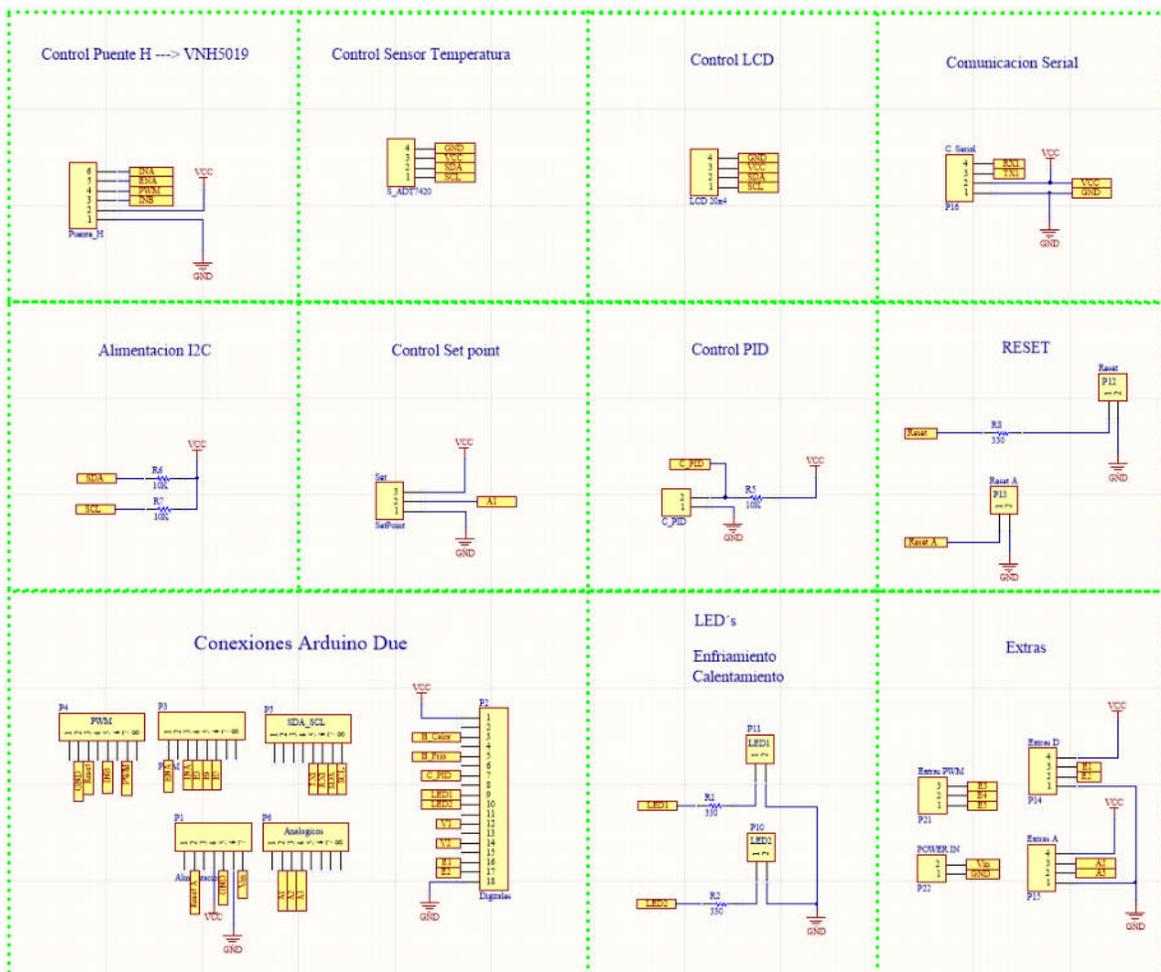


Figura 51. Esquemático de la etapa de control de la cámara de control PID de temperatura.

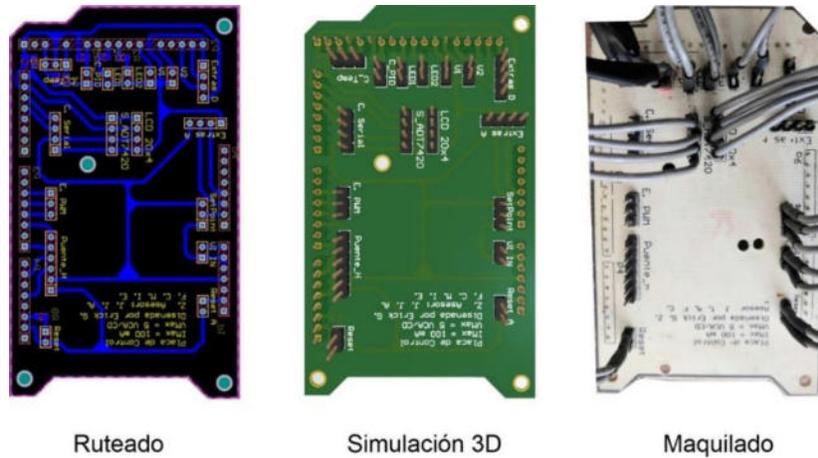


Figura 52. Ruteado y maquilado de placa de etapa de control de cámara de control PID de temperatura.

5.7 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE GABINETE DE CÁMARA DE CONTROL PID DE TEMPERATURA

Tomando como base las características planteadas de la cámara de control de temperatura, se continuo con el diseño de su gabinete, en cual se concentrarían todos sus elementos: Transformador, placa de potencia, placa de control *shield*, placa Arduino Due, puente H (VNH5019), pantalla LCD 20x4, control del *setpoint* de temperatura, etc.

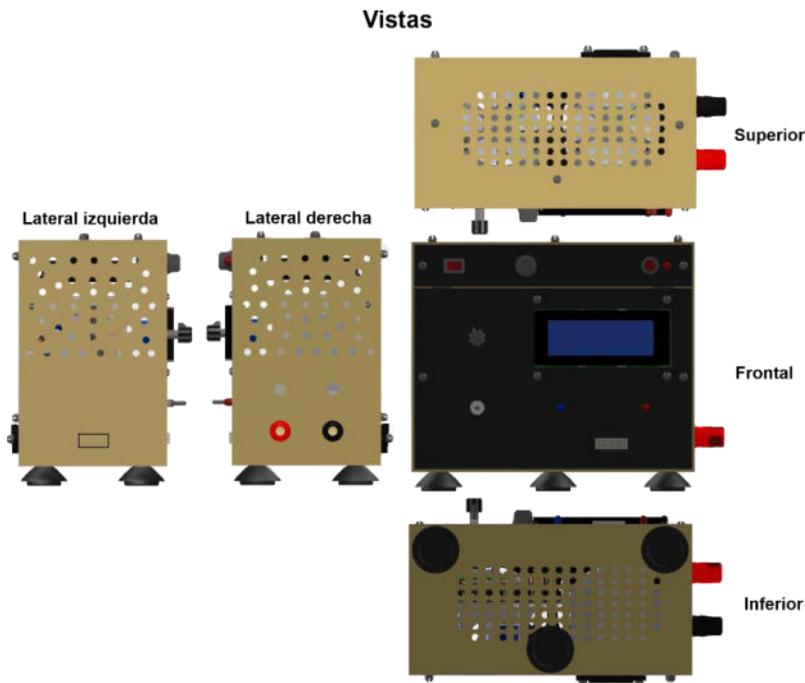


Figura 53. Diseño de la cámara de control de temperatura (vistas).

