



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*Reconfiguración incremental de sensores en la
instrumentación de un calorímetro no-convencional*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

Ing. Martha Cecilia Arellano Alamilla

DIRECTORES:

Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes

Dr. Jorge Mario Cruz Duarte

Agradecimientos personales

A Dios, por haberme dado vida para llegar a cumplir una meta más, fue un camino lleno de dificultades pero también de muchos logros y alegrías.

A mis padres, Martha y Diego por seguir apoyándome para cumplir mis sueños, tener la paciencia para verme llegar hasta este punto y por ser mi mayor apoyo, siempre incondicional. Gracias por confiar en mi una vez más.

A mis hermanas Angie y Lety por ser mi ejemplo y como hermanas mayores, nunca dejarme sola y aconsejarme. A Diego y Anely por endulzarme los momentos amargos con sus ocurrencias. Espero ser un apoyo y buen ejemplo a seguir.

A mis abuelos (en especial a los que me cuidan desde el cielo), a mis tíos, tías y primos, que aunque no compartimos los mismos anhelos siempre me animaron sus palabras de admiración. Gracias por estar conmigo en este camino. Todos saben que fue un camino lleno de dificultades, pero con unión lo logramos.

A mis compañeros, colegas y amigos: Giselle, Luis, Sigi, Alex, Cesar y el Dr. Iván, por hacer de mi estancia en este lugar una de las mejores experiencias de mi vida, por estar conmigo en los momentos difíciles y por recordarme que tengo la capacidad de realizar las cosas cuando me sentí derrotada.

A mi esposo Nematihuani, por ser un pilar importante en mi vida, por apoyarme en todo momento, por las palabras de aliento que me brindó cuando más las necesitaba y por todo el amor y paciencia otorgados durante todo este tiempo, te amo.

A bebé que viene en camino, que a pesar de ser tan pequeñito, ¡fue el mayor impulso para terminar este trabajo!

Agradecimientos institucionales.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), teniendo como número de becario 894285.



Agradecer también al Departamento de Ingeniería Electrónica de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato por el espacio de trabajo otorgado y los apoyos requeridos para mi desarrollo profesional.

El agradecimiento se extiende a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) por el apoyo económico otorgado para la asistencia al congreso [CONAMTI 2018](#).



Dirección de Apoyo a la
Investigación y al Posgrado

A todos y cada uno de mis profesores, por compartir cada conocimiento adquirido conmigo y ayudarme a ser una profesional e inculcar el amor por la investigación. En especial a mi asesores el Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes, por confiar en mi capacidad y ayudarme a desarrollar habilidades de investigación; y al Dr. Jorge Mario Cruz Duarte por el apoyo brindado con el dispositivo de pruebas y conocimiento durante mi trabajo de investigación.

Resumen

En la era de la tecnología, estamos observando cambios revolucionarios en nuestra manera de vivir, debido a la automatización de cualquier proceso, lo que nos vuelve cada vez más dependientes de la tecnología. Sin embargo, en la medida que incrementamos el uso de los dispositivos tecnológicos, mayoritariamente electrónicos, el problema de transferencia de calor crece de igual manera, además de ser este último un tema bastante desatendido. En este tenor, las necesidades mundiales de sistemas digitales complejos son cada día mayores, lo que da lugar a una excesiva generación de potencia térmica por efecto Joule. En últimas, contaminación. Por esta razón, es importante el desarrollo de sistemas confiables con el objeto de cuantificar el impacto de este efecto térmico en nuestros dispositivos electrónicos y en el ambiente. En este trabajo de tesis se aborda el problema de instrumentación de un calorímetro no-convencional con el objetivo de mejorar su sensibilidad y, a su vez, la precisión en la medición de sus sensores. Las modificaciones propuestas permiten tener una mejor medición en la determinación experimental del flujo de calor generado por circuitos electrónicos. Las estrategias más importantes desarrolladas comprenden el ajuste de posición e incremento de sensores de manera experimental. Simultáneamente, se revisa y mejora el modelo matemático, con base en herramientas del cálculo fraccionario, utilizando resultados experimentales.

Abstract

In the era of technology, we are observing revolutionary changes in daily life due to the automatization of any process, and we are becoming dependent on technology. However, as we increase the use of technology, the problem of heat transfer in electronic devices also grows besides being a subject very neglected. In such a tier, the world requirements of complex digital systems have been increased each day, generating heat substantially by the Joule effect. Namely, pollution. Therefore, it is crucial to develop reliable systems to quantify the impact of the thermal effect on electronic devices. In this thesis, the instrumentation problem of a non-conventional calorimeter is addressed to increase the sensitivity and, simultaneously, the sensors' precision. The proposed modification allows enhancing measurements in the experimental determination of heat dissipated by electronic circuits. Essential strategies are considered for rearranging and increasing heat sensors in the experimental setup. Simultaneously, a mathematical model is developed by using foundations from fractional calculus to improve the forecast of experimental results.