Después de elaborar el diseño del gabinete se prosiguió con su maquinación, para ello se llevaron a cabo los pasos siguientes:

- Perforado y corte de elementos. Dando forma a la estructura final.
- Limpieza, pulida y pintado de gabinete. Para evitar cualquier rebaba o malformación que pudiera dañar a las conexiones finales.
- Ubicación y puesta de componentes: Indicando los espacios que ocuparía cada elemento para que tuviera un orden ergonómico.
- Conexión de elementos: Se continuo con la conexión del transformador, conexión de la placa de potencia con la placa de control, el ensamble del Arduino Due con su *shield*, las conexiones con la pantalla LCD, el setpoint, conexión de ventiladores, soporte para ventiladores, etc.

El acabado de la cámara de control de temperatura fue el que se muestra en la figura siguiente:

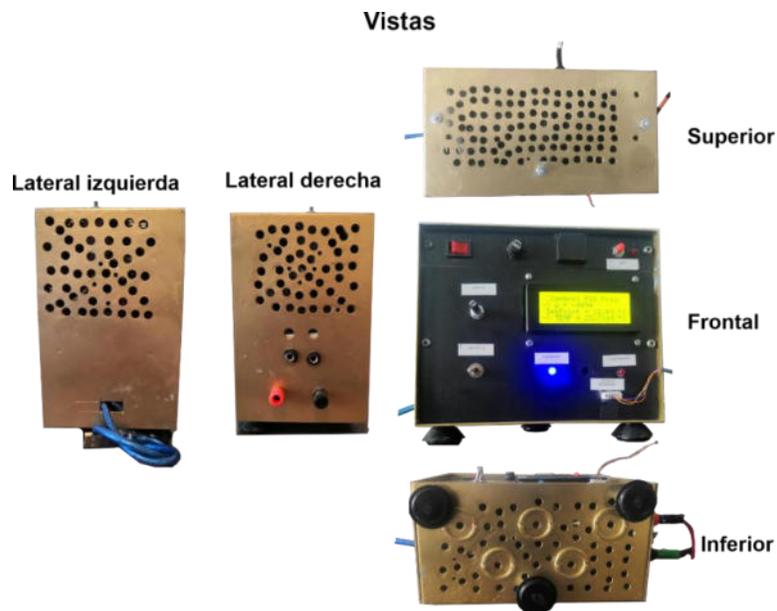




Figura 54. Vistas, acabado y elementos que conforman la cámara de control PID de temperatura.

El perforado de las paredes de la cámara de control de temperatura facilita la ventilación de todos los elementos, con la ayuda de dicha ventilación la cámara puede ser utilizada de forma continua por más de 6 horas. El diseño se realizó con una ergonomía especial en donde se aprovechará todo el espacio disponible, del mismo modo tiene un sistema de protección contra cortos circuitos y algo muy importante es su uso independiente de la conexión a un computador.

5.8 PRUEBAS DE CONTROL PID DE TEMPERATURA

La respuesta transitoria de un sistema de control practico exhibe con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estable. Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control para una entrada escalón unitario, se especifica lo siguiente:

- Tiempo de retardo (t_d): es el tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad de su valor final.
- Tiempo de levantamiento (t_r): es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final.
- Tiempo pico (t_p): es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico del sobrepaso.
- Sobrepaso máximo (porcentaje M_p): es el valor pico máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad. Si el valor en estado estable de la respuesta es diferente de la unidad, es común usar el porcentaje de sobrepaso máximo. Su fórmula se define como:

Ecuación 21.
$$\text{Porcentaje de sobrepaso máximo} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

La cantidad de sobrepaso máximo en % indica de manera directa la estabilidad relativa del sistema.

- Tiempo de asentamiento (t_s): es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final y permanezca dentro de él. El tiempo de asentamiento se relaciona con la mayor constante de tiempo del sistema de control.

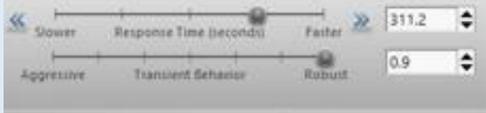
Como adición a la respuesta transitoria del sistema, se agrega el termino error absoluto, el cual muestra en términos de °Celsius el porcentaje de sobrepaso máximo.

Las anteriores especificaciones en el dominio del tiempo son muy importantes debido a que deben presentar respuestas en el tiempo estables y si es necesario modificar la respuesta transitoria hasta que sea satisfactoria para los fines del uso del control [55].

Para determinar los valores de control con una respuesta rápida y estable como lo recomienda la literatura, se llevaron a cabo 10 graficas de medición de temperatura con un *setpoint* a 25 °C y con el control PID de temperatura activo. Esta prueba se dividió en dos secciones, la primera sección con un tiempo de muestreo de la temperatura de 500 ms, modificando los parámetros de control (K_p , K_i y K_d), por medio de la herramienta "pidtool" de Matlab para cada gráfica. Los resultados de la primera sección se pueden ver a continuación:

Tabla 10. Parámetros de sintonización del control PID de temperatura (Primera sección, tiempo de muestreo 500 ms)

Gráfica	Parámetros de control			Sintonización de respuesta PID (<i>pidtool</i> de Matlab)
	K_p	K_i	K_d	
Negra	2786	14.71	0	
Roja	2874	8.148	1.143×10^{-4}	
Azul	2811	17.3	1.143×10^{-4}	

Magenta	908.8	1.037	0	
Verde	242.5	0.5115	0	

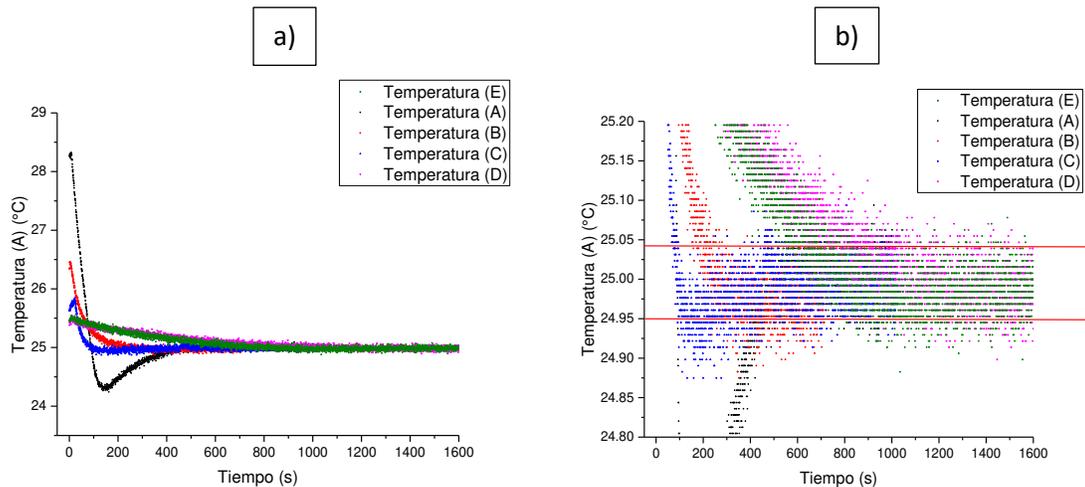


Figura 55. Gráficas resultantes de la primera sección, a) Desglose general., b) Rango de oscilación de la respuesta transitoria del sistema con un tiempo de muestreo de la temperatura de 500 ms.

Tabla 11. Características de la respuesta transitoria de un sistema de control PID de temperatura (primera sección, tiempo de muestreo 500 ms).

Gráfica	Tiempo de retardo (t_d)	Tiempo de levantamiento (t_r)	Tiempo pico (t_p)	Tiempo de asentamiento (t_s)	Porcentaje de sobrepaso máximo (M_p)	Error absoluto (E_a)
Negra	45 s	90 s	147 s	550 s	0.156 %	± 0.08 °C
Roja	88 s	176 s	500 s	700 s	0.156 %	± 0.08 °C
Azul	40 s	80 s	200 s	1000 s	0.156 %	± 0.08 °C
Magenta	450 s	900 s	0 s	1300 s	0.156 %	± 0.08 °C
Verde	350 s	700 s	1100 s	1200 s	0.156 %	± 0.08 °C

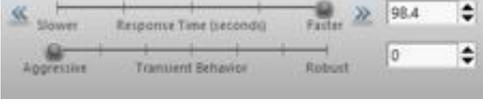
Como síntesis de las pruebas realizadas en la primera sección, se observa que la gráfica de color negro tiene una pendiente muy inclinada, lo que hace que su tiempo de levantamiento alcance

rápidamente la respuesta deseada, aunado a ello, tiene un sobrepaso máximo mayor en comparación con las demás gráficas, pero, lo que la hace más atractiva y recomendable para utilizar sus parámetros de control PID, es su tiempo de estabilización que lo logra alcanzar a los 147 s.

El tiempo de lecturas de muestreo hace que por cada segundo se tengan dos valores de temperatura medidos, por ejemplo, si en la gráfica negra se tomó un tiempo de medición de 1000 s, el total de mediciones de temperatura que envió el sensor de temperatura fue de 2000 mediciones.

Segunda sección: tiempo de muestreo 250 ms

Tabla 12. Parámetros de sintonización del control PID de temperatura (segunda sección, tiempo de muestreo 250 ms).

Gráfica	Parámetros de control			Sintonización de respuesta PID (<i>pidtool</i> de Matlab)
	K_p	K_i	K_d	Matlab
Azul	2786	14.71	0	
Magenta	2874	8.148	1.143×10^{-4}	
Verde	2811	17.3	1.143×10^{-4}	
Azul marino	28.74	0.0328	0	
Negra	2795	13.97	0	

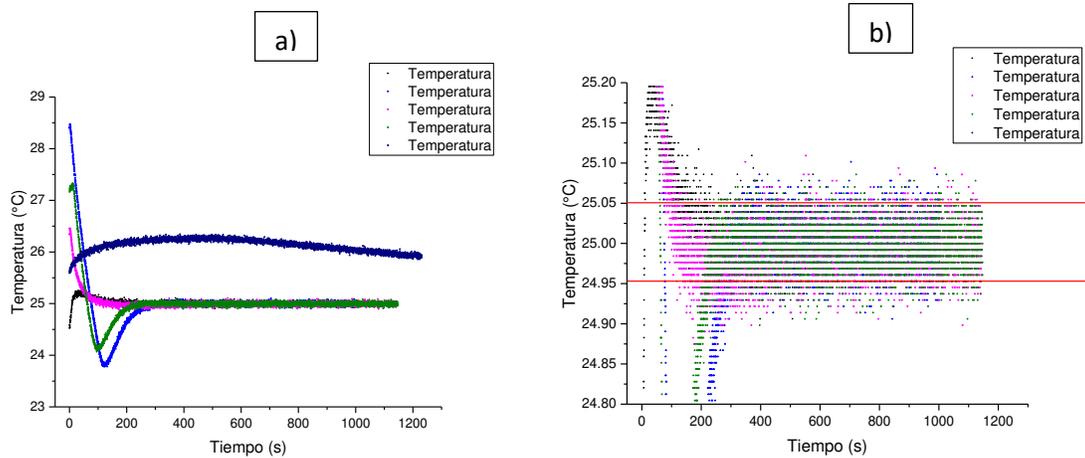


Figura 56. Gráficas resultantes de la segunda sección, a) desglose general., b) Rango de oscilación de la respuesta transitoria del sistema en un tiempo de muestreo de la temperatura de 250 ms.

Tabla 13. Características de la respuesta transitoria de un sistema de control PID de temperatura (segunda sección, tiempo de muestreo 250 ms.