Índice

Agradecimientos personales.	v
Agradecimientos institucionales	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Lista de símbolos	xv
1 Introducción	1
1.1 Motivación	5
1.2 Objetivo general	6
1.2.1 Objetivos específicos	6
1.3 Justificación	6
1.4 Organización de la tesis	8
2 Fundamentos teóricos	11
2.1 Principios fundamentales	13
2.1.1 Primera Ley de la Termodinámica	13
2.1.2 Transferencia de energía por calor	14
2.2 El calorímetro convencional	16
2.2.1 Calorímetro de bomba	18
2.2.2 Calorímetro de reacción	19
2.2.3 Calorímetro de escaneo diferencial	19
2.2.4 Calorímetro a presión constante	20
2.2.5 Calorímetro adiabático	21
2.3 Aplicaciones de los calorímetros	22

2.4	Cálculo Fraccionario	23
2.5	Algoritmo Levenberg-Marquardt (LM)	25
3	Modelo del calorímetro	27
3.1	Modelado matemático del calorímetro	27
3.2	Modelo térmico equivalente	30
3.3	Instrumentación electrónica original	32
3.4	Mejoras al modelo e instrumentación	35
3.4.1	Mejoras propuestas al modelo original	35
3.4.2	Modelo Caputo-Dzhrbashyan (CD)	37
3.4.3	Arreglos incrementales de sensores	38
3.5	Sistema de adquisición de datos	41
3.5.1	Programación de alto nivel	42
4	Implementación y resultados experimentales	45
4.1	Revisión de datos experimentales	47
4.2	Ajuste teórico-experimental del modelo matemático	52
4.3	Comparativa entre datos reales y simulados	53
4.4	Análisis de error	55
5	Capítulo V: Conclusiones generales	59
	Bibliografía	61

Lista de símbolos

Se incluyen símbolos generales (con letras latinas y griegas), subíndices, superíndices y abreviaturas utilizadas a lo largo de este reporte de tesis. Las listas están organizadas alfabéticamente.

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m^2
c	Calor específico	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
H	Entalpía	J
m	Masa	kg
\dot{m}	Flujo de masa	kg/s
P	Presión	Pa
Q	Calor	J
\dot{Q}	Potencia térmica	W
S	Entropía	J/K
T	Temperatura	K
t	Tiempo	s
V	Velocidad	m/s

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α	Parámetro 1 de Mittag-Leffler Generalizado (Operador Prabhakar)	
β	Parámetro 2 de Mittag-Leffler Generalizado (Operador Prabhakar)	
γ	Parámetro 3 de Mittag-Leffler Generalizado (Operador Prabhakar)	
θ	Diferencia finita de temperaturas	K
ρ	Densidad	kg/m ³

Subíndices

Subíndice	Término
a	Ambiente
gen	Generada
i	Entrada
o	Salida
p	A presión constante
sis	Sistema
θ	Temperatura
0	Estado inicial

Superíndices

Superíndice	Término
n	Coficiente variable

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>LM</i>	Levenberg-Marquardt
<i>LT</i>	Balance de energía
<i>ML</i>	Mittag-Leffler
<i>AT</i>	Análisis Térmico

1 Introducción

La elevada temperatura que presentan algunos circuitos en operación es uno de los problemas más comunes en los sistemas electrónicos modernos. A pesar de que un transistor disipa una potencia muy pequeña, en el orden de los nano-vatios, ésta no es nada despreciable en los circuitos integrados que contienen millones de transistores que, debido a la creciente demanda, tienden a ser cada vez más rápidos y de menor tamaño. Estos factores nos llevan a observar que la presencia de potencias tan altas requieren de un cuidadoso diseño térmico, además del electrónico, para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo [Marin et al., 2012].

El incremento en el interés por la gestión de la energía térmica es cada vez más notorio en estos días debido a que la gran mayoría de nuestras actividades están rodeadas por tecnología, compuesta, de manera casi obvia por componentes electrónicos [Cengel, 2002]. En los últimos años, los diseñadores han enfocado su atención en el problema de la transferencia de calor al desarrollar dispositivos electrónicos modernos como las tabletas electrónicas, los teléfonos inteligentes y los dispositivos portátiles, en general [Liu and Wang, 2018]. Aunque a veces sin tener resultados óptimos. Un ejemplo de ello es el reciente fracaso de la reconocida marca Apple®, la cual informó en 2017 que no le sería posible realizar el lanzamiento de un cargador inalámbrico previamente anunciado, este cargador serviría para múltiples dispositivos, anunciando también que en las pruebas realizadas presentaba problemas de sobrecalentamiento [Lee, 2019].

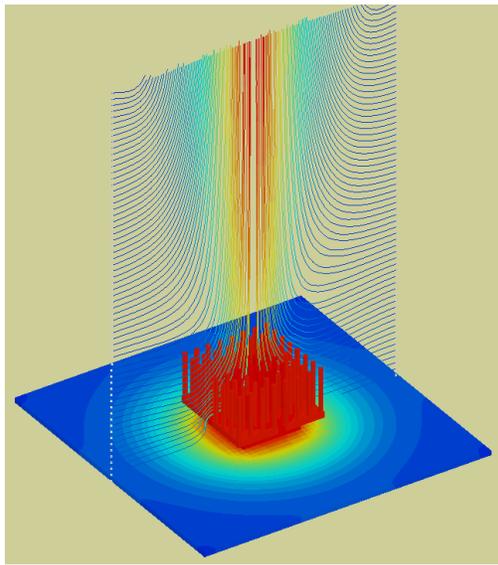
Este acontecimiento nos permite observar los alcances del problema térmico aún en la actualidad. Sin embargo, es un tema que no debemos perder de vista y en el que se debe seguir incursionando ya que, hoy en día, todos estos tipos de dispositivos tienen un impacto directo con nuestra cotidianidad, especialmente con nuestra salud.