Gráfica	Tiempo de retardo (t_d)	Tiempo de levantamiento (t_r)	Tiempo pico (t_p)	Tiempo de asentamiento (t_s)	Porcentaje de sobrepaso máximo (M_p)	Error absoluto (E_a)
Azul	37.5 s	75 s	122 s	287 s	0.156 %	± 0.08 °C
Magenta	53.5 s	107 s	175 s	500 s	0.156 %	± 0.08 °C
Verde	31 s	62 s	96 s	240 s	0.156 %	± 0.08 °C
Azul marino	X	X	X	25000 s (teórico)		
Negra	5 s	10 s	38 s	200 s	0.156 %	± 0.08 °C

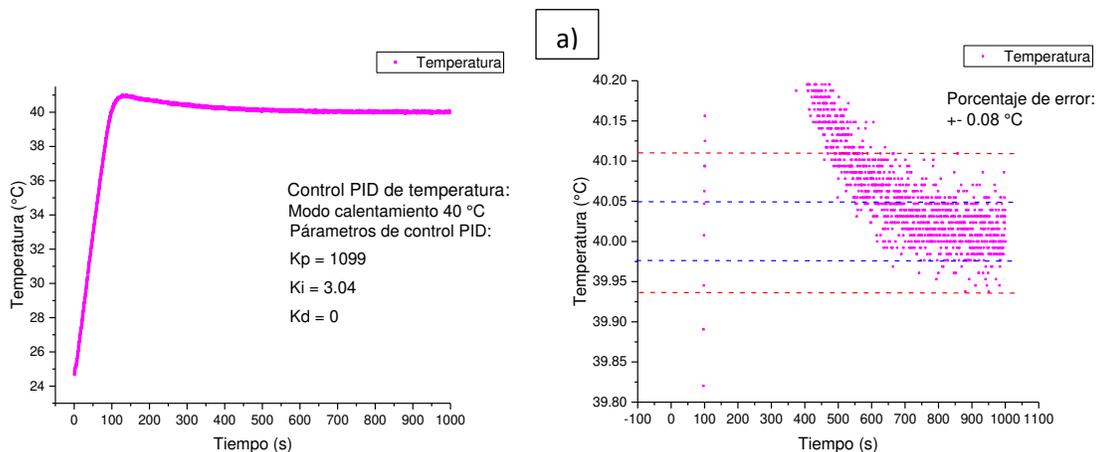
Para el análisis de las repuestas transitorias de la sección dos, se seleccionaron las gráficas de color verde y negro, debido a que en el caso de la gráfica verde se descendía la temperatura desde 27.234 °C, con una pendiente muy inclinada, la cual alcanzo el tiempo de levantamiento a los 62 s, mostrando un porcentaje de sobrepaso máximo considerable. En tanto al análisis de la gráfica de color negro, al momento de activar el control PID, la temperatura se elevó desde 24.523 °C, teniendo una pendiente medianamente inclinada debido a que la temperatura estaba

relativamente cerca del setpoint seleccionado. No se tuvo un porcentaje de sobrepaso máximo considerable además de que alcanzara un tiempo de levantamiento a la respuesta elegida a los 10 s.

La estabilización de la respuesta transitoria de la gráfica verde se logró en un tiempo de 240 s y en el caso de la gráfica negra, se consiguió en un tiempo de 200 s. Por lo tanto, se recomienda el uso de los parámetros de control PID de estas dos graficas. El tiempo de lectura de muestreo máximo con el que se realizaron las pruebas fue de 1200 s . Lo cual se traduce en un tiempo de lecturas de 250 ms por lectura, a una cantidad de 4800 lecturas.

El motivo por el cual se seleccionaron dos tiempos de lectura fue para observar el comportamiento de la respuesta transitoria de las gráficas con diferentes parámetros de control PID. Con ello se puede dar recomendaciones de que parámetros seleccionar o que, tipo de respuesta es la más recomendable, si se requiere un control rápido y agresivo, un control robusto y rápido o un control que este en medio de los rangos de agresivo - robusto y lento - rápido etc. Otra de las razones fue para observar la precisión y exactitud al momento de que se estabilizara la respuesta transitoria, observando que el porcentaje de error es similar en todas las graficas ($\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Se continuo con las pruebas de calentamiento, temperatura ambiente constante y enfriamiento de la celda de medición con el control PID activo, en donde como primer paso se elevó la temperatura a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el control PID activo, esta es la temperatura máxima a la cual se pretende controlar. Segundo paso, se realizó una prueba seleccionando una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ que se tomara como temperatura ambiente constante. Por último, se descendió la temperatura a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es la temperatura mínima a la cual se desea llegar. La temperatura del ambiente con la que se iniciaron las pruebas fue de $23.851\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados de estas tres pruebas del control PID de temperatura se muestran a continuación.



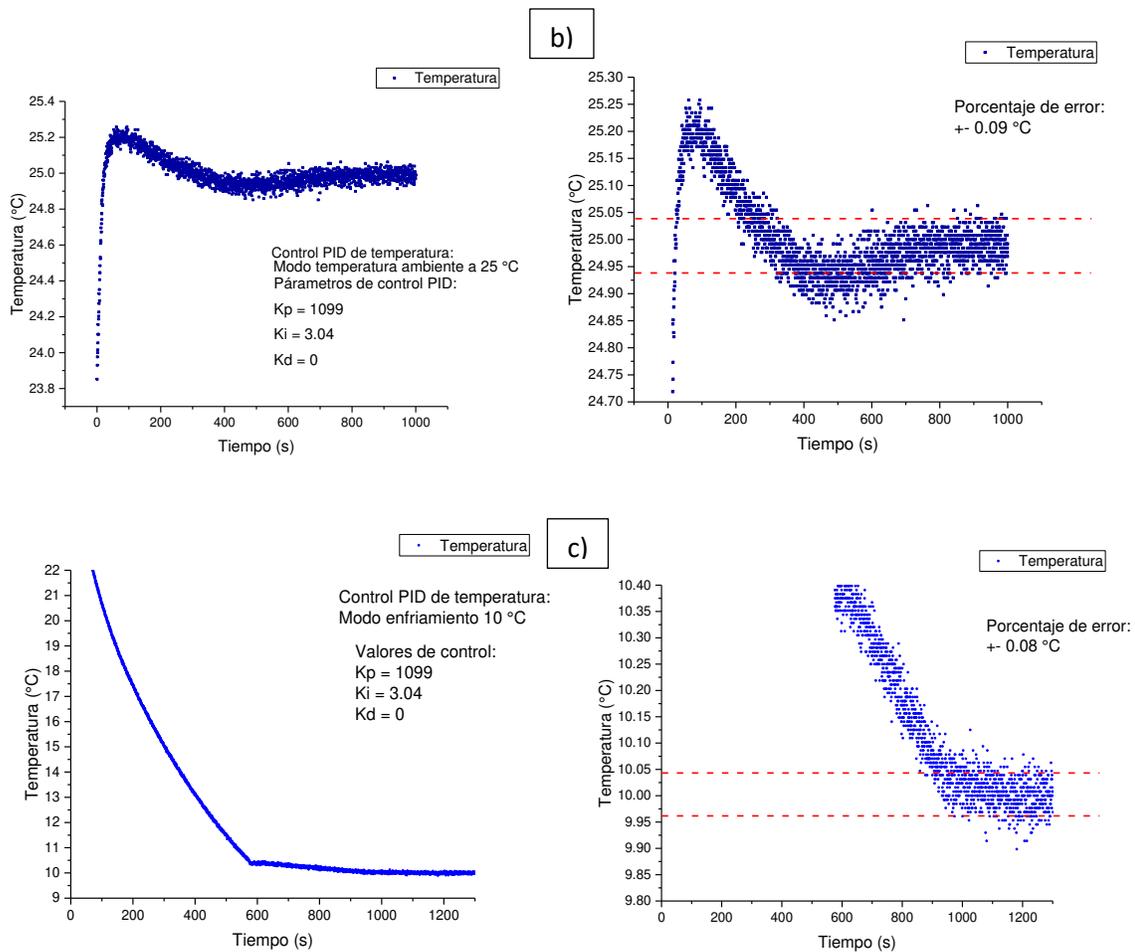


Figura 57. Gráficas con el control PID de temperatura activo: a) Calentamiento a 40 °C, b) temperatura ambiente constante a 25 °C, c) enfriamiento a 10 °C.

Los valores mostrados en las gráficas del control PID de temperatura, muestran un tiempo de estabilización y respuesta transitoria diferente, debido a la temperatura ambiente que se tenía desde la activación del control PID. Para el caso de la gráfica con un setpoint de 40 °C, la temperatura ambiente que se tenía al momento de la activación del control PID fue de 24.961 °C en donde, la pendiente que se obtuvo mostro una inclinación elevada, alcanzando su tiempo de levantamiento a los 100 s, esta grafica tuvo el mayor porcentaje de sobreimpulso máximo llegando a 40.95 °C. El punto importante del control es el tiempo de estabilidad, alcanzándolo en un tiempo de 620 s.

Con un setpoint de 25 °C, la temperatura ambiente que se tenía al momento de la activación del control PID fue de 23.851 °C en donde, la pendiente que se obtuvo mostro una altísima inclinación que alcanzando su tiempo de levantamiento a los 22 s, esta gráfica tuvo un sobre amortiguamiento con un porcentaje de sobrepaso máximo elevado, teniendo dos tiempos pico, uno a los 62 s y el

otro a los 490 s provocando un tiempo de estabilización a los 750 s, con un tiempo lectura de 500 ms.

En la gráfica con un setpoint de 10 °C, la temperatura ambiente que se tenía al momento de la activación del control PID fue de 22.523 °C en donde, la pendiente que se obtuvo mostro una inclinación que alcanzando su tiempo de levantamiento a los 575 s, esta gráfica tuvo un nulo porcentaje de sobreimpulso máximo debido a que el control se empezó a estabilizar desde que descendió la temperatura a 11 °C. El tiempo en el cual se alcanzó la estabilidad fue de 1100 s con un tiempo lectura de 500 ms.

La importancia de tener un control PID de temperatura con una elevada precisión y exactitud en el ámbito de la medición de la efusividad térmica, es debido a la altísima sensibilidad que pueden causar las fluctuaciones de temperatura bruscas en el sensor piroeléctrico utilizado, haciendo que dichas fluctuaciones provoquen mediciones erróneas.

5.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE EFUSIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS MEDIANTE UN SENSOR PIROELÉCTRICO

Los elementos que conforman este sistema se pueden visualizar en el siguiente esquema; el sistema se describe de izquierda a derecha con la cámara de control PID de temperatura que controlara la temperatura por medio del accionamiento de una celda Peltier que está dentro de la celda de medición, la celda esta estrictamente acondicionada para evitar perturbaciones ambientales, eléctricas, mecánicas o electromagnéticas. Para depositar la muestra a medir se requiere retirar dos tornillos y una vez que la muestra este dentro de la celda, se colocan los tornillos en su lugar. Sus terminales del sensor piroeléctrico están internamente conectadas a la salida BNC para su conexión con el amplificador lock-in. La fuente moduladora de luz que controlara la potencia suministrada a los leds, está conectada directamente al acople que contiene el set de leds infrarrojos, al mismo tiempo que estará conectada al amplificador lock-in que proporcionara el tipo de onda y la frecuencia de modulación. La salida de la señal del amplificador lock-in estará conectada a la computadora que será el encargado del registro de las mediciones de efusividades térmicas.

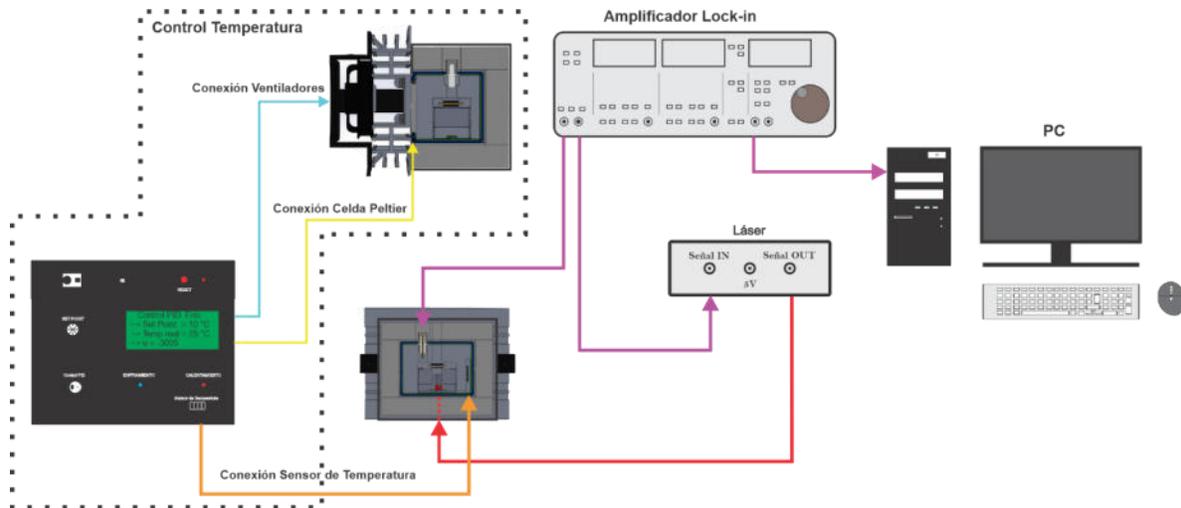


Figura 58. Estructura del sistema de medición de efusividad térmica de líquidos mediante un sensor piroeléctrico.

El sistema conjunto funcionara mediante el principio de funcionamiento de la técnica fotopiroeléctrica frontal para obtener la efusividad térmica de muestras liquidas y se basa en la radiación incidente directa en la superficie de un sensor piroeléctrico, cuya luz es modulada por un amplificador lock-in, la señal de esta técnica se puede obtener en función de la frecuencia de modulación de luz (f) que se puede ser variada. La parte posterior del sensor piroeléctrico está en contacto térmico con la muestra en una celda de cierto tamaño específico, donde las mediciones se realizan a temperatura ambiente o se controlan de acuerdo con las características del experimento. Los elementos importantes que se mencionan en el principio de funcionamiento de la técnica fotopiroeléctrica han sido desarrollados a excepción del amplificador lock-in que es un equipo altamente sensible utilizado específicamente en laboratorio.