Para el estudio del tratamiento térmico es importante conocer el comportamiento de

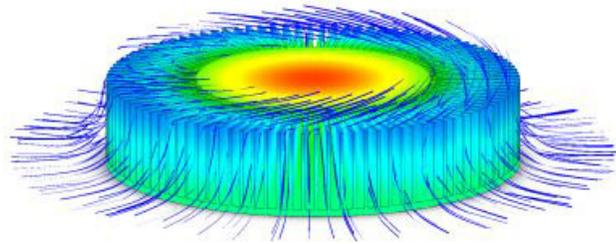
cada uno de los dispositivos en cuanto a su disipación de energía. Esto es con el fin de dar el uso adecuado a los componentes electrónicos y asegurar su correcto funcionamiento, y de ser necesario, incorporar los dispositivos disipadores de calor adecuados. Cabe mencionar que los disipadores de calor de placa de aletas o agujas son considerados como los métodos más comunes para esta aplicación, debido a su relativo bajo costo de implementación, y su capacidad para lograr la extracción eficiente del calor generado por los equipos microelectrónicos [M.R et al., 2019]. Estos dispositivos tienen diversas geometrías aletadas, como las mostradas en la Figura 1-1, que promueven la extracción del calor al incrementar sus áreas efectivas de convección. Ahora bien, tanto en la geometría de la Figura 1-1a con en la de la Figura 1-1b se observa el comportamiento que tiene el flujo de calor (por convección) en los disipadores, canalizando la energía térmica a través de sus aletas. En éstas ilustraciones es evidente la importancia de utilizarlos para aminorar el problema del Efecto Joule. Como ya se mencionó, se debe tener conocimiento del comportamiento de disipación de calor que tiene el dispositivo o circuito, para poder elegir o diseñar el disipador de calor adecuado a las necesidades que se presenten, ya que no basta con saber la potencia que este consume, si no poder medir la cantidad de esta que se convierte en calor, siendo en este punto en donde entra el concepto de calorimetría.

La calorimetría es un término genérico que involucra a cualquier tipo de experimento en donde se cuantifique calor, ya sea que se trate de un fenómeno físico o químico o que el calor sea absorbido o generado por el sistema, llamando entonces calorímetros, a los equipos creados con el fin de determinar esta cantidad de calor [Marin et al., 2012].

El diseñar un dispositivo de calorimetría, implica tres aspectos fundamentales: la medición del trabajo eléctrico, la exactitud y sensibilidad termométricas y las pérdidas de calor. El segundo aspecto es el tratado en este trabajo de tesis, debido a que se necesitan sensores y configuraciones de estos, que nos entreguen mediciones lo más precisas posibles. Por ello se eligen las mejores opciones instrumentales en cada caso, buscando tener altas sensibilidades y bajo costo [Alfredo Gómez et al., 1986]. Pero esto es precisamente uno de los problemas a los que nos enfrentamos en la calorimetría: la falta de sensores electrónicos que se puedan sumergir en algún tipo de fluido (*e.g.*, agua o aceite), y que no sufran un desgaste o descomposición por introducción en líquido. Por otra parte, la mayoría de los sensores comerciales tienen recubrimientos que limitan, en muchas ocasiones, la medición exacta de la variable de estudio, por lo que es importante acoplar nuevas estrategias y materiales en la medición de la temperatura en fluidos. Sin embargo, al no poder esperar a la generación



(a) Placa rectangular con aletas de espina



(b) Placa circular de aletas radiales

Figura 1-1: Ejemplo ilustrativo de dos posibles geometrías de los disipadores de calor. Fuente ©: Harke [2008. Accessed June 3, 2020] y Novel Concepts Inc. [2007. Accessed June 3, 2020]

de nuevos materiales de recubrimiento, la instrumentación digital se puede mejorar a través de métodos incrementales, configuraciones electrónicas adecuadas y técnicas indirectas que nos permitan lograr el objetivo de estimación, con mayor precisión y exactitud en las mediciones. Existen investigaciones como la de MacLeod, en la que enfoca el estudio de múltiples sensores térmicos dentro de calorímetros con diferentes geometrías y posiciones de los sensores, así como considerando diversas fuentes de calor, presentando una alta precisión en las mediciones con un error del 0.02% [MacLeod et al., 2019]. Además, el diseño de estos dispositivos es importante en diversas áreas de interés, como la reciente colaboración que realizó el Instituto Nacional de Metrología de Francia [LNE, 2020. Accessed July 20, 2020] con la Agencia Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (Andra) para desarrollar un prototipo de calorímetro de medición directa para la potencia térmica de paquetes de residuos radiactivos de hasta 500 W, mejorando en los resultados la incertidumbre del 5% [Razouk et al., 2018]. Otra interesante aplicación de la calorimetría es aquella en la que se utiliza como técnica de ensayo no destructiva para la determinación de la potencia de salida de materiales nucleares productores de calor. Con ello, se ahorra tanto tiempo y dinero debido a que no es necesario destruir los materiales por cada ensayo [Bracken, 2004]. En cada una de estas investigaciones, una de las piezas clave para tener éxito, es la correcta ubicación y selección de los sensores medidores de los cambios de temperatura.

Es por ello que en este trabajo de tesis se presenta *la reconfiguración incremental de sensores de medición de temperatura de un calorímetro no convencional*, para tener un mayor nivel de confiabilidad en la captación de los cambios de temperatura y la estimación del proceso de transferencia del calor. Además, se utilizan sensores de temperatura confiables y a bajo costo, con el fin de que estudiantes y profesionales puedan tener a su alcance un dispositivo de calorimetría como este, para conocer la cantidad de energía disipada, en forma de calor, de cada uno de los circuitos o componentes que utilizan para fines académicos o industriales. Siendo el problema de incremento de temperatura por disipación de calor un factor tratable, el presente estudio puede ayudar a evitar que el problema térmico contribuya al mal funcionamiento de sistemas electrónicos desarrollados, ayudándonos en la aplicación de los métodos adecuados para tratarlo.