CONCLUSIONES

El desarrollo de los distintos elementos que contempla la medición de la efusividad térmica mediante el uso de la técnica fotopiroeléctrica frontal, requerían un alto nivel de diseño electrónico y mecánico, debido al manejo de dispositivos altamente sensibles ante perturbaciones ambientales, eléctricas, electromagnéticas y mecánicas. Un ejemplo de ello es el uso de la celda Peltier, que se utilizó para el aumento o disminución de la temperatura, este tipo de dispositivo tiene características de funcionamiento muy específicas que contemplan el uso de un disipador de temperatura y un ventilador potente que se unifican como una sola pieza, su unión con la celda es primordial si se requiere descender o elevar la temperatura a los rangos máximos a la que está diseñada.

En el caso del diseño electrónico de la fuente moduladora de luz se optó por el control del rango funcionamiento a la que trabajan los leds infrarrojos, en donde se controló el voltaje en un rango de *1.25 V mínima potencia* – *1.85 V máxima potencia* a una corriente constante de *100 mA* por cada led. Se elaboro una placa en donde se concentró un set de 4 leds cuya fuente de luz infrarroja a su máxima potencia es de *850 nM*, que está dentro del rango del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Este tipo de luz permite que, al momento de la experimentación, el sensor piroeléctrico obtenga una mayor absorción de calor y menor captación de luz con lo que se evitara el sobrecalentamiento de la muestra [4].

La celda de medición es el elemento clave para la experimentación, debido a que en ella se depositara la muestra liquida a experimentar, por lo tanto, fue importantísimo determinar el tipo de material con el cual se elaboraría, si seleccionaba un plástico, este material no permitiría el aumento o disminución de temperatura uniforme debido a su baja conductividad térmica y otros factores, por ello se determinó la selección del aluminio, un material con una conductividad térmica excelente y con una resistencia a la oxidación permisible. Un factor igualmente importante fue el diseño mecánico para la colocación del sensor piroeléctrico y la placa de leds infrarrojos que debían estar a una distancia mínima de separación entre ellos. Aunado a esto se diseñaron dos acoples (uno para la colocación del sensor piroeléctrico y el otro para la placa de leds infrarrojos) que embonaran perfectamente en la celda de medición, y además de todo, que cumplieran con el requerimiento de separación, otra ventaja de tener este mecanismo es su fácil montaje y desmontaje de la celda, lo cual hace permisible el cambio de piezas si llegase a haber un desperfecto. Colocar los elementos como salida BNC conectado internamente al sensor piroeléctrico, sensor de temperatura midiendo

directamente la temperatura de la celda de medición y los dos acoples en una sola pieza hacen del diseño y la manufactura de la celda un gran trabajo de ingeniería.

Con respecto al motivo por el cual es necesario tener un control altamente preciso y exacto de la temperatura, la respuesta está en el uso del sensor piroeléctrico como elemento clave en la obtención de la efusividad térmica, como bien se vio en el capítulo II, los materiales piroeléctricos generan una señal eléctrica debido a fluctuaciones de temperatura [37], además de poder medir o generar distintas señales ante otras perturbaciones como movimiento, ondas electromagnéticas etc. Por lo tanto, aislar la celda de medición de estas perturbaciones colocándola dentro de un medio adiabático como aislante de la temperatura ambiente y humedad, una jaula de Faraday como medio aislante de perturbaciones electromagnéticas y un control PID de temperatura preciso para evitar las fluctuaciones de la temperatura ambiente. Son requisitos primordiales para desarrollar un sistema capaz de medir la efusividad térmica [41].

Y, ¿Por qué motivos o intereses es importante la medición de la efusividad térmica?, recordando un poco la definición de la efusividad térmica dice que es la propiedad de los materiales de poder intercambiar calor con su entorno [42]. Las aplicaciones de su medición que se han venido utilizando se pueden ver claramente en la industria textil con la creación de nuevas telas en las que con su uso puedan contener el calor en nuestro cuerpo en condiciones climáticas adversas [1]. Otra de las aplicaciones es la industria farmacéutica, en donde puede utilizarse fácilmente para supervisar una serie de procesos incluyendo la granulación húmeda, la mezcla, y el secado, así como una herramienta útil para supervisar el proceso de lubricación y estimar la dureza de las pastillas [2]. Otra de las posibles aplicaciones en las que se ha tenido una gran investigación es en la medición de las propiedades térmicas de los aceites vegetales (aceite de jatropha, ricino, etc.), dichas investigaciones están enfocadas en sustituir el 100% o un porcentaje considerable de los aceites elaborados con hidrocarburos, los cuales provocan una elevada contaminación del suelo, aire y agua, además de dejar una huella de carbono considerable [11], [18], [20]. Y, por último, un avance tecnológico en el ámbito de la generación de energía eléctrica está en los llamados resonadores térmicos, estos dispositivos tienen la característica particular de poder generar energía eléctrica por medio de fluctuaciones de temperatura, con el uso de aleaciones de materiales con ultra altísima efusividad térmica [31].

Las aplicaciones de medición de la efusividad térmica ocupan un extenso campo de estudio, por tal razón es importante tener un sistema propio de medición de dicha propiedad térmica. Su

elaboración condujo a tareas de investigación, diseño, manufactura, programación, etc., de gran nivel e importancia.

TRABAJO FUTURO

Con el desarrollo de los elementos clave para el uso de la técnica fotopiroelétrica frontal: una fuente moduladora de luz, una celda de medición para el depósito de muestras líquidas y una cámara de control de temperatura que mediante el uso de un control PID de temperatura pueda hacer de la celda de medición un ambiente controlado. Se pretende en el trabajo futuro el desarrollo de la experimentación para obtener las efusividades térmicas de diversas muestras líquidas.

Como primer paso se pretenden hacer pruebas en muestras líquidas en donde se conozcan sus efusividades térmicas, con el objetivo de verificar el buen funcionamiento de los elementos desarrollados. Si se tienen resultados en rango de medición aceptable se puede pasar a la segunda etapa de experimentación, y si no se llegaron a tener resultados aceptables se harían los ajustes necesarios.

La segunda etapa de experimentación es la elaboración de un registro de resultados de medición de efusividades para su posterior procesamiento y validación con respecto a los establecidos en la literatura.

REFERENCIAS

- [1] «Thermal Effusivity Meter | Measure Warm Feel or Cool Touch of Fabrics», *Thermtest Inc.* <https://thermtest.com/tps-effusivity-meter> (accedido ago. 25, 2020).
- [2] J. Uchiyama, Y. Kato, y Y. Uemoto, «Evaluation of risk and benefit in thermal effusivity sensor for monitoring lubrication process in pharmaceutical product manufacturing», *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 40, n.º 8, pp. 999-1004, ago. 2014, doi: 10.3109/03639045.2013.795581.
- [3] G. Lara-Hernandez, A. Cruz-Orea, E. Suaste-Gomez, y J. J. A. Flores-Cuautle, «Glucose in aqueous solution thermal characterization by photopyroelectric techniques», *Rev. Mex. Fis.*, p. 4, 2017.
- [4] E. Marín, «Thermal Physics Concepts: The Role of the Thermal Effusivity», *The Physics Teacher*, vol. 44, n.º 7, pp. 432-434, sep. 2006, doi: 10.1119/1.2353583.
- [5] A. Yoshida, K. Kagata, y T. Yamada, «Measurement of Thermal Effusivity of Human Skin Using the Photoacoustic Method», *Int J Thermophys*, vol. 31, n.º 10, pp. 2019-2029, oct. 2010, doi: 10.1007/s10765-010-0869-7.
- [6] V. S. Raykar y A. K. Singh, «Photoacoustic Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fe_3O_4 Nanofluid», *Journal of Thermodynamics*, vol. 2011, pp. 1-5, 2011, doi: 10.1155/2011/464368.
- [7] L. Qiu, X. H. Zheng, J. Zhu, y D. W. Tang, «Note: Non-destructive measurement of thermal effusivity of a solid and liquid using a freestanding serpentine sensor-based 3ω technique», *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, n.º 8, p. 086110, ago. 2011, doi: 10.1063/1.3626937.
- [8] M. Noroozi, A. Zakaria, M. M. Moxsin, y Z. A. Wahab, «An Investigation on the Thermal Effusivity of Nanofluids Containing Al_2O_3 and CuO Nanoparticles», *IJMS*, vol. 13, n.º 8, pp. 10350-10358, ago. 2012, doi: 10.3390/ijms130810350.
- [9] A. O. Guimarães, F. A. L. Machado, E. C. da Silva, y A. M. Mansanares, «Thermal Effusivity and Thermal Conductivity of Biodiesel/Diesel and Alcohol/Water Mixtures», *Int J Thermophys*, vol. 33, n.º 10, pp. 1842-1847, nov. 2012, doi: 10.1007/s10765-012-1280-3.

- [10] T. Baba, N. Taketoshi, y T. Yagi, «Development of pulsed light heating thermorefectance methods under configurations of rear heating/front detection and front heating/front detection», en *18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems*, sep. 2012, pp. 1-5.
- [11] L. M. Cervantes-Espinosa, F. de L. Castillo-Alvarado, G. Lara-Hernández, A. Cruz-Orea, C. Hernández-Aguilar, y A. Domínguez-Pacheco, «Thermal Effusivity of Vegetable Oils Obtained by a Photothermal Technique», *Int J Thermophys*, vol. 35, n.º 9, pp. 1940-1945, oct. 2014, doi: 10.1007/s10765-012-1347-1.
- [12] R. Ivanov *et al.*, «Absolute measurements of thermal effusivity using the electropyroelectric technique», *Thermochimica Acta*, vol. 554, pp. 59-62, feb. 2013, doi: 10.1016/j.tca.2012.12.020.
- [13] «A simple method for determining the thermal effusivity of defects | The European Physical Journal Applied Physics (EPJ AP)». <https://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2014/05/ap140026/ap140026.html> (accedido ago. 23, 2020).
- [14] M. N. Pop, «A photopyroelectric measurement device for liquid investigation and monitoring», en *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, oct. 2014, pp. 833-838, doi: 10.1109/ICEPE.2014.6970028.
- [15] U. Zammit, F. Mercuri, S. Paoloni, M. Marinelli, y R. Pizzoferrato, «Simultaneous absolute measurements of the thermal diffusivity and the thermal effusivity in solids and liquids using photopyroelectric calorimetry», *Journal of Applied Physics*, vol. 117, n.º 10, p. 105104, mar. 2015, doi: 10.1063/1.4914491.
- [16] H. Ohta *et al.*, «Thermal effusivity measurement based on analysis of 3D heat flow by modulated spot heating using a phase lag matrix with a combination of thermal effusivity and volumetric heat capacity», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, n.º 11, p. 115002, nov. 2016, doi: 10.1088/0957-0233/27/11/115002.
- [17] A. Saifi, A. E. Amiri, A. Elhassnaoui, y S. Sahnoun, «A new model for determining the thermal effusivity of defects by pulsed thermography», en *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Marrakech & Bengrir, Morocco, oct. 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/CISTEM.2016.8066768.

- [18] E. A. Gallardo-Hernández *et al.*, «Thermal and Tribological Properties of Jatropha Oil as Additive in Commercial Oil», *Int J Thermophys*, vol. 38, n.º 4, p. 54, abr. 2017, doi: 10.1007/s10765-017-2185-y.
- [19] A. Salazar, A. Oleaga, A. Mendioroz, y E. Apiñaniz, «Thermal effusivity measurements of thermal insulators using the photopyroelectric technique in the front configuration», *Measurement*, vol. 121, pp. 96-102, jun. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.047.
- [20] G. Lara-Hernandez, J. C. Benavides-Parra, A. Cruz-Orea, E. Contreras-Gallegos, y C. Hernández-Aguilar, «Thermal characterization of castor oil as additive in lubricant oil using photothermal techniques», p. 4.
- [21] A. L. Cottrill *et al.*, «Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting», *Nat Commun*, vol. 9, n.º 1, p. 664, dic. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03029-x.
- [22] V. Vavilov, A. Chulkov, A. Smotrov, S. Smotrova, y A. Moskovchenko, «Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 30, n.º 3, p. 034003, mar. 2019, doi: 10.1088/1361-6501/ab018e.
- [23] X. Xie, Z. Diao, y D. G. Cahill, «Microscale, bendable thermoreflectance sensor for local measurements of the thermal effusivity of biological fluids and tissues», *Review of Scientific Instruments*, vol. 91, n.º 4, p. 044903, abr. 2020, doi: 10.1063/1.5141376.
- [24] T. Baba, N. Taketoshi, K. Hatori, y T. Otsuki, «Method and apparatus for measuring thermophysical properties», US6595685B2, jul. 22, 2003.
- [25] 古川雄一, 中村慎吾, 冈田裕二, y 河原文雄, «红外辐射温度计的测定异常检测装置及其测定异常检测方法», CN101652644A, feb. 17, 2010.
- [26] J. Sun, «Method for thermal tomography of thermal effusivity from pulsed thermal imaging», US20080111078A1, may 15, 2008.
- [27] I. Petrovic, «Method for determining thermal effusivity and/or thermal conductivity of sheet material», US7490981B2, feb. 17, 2009.
- [28] S. Mathur, I. Petrovic, D. Lewis, X. Yang, y E. Finch, «Thermal paper», US20060122059A1, jun. 08, 2006.