Además, en este trabajo también se hace uso del cálculo fraccionario, para ajustar el modelo tradicional con base en el comportamiento experimental. El cálculo fraccionario, como su nombre lo dice, es una extensión del cálculo tradicional para el caso en el que las derivadas e integrales están en órdenes no enteros. Esta herramienta ha sido útil para modelar sistemas complejos o basados en difusión, siendo de gran utilidad en el modelado de procesos térmicos [Podlubny, 1998, Dzieliński and Sierociuk, 2010]. Por ejemplo, existen trabajos como el modelado de ultracondensadores por función de transferencia de orden fraccionario, así como problemas de calentamiento de vigas con modelos de este mismo tipo [Dzielinski. et al., 2010]. Otro trabajo que compete son los resultados de modelar el proceso de transferencia de calor en medios heterogéneos con la suposición de que parte del flujo de calor se dispersa en el aire alrededor del haz, basándose en un proceso de difusión de calor con cálculo fraccionario [Dominik et al., 2013]. Otra área de interés creciente a nivel mundial es la investigación sobre flujos a nanoescala y transferencias de calor, existiendo trabajos como “Fractional calculus for nanoscale flow and heat transfer”, en donde su propósito fué revelar los fenómenos alrededor de estos procesos por medio del cálculo fraccionario [Hong et al., 2014]. Por trabajos como estos, es que se decidió incursionar con esta herramienta, así como por las crecientes aplicaciones que han tenido en los últimos años.

1.1. Motivación

Es bien sabido que los componentes electrónicos sufren de un inevitable calentamiento y que estos componentes se encuentran, cada vez, en mayor magnitud en nuestra vida diaria. Hoy en día, los estudiantes de carreras orientadas al diseño y uso de la electrónica, además de los diseñadores de equipos electrónicos, tenemos deficiencias en el conocimiento de la cantidad de calor disipada por los componentes que utilizamos. En gran parte este desconocimiento se debe a la falta de equipos que nos ayuden a concienciar sobre las magnitudes que se manejan por componente y que, a su vez, estos equipos puedan estar a nuestro alcance. Es por este motivo que se tiene la vigente necesidad de crear nuevos dispositivos de calorimetría.

El tener un dispositivo capaz de darnos a conocer la cantidad de calor disipado por un equipo microelectrónico nos ayudará a elegir el dispositivo de tratamiento térmico (como los disipadores de calor) más adecuado para nuestros requerimientos, sin desperdiciar recursos al sobre disipar, o un dispositivo deficiente para nuestras necesidades. Ayudando también, a la mejora en la calidad y el tiempo de vida de nuestros dispositivos electrónicos.

Al existir en la institución un moderno dispositivo de calorimetría no convencional, la idea del trabajo radica en aumentar la cantidad de sensores para mejorar la sensibilidad de medición de éste, debido a que en su diseño instrumental original se encontraron algunas deficiencias en hardware (aunque muchas de ellas fueron resueltas por software). Esto se pretende lograr bajo un esquema de configuración incremental, además de diferentes configuraciones dentro de la geometría de las cámaras del sistema. Adentrados en la materia, el mejoramiento en la sensibilidad de medición incentivó a realizar las comparaciones de las curvas de calor provenientes de los datos experimentales y modelos matemáticos teóricos, con el fin de que las diferencias entre ellos, que pudieron ser provocadas por diversos factores en el modelo implementado, fueran mínimas y así, tener un modelo matemático tradicional con el mínimo error permitiendo encontrar los valores experimentales para la resistencia y capacitancia del calorímetro.

1.2. Objetivo general

Mejorar el modelo matemático de la transferencia de calor en los dispositivos electrónicos a través de técnicas calorimétricas basadas en el cálculo fraccionario. Además de la inclusión de mejoras en la instrumentación digital de un calorímetro no-convencional previamente desarrollado en la Universidad de Guanajuato [Cruz-Duarte, 2018]. Éstas tienen como propósito incrementar su desempeño operativo y lógica en la medición directa de la disipación de energía térmica de dispositivos microelectrónicos.

1.2.1. Objetivos específicos

1. Mejorar la sensibilidad del calorímetro no-convencional implementando una distribución óptima de sensores de temperatura dentro de las regiones internas, con acceso a los dos fluidos de trabajo (*i.e.*, agua y aire).
2. Proponer un modelo extendido e incremental del modelo teórico del calorímetro a través del cálculo fraccionario y de las mediciones obtenidas.

1.3. Justificación

Actualmente, las comunidades científicas e industriales se centran en el desarrollo y la utilización de nuevos materiales, dispositivos, arquitecturas, diseños y procesos de fabricación de sistemas microelectrónicos para satisfacer las necesidades digitales del mundo en la actual “Era de la Información” [He et al., 2010]. Para cualquier componente electrónico basado en silicio, la miniaturización de los dispositivos integrados, el aumento de la escala de integración y el incremento en las frecuencias de reloj dan lugar a severas repercusiones térmicas, “gracias” al bien conocido *Efecto Joule*. La interacción energética que ocurre en los componentes microelectrónicos es imposible de evitar, debido a la proximidad de éstos y la inherente transferencia de calor en los sistemas reales de la ingeniería. Por lo tanto, la apropiada disipación de potencia térmica debe ser considerada como una prioridad adicional durante la creación de nuevos sistemas, dándole el trato adecuado al problema de la gestión

de energía térmica en componentes microelectrónicos.

Es importante hacer hincapié en esta necesidad, al notar que se pueden tener flujos de calor altos, por ejemplo, en los sistemas de cómputo de alto rendimiento de radar y electrónica de potencia, en donde los flujos de calor son superiores a 1000 W/cm^2 [Kristen P and Bar-Cohen, 2012]. Hablando de dispositivos como tabletas electrónicas, teléfonos móviles y computadoras portátiles, se debe tomar muy en cuenta las temperaturas permitidas a las que pueden operar, por ejemplo, se estima que los chips de estos aparatos pueden trabajar a temperaturas que oscilan entre los 85 y 120 °C. Sin embargo, se debe pensar en las temperaturas toleradas por los humanos, que es de aproximadamente 45 °C, por lo que es indispensable tener un diseño de control térmico de estos dispositivos para que puedan ser lanzados al mercado [Associates, 1993]. Con investigaciones como éstas, se está dando paso a numerosos estudios que han mostrado que el uso de geometrías, fluidos y materiales alternativos mejoran drásticamente el desempeño de los disipadores de calor [Liu et al., 2013, Qazi Zade et al., 2011], siendo hoy en día, una de las soluciones más recurrentes para el tratamiento térmico.

No obstante, la implementación práctica de estos dispositivos resulta considerablemente costosa para implementación, por ello, al contar con dispositivos que nos permitan conocer la cantidad de energía disipada por cada componente, es posible darle el uso adecuado a cada uno, y saber qué dispositivos externos, para aminorar el calor disipado, se tienen que agregar o diseñar. Todo esto sin tener que hacer gastos extras en la generación de pruebas. Además de saber que estos dispositivos estarían hechos para las necesidades particulares del circuito microelectrónico.

Con base en la estrategia calorimétrica no-convencional para circuitos microelectrónicos, desarrollada e implementada en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) [Cruz-Duarte, 2018], el presente trabajo de investigación abordará el problema de reinstrumentación digital de este prototipo. El objetivo principal consiste en mejorar la sensibilidad y, a su vez, la precisión del sistema. Con ello, se planteará la configuración óptima para la red de sensores de temperatura dentro del calorímetro, empleando una mayor cantidad de sensores y diferentes configuraciones de posiciones para los mismos. Sin olvidar, realizar el ajuste óptimo del modelo propuesto utilizando el cálculo fraccionario como herramienta de análisis.

1.4. Organización de la tesis

La estructura de la tesis se organizó básicamente en cinco partes fundamentales, cuya información es organizada con base a una metodología que permita el cumplimiento de objetivos propuestos.

Capítulo 1: **Introducción**. Presenta un capítulo introductorio en donde se pone en contexto el tema de calorimetría a través de una breve descripción de la literatura existente. Se explican los objetivos, la motivación y la justificación que llevó a realizar este trabajo así como una breve reseña de cómo estará conformado.

Capítulo 2: **Fundamentos teóricos**. Se realiza una búsqueda en la literatura sobre calorimetría aplicada en diversos sistemas, haciendo énfasis en los sistemas eléctricos y/o electrónicos. Al mismo tiempo, se estudian los principios físicos básicos que éstos emplean y, se discute la metodología que permite analizar la instrumentación implementada para la medición continua de las variaciones de la temperatura en los componentes electrónicos.

Capítulo 3: **Modelo de calorímetro**. Se estudia el comportamiento de las mediciones de los sensores existentes en el prototipo base que se encuentra en el laboratorio de Telemática de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, DICIS, para mejorar su caracterización e identificar los factores más influyentes en la sensibilidad de medición. Los procesos discutidos en este capítulo pretenden mejorar el funcionamiento del calorímetro realizando cableado y conexión nueva, así como agregar más sensores a la red que nos permitan tener lecturas adicionales para analizar las curvas características y el tiempo de las nuevas mediciones. Posteriormente, se discute y plantea la distribución óptima de los sensores dentro del tanque con el fluido de trabajo y de la cámara principal con aire. Además, se consideran técnicas de cálculo fraccionario, así como técnicas de optimización y con ayuda de simulación numérica, para encontrar el índice y parámetros adecuados para tener el modelo óptimo teórico que ajuste al modelo resultante de los datos experimentales.

Capítulo 4: **Implementación y resultados experimentales**. Se estudian y analizan los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones incrementales de sensores. Además, se realizan un conjunto de comparaciones con la configuración original. Finalmente, se muestra el modelo encontrado por medio del cálculo fraccionario y utilizando los resultados experimentales obtenidos a través de las mediciones realizadas después de incluir todas las

mejoras al diseño original.

Capítulo 5: **Conclusiones generales**. Se analizan los resultados y se concluye alrededor de los procesos de mejora hechos. Además, se proponen nuevas perspectivas de trabajo.

2 Fundamentos teóricos

Las aplicaciones y el interés en los análisis térmicos y la calorimetría han incrementado en gran cantidad durante la última mitad del siglo XX. Parte de este interés se debe a la mejora en las metodologías de instrumentación apoyada por el uso de computadoras y procesos modernos de automatización, aunado a la versatilidad de estas técnicas, que las hace más atractivas ante los ingenieros e investigadores, que pueden ver en estas metodologías futuros usos. Las aplicaciones de estos métodos atañen a muchas áreas, por lo que se consideran altamente multidisciplinarios [Brown, 2008].

La base para desarrollar cualquier proyecto son los principios físicos que rigen su comportamiento y diseño. Si de calorímetros hablamos, es importante mencionar las leyes termodinámicas, que rigen el proceso de transferencia de calor y por lo tanto de la calorimetría. Estos son los temas a tratar en este capítulo.