- [29] N. E. Sever, M. Warman, S. Mackey, W. Dziki, y M. Jiang, «Chapter 35 - Process Analytical Technology in Solid Dosage Development and Manufacturing», en *Developing Solid Oral Dosage Forms*, Y. Qiu, Y. Chen, G. G. Z. Zhang, L. Liu, y W. R. Porter, Eds. San Diego: Academic Press, 2009, pp. 827-841.
- [30] A. O. Guimarães, F. A. L. Machado, E. C. da Silva, y A. M. Mansanares, «Investigating thermal properties of biodiesel/diesel mixtures using photopyroelectric technique», *Thermochimica Acta*, p. S0040603111005156, oct. 2011, doi: 10.1016/j.tca.2011.10.016.
- [31] A. L. Cottrill *et al.*, «Persistent energy harvesting in the harsh desert environment using a thermal resonance device: Design, testing, and analysis», *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1514-1523, feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.045.
- [32] M. P. M. José, M. D. Marta, y R. D. A. A. José, *INGENIERÍA TÉRMICA*. Editorial UNED, 2014.
- [33] G. W. Daub y W. S. Seese, *Química*. Pearson Educación, 1996.
- [34] S. B. Lang, «Pyroelectricity: A 2300-year history», *Ferroelectrics*, vol. 7, n.º 1, pp. 231-234, ene. 1974, doi: 10.1080/00150197408238004.
- [35] A. Mandelis y C. Christofides, *Physics, Chemistry and Technology of Solid State Gas Sensor Devices*. John Wiley & Sons, 1993.
- [36] R. P. Areny, *Sensores y Acondicionadores de Señal 4a*. Marcombo, 2005.
- [37] S. B. Lang, «Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool», *Physics Today*, vol. 58, n.º 8, pp. 31-36, ago. 2005, doi: 10.1063/1.2062916.
- [38] V. L. Rodríguez, *Problemas resueltos de electromagnetismo*. Editorial Centro de Estudios Ramon Areces SA, 2016.
- [39] «Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications - Energy & Environmental Science (RSC Publishing)». <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/ee/2014/c4ee01759e#!divAbstract> (accedido ago. 27, 2020).
- [40] G. Lara Hernandez, A. Cruz-Orea, E. Suaste Gomez, y J. J. A. Flores Cautle, «Comparative Performance of PLZT and PVDF Pyroelectric Sensors Used to the Thermal Characterization of Liquid

Samples», *Advances in Materials Science and Engineering*, oct. 31, 2013.
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/281279/> (accedido ago. 27, 2020).

[41] E. Marín, «The role of thermal properties in periodic time-varying phenomena», *Eur. J. Phys.*, vol. 28, n.º 3, pp. 429–445, mar. 2007, doi: 10.1088/0143-0807/28/3/005.

[42] E. Marín, «Teaching thermal physics by touching», vol. 2, n.º 1, p. 3, 2008.

[43] J.-L. Battaglia, A. Kusiak, C. Rossignol, y N. Chigarev, «Thermal diffusivity and effusivity of thin layers using time-domain thermoreflectance», *Phys. Rev. B*, vol. 76, n.º 18, p. 184110, nov. 2007, doi: 10.1103/PhysRevB.76.184110.

[44] E. Marin, «Basic principles of thermal wave physics and related techniques», *Thermal Wave Physics and Related Photothermal Techniques: Basic Principles and Recent Developments*, Transworld Research Network, 2013.

[45] V. Vavilov y D. Burleigh, *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Cham: Springer International Publishing, 2020.

[46] D. Dadarlat, H. Visser, y D. Bicanic, «An improved inverse photopyroelectric cell for measurement of thermal effusivity: application to fatty acids and triglycerides», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 6, n.º 8, pp. 1215–1219, ago. 1995, doi: 10.1088/0957-0233/6/8/018.

[47] «Measurements of the thermal effusivity of transparent liquids by means of a photopyroelectric technique».
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2003000400011
(accedido ago. 18, 2020).

[48] «ADT7420 Datasheet and Product Info | Analog Devices».
<https://www.analog.com/en/products/adt7420.html?doc=ADT7420.pdf#> (accedido ago. 30, 2020).

[49] «Sensor piezo eléctrico». <http://proveedoracano.com/eshop/piezoelctrico-20mm>
(accedido ago. 30, 2020).

[50] «Poliestireno Expandido — Conductividad Térmica», *NETZSCH Análisis y Ensayo*.
<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/es/materiales-aplicaciones/aislantes-termicos/poliestireno-expandido-conductividad-termica/> (accedido ago. 30, 2020).

- [51] R. plus r.o spol s, «Peltier Module Hebei TEC1-12706», *DEMO Electron.com*.
<https://www.electron.com/peltier-module-hebei-tec1-12706-p357/> (accedido ago. 30, 2020).
- [52] C. de Llano, *Física*. Editorial Progreso, 2003.
- [53] «SFH 4356 - OSRAM Opto Semiconductors | TTI, Inc.»
https://www.tti.com/content/ttiinc/en/apps/part-detail.html?mfrShortname=OSR&partsNumber=SFH%204356&utm=top&channel=ppc&source=google&campaigns=tti-brand&gclid=CjwKCAjw4rf6BRAvEiwAn2Q76p6jKdRqdlwL8EbaJC8-n-FPzukqJnVfd2bEZheXpewmIGVrKKN7QRoCd2cQAvD_BwE (accedido sep. 01, 2020).
- [54] A. Salazar, A. Sánchez-Lavega, J. M. Terrón, y M. Gateshki, «Aplicación de las técnicas fototérmicas al estudio de materiales», *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, vol. 39, n.º 4, pp. 584-588, ago. 2000, doi: 10.3989/cyv.2000.v39.i4.825.
- [55] «Ingeniería de control moderna - Katsuhiko Ogata - Google Books».
https://books.google.com.mx/books?id=QK148EPC_m0C&printsec=frontcover&dq=ingenieria+de+control+moderna+ogata&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwj07zz09vrAhXjna0KHcDzBHIQ6AEwAHoECAEQAg#v=onepage&q=ingenieria%20de%20control%20moderna%20ogata&f=false (accedido sep. 09, 2020).