En el sentido estricto de la palabra, calorimetría significa "*medición de calor*", que a su vez engloba el concepto de Análisis Térmico (AT) que corresponde al proceso de analizar el cambio en cualquier propiedad física que involucre una alteración en la temperatura de una muestra bajo estudio [Brown, 2008]. Estos conceptos mencionados en supra líneas son la base del dispositivo tratado en este trabajo de tesis. La calorimetría es una técnica de carácter termodinámico que permite conocer la cantidad de calor que involucra un determinado proceso, y que se relaciona con el contenido energético del sistema bajo estudio [Rodríguez et al., 2009]. Los principales métodos para el estudio de calorimetría son los que permiten medir cambios presentados en el calor, como sabemos, esta magnitud es difícil de cuantificar por la complejidad de sus procesos de transferencia y por las innumerables maneras en las que se manifiesta, además de que no es una propiedad física del sistema y tiene que medirse de manera indirecta, a diferencia de otras magnitudes que si son propiedades físicas, como por ejemplo: el color, las dimensiones, la masa y la densidad que son fácilmente

medibles. En algunos casos, las transformaciones de los materiales pueden afectar una o más propiedades termofísicas, sobre todo donde se envuelven reacciones químicas y que se altera la estructura química del material en donde podemos ver inmersa la transferencia de calor. También pudieran verse manifestados en procesos biológicos tales como el metabolismo, interacción o descomposición [Moran and Shapiro, 1999].

En los procesos antes mencionados se ve la importancia de la calorimetría, debido a que tiene la capacidad para reconocer esas diferencias sutiles ocurridas en los materiales que no son tan evidentes al usar cualquier otra técnica. Aunado a esto, se cuantifica el cambio en términos de velocidad (o rapidez) y la probabilidad de que ocurra un determinado cambio [Moran and Shapiro, 1999]. Sin embargo, para realizar una medición se necesita un instrumento de medida.

El calorímetro es el instrumento propiamente dicho usado en calorimetría para medir la cantidad de calor disipado o absorbido en una reacción química o física. Este dispositivo puede determinar el calor latente, específico y otras propiedades térmicas de las sustancias o materiales en estudio [Sensors, 2015]. La cantidad de calor disipada se mide a través de las diferencias de temperaturas que se manifiestan durante los procesos y a su vez estas variaciones (*i.e.*, diferencias) de temperaturas son medidas a través de diferentes mecanismos, como por ejemplo sensores de alta resolución y exactitud.

Para poder entender de una manera clara los usos y la composición de un calorímetro, además de apreciar de una mejor manera la utilidad de la calorimetría, es importante conocer los principios y conceptos de la termodinámica en que están basados estos dispositivos. Los principios más importantes son: *La Primera ley de la Termodinámica*, fenómenos físicos de transferencia de calor (convección, conducción y radiación), además de diversas leyes universales como la ley de la conservación de masa Brown [2008]. Otros conceptos como entalpía y trabajo son también analizados para poder tener un modelo representativo del calorímetro. El conjunto de todos ellos, modelan los cambios físicos y químicos que ocurren en este tipo de instrumentos. A su vez, el estudio del comportamiento de estos fenómenos nos ayuda a conocer los puntos de mayor interés a modo de mejorar y hacer la instrumentación correcta del dispositivo.

2.1. Principios fundamentales

Todo dispositivo desarrollado e implementado tiene un origen en las leyes físicas. A continuación se presenta una breve descripción de los principios antes mencionados utilizados para el modelado de un calorímetro.

2.1.1. Primera Ley de la Termodinámica

La energía es un concepto fundamental de la Termodinámica y un aspecto relevante en el análisis en ingeniería. Una idea básica es que la energía puede almacenarse dentro de los sistemas en diversas formas macroscópicas, además, puede también transformarse de una forma a otra y transferirse entre sistemas. Dicho de otra manera, la energía es la capacidad para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismo y en otros cuerpos. Para sistemas cerrados (como el tratado en este trabajo de investigación), la energía puede ser transferida por medio de trabajo y de calor. La cantidad total de energía se conserva en todas las transformaciones y transferencias. Tomando en cuenta el concepto de la conservación de la energía [Moran and Shapiro, 1999], el calor y el trabajo se relacionan por la Ec. (2-1),

$$Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sale}} + W_{\text{entra}} - W_{\text{sale}} = \Delta E_{\text{sis}} \quad (2-1)$$

Para ejemplificar el balance de energía en un sistema se muestra la Figura 2-1, en donde se puede observar un sistema en el que pueden existir varias fuentes que aportan calor y trabajo, así como varios elementos que lo liberan o consumen. Cada una de estas fuentes es considerada para el balance de energía. Así la Ec. (2-1) nos describe una variación de la energía, en cualquiera de sus formas, siendo igual a la cantidad de calor y trabajo neto que interactúan con el sistema. Podemos ver el calor como la energía necesaria para compensar las diferencias entre energía interna y trabajo. Recordando que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, entonces la energía de un sistema aislado es constante. Siguiendo el concepto de calor, en la siguiente sección se explica con más detalle.

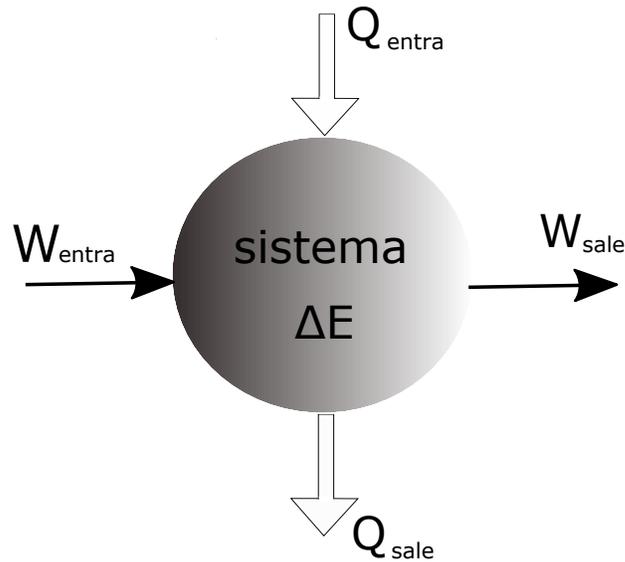


Figura 2-1: Representación gráfica del balance de energías en un sistema.

2.1.2. Transferencia de energía por calor

La cantidad denotada por W en la Ec. (2-1) se refiere a la cantidad de energía en un sistema por medios distintos al calor (Q), mientras Q solamente se genera como consecuencia de un cambio en la temperatura del sistema y su entorno y, de forma natural, se da en la dirección del descenso de temperatura, llamando a esto *transferencia de energía por calor*. El calor, no es una propiedad debido a que su valor depende de las características del proceso y no sólo de los estados inicial y final de éste [Moran and Shapiro, 1999]. Para encontrar la cantidad de energía en forma de calor en un determinado periodo de tiempo, se realiza por medio de la integral presentada en la Ec. (2-2)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt' = \int_{Q_1}^{Q_2} \delta Q' \quad (2-2)$$

En donde $\frac{\delta Q}{dt}$ es la tasa neta de transferencia de calor. En algunos casos, esta velocidad puede ser encontrada a través del flujo de calor \dot{q} , que es la velocidad de transferencia por unidad de superficie y que está relacionada con \dot{Q} mediante la Ec. (2-3), en donde dA es el área del sistema.

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} dA \quad (2-3)$$

Sin embargo, la forma más utilizada para conocer esta magnitud es por *La Primera de la Termodinámica*.

Modos de transferencia de calor

Existen diferentes mecanismos para calcular la transferencia de energía por calor. Los más comunes son *conducción*, *radiación* y *convección*.

- **CONDUCCIÓN.** Este tipo de transferencia aparece en cualquier tipo de medio debido a la transmisión de energía cinética a través de las moléculas del medio. La velocidad de transferencia de energía por conducción se calcula macroscópicamente por la ley de Fourier, definida como:

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (2-4)$$

en donde k , es la conductividad térmica que depende del material o sustancia en el medio. Un claro ejemplo de este mecanismo es cuando ponemos una cuchara a temperatura ambiente dentro de un plato con sopa caliente, aún en el fogón. El extremo sumergido en el líquido tendrá una mayor temperatura que el extremo por fuera de él. Esta diferencia de temperatura en el mismo cuerpo de la cuchara irá decreciendo a medida que pase el tiempo debido a la conducción de calor. Al cabo de algunos minutos, la cuchara tendrá la misma temperatura que la sopa (*i.e.*, Ley Cero de la Termodinámica).

- **RADIACIÓN.** La energía por radiación se transporta mediante ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción, la radiación térmica no requiere soporte para propagarse y puede tener lugar incluso en el vacío. Por este motivo, cualquier fluido o sólido emiten, absorben y transmiten radiación térmica en grados distintos. La tasa de transferencia se calcula mediante la *Ley de Stefan-Boltzmann* enunciada en la Ec. (2-5)

$$\dot{Q}_e = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_o^4). \quad (2-5)$$

Esta ecuación nos muestra la radiación térmica en función de la cuarta potencia de la temperatura, un término de emisividad ϵ que es una propiedad de la superficie y σ que es la constante de Stefan-Boltzmann. Un ejemplo de este mecanismo es la radiación ultravioleta solar, proceso por el que se estima la temperatura terrestre, o bien, la luz

emitida por una lámpara incandescente.

- **CONVECCIÓN.** Se le llama convección a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido, ambos a diferentes temperaturas. Se puede decir que este mecanismo está compuesto por los dos anteriores. La tasa de transferencia de calor desde la superficie al fluido puede calcularse por medio de la *Ley de enfriamiento de Newton*

$$\dot{Q}_c = hA(T_s - T_f). \quad (2-6)$$

En la Ec. (2-6), A es el área de la superficie, T_s la temperatura de la misma, T_f la temperatura del fluido y h el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente de película. Este último factor varía (generalmente es mayor) cuando el fluido recibe una fuerza externa para provocar su movimiento, a cuando el movimiento del fluido es natural, de aquí se derivan los conceptos de convección natural y convección forzada. Ejemplos de este tipo de mecanismo es la transferencia de calor de agua caliente en un sartén (convección natural), o una secadora de cabello, que transmite calor por convección forzada.

Para poder realizar un análisis adecuado de transferencia de calor, lo primero que se tiene que identificar es la frontera del sistema bajo estudio, ya que allí se lleva a cabo el mecanismo de transferencia. Para la calorimetría se pueden considerar dos “modos”, la convección y la conducción, como se detalla a continuación.

2.2. El calorímetro convencional

La historia del calorímetro se remonta al primer calorímetro construido por Joseph Black, un químico en Edinburgh, hace más de 200 años [Weber, 1974]. Este primer diseño era sorprendentemente simple y potente, debido a ello la calorimetría moderna no ha abandonado este concepto. Un calorímetro convencional está compuesto básicamente por dos regiones: la “muestra” que es el proceso bajo investigación a una temperatura T , ya sea una reacción o un cambio de fase, así como los recipientes calentadores y los termómetros que pudieran estar asociados a la muestra, y el “entorno” que se refiere a la región controlada de la muestra con una determinada temperatura T_a . Puede llegar a existir un control activo de temperatura

de los alrededores, o puede ser también pasivo como en el caso de los disipadores de calor. La medición elemental que se tiene que llevar a cabo en estos dispositivos es la diferencia de temperaturas entre T y T_a como funciones dependientes del tiempo [Haines, 2002].

Básicamente, un calorímetro está basado en la medición de calor disipado por alguna fuente dentro de una cámara de medición. Este sistema calorimétrico idealmente tiene paredes adiabáticas para garantizar que la disipación de energía se detecte como el aumento de temperatura dentro de la cámara de medición sin tener alguna otra perturbación del exterior. El material del que se elabora la cámara de medición es un factor muy importante debido a que debe tener la capacidad suficiente para conducir el calor. Además, el calor disipado en la cámara debe ser transportado fuera de la cámara de medición, por lo que debe acoplarse un medio para almacenar esa energía, siendo el agua el fluido más común para esta parte del calorímetro debido a la estabilidad de sus propiedades de líquido comprimido.

El primer calorímetro del que se tiene evidencia fue el utilizado por Lavoisier y Laplace en 1783, cuando midieron el cambio en el calor de un cuerpo caliente para fundir una cantidad determinada de hielo (representado en la Figura 2-2). En este dispositivo se esperaba hasta que el cuerpo caliente estuviera a la temperatura del hielo (*Ley Cero de la termodinámica*), y después se determinaba la masa del hielo derretido [González et al., 2010].

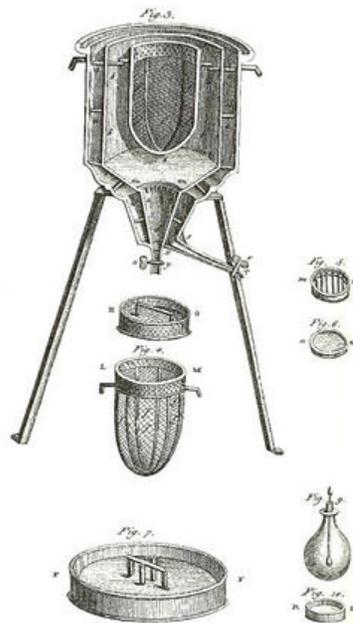


Figura 2-2: Primer calorímetro implementado. Imagen de origen en [González et al., 2010]

Así, un calorímetro convencional se muestra en la Figura 2-3, en la que se describen las principales partes que conforman a un calorímetro: (1) recipiente Dewar, (2) refrigerante,

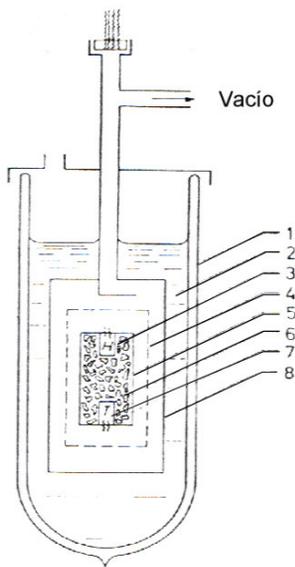


Figura 2-3: Calorímetro convencional. Imagen de origen en [González et al., 2010]

(3) calefactor, (4) escudo, (5) celda, (6) muestra, (7) termómetro y (8) recipiente evacuado. Estos calorímetros son utilizados principalmente para reacciones o sustancias químicas, [González et al., 2010].

Existen cinco tipos principales de calorímetros convencionales que se describen brevemente a continuación.

2.2.1. Calorímetro de bomba

El principio de funcionamiento de este dispositivo es la acumulación de calor y su modo de operación es adiabático. Es un calorímetro que trabaja a volumen constante, usado generalmente para medir el calor liberado en reacciones como la combustión. La bomba de este calorímetro muestra un incremento en la temperatura después de la ignición de la muestra. La estructura general de este calorímetro se muestra en la Figura 2-4. Para tener un mayor control del sistema también se toma en cuenta la temperatura de los alrededores, además de utilizar un mezclador para homogeneizar la temperatura del fluido [Brown, 2008].

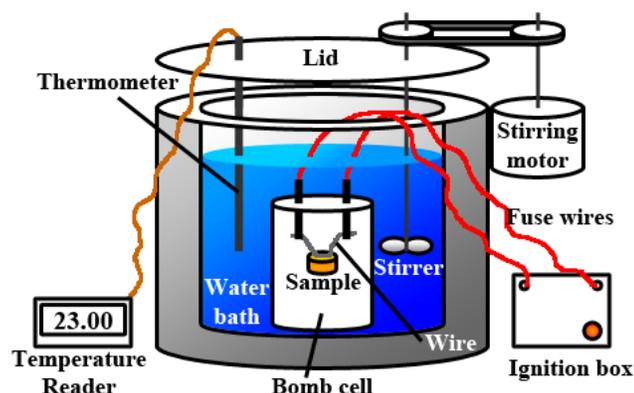


Figura 2-4: Calorímetro de bomba. ©. Lisdavid [2012. Accessed May 20, 2020]

2.2.2. Calorímetro de reacción

Este tipo de calorímetros miden la cantidad de calor disipada o absorbida durante una reacción. La detección del calor en este dispositivo está basada en un sensor tridimensional de flujo. Este sensor tiene un anillo de termopares en serie alrededor del espacio experimental, lo que garantiza una captación casi completa del calor debido al arreglo radial. A diferencia del calorímetro de bomba que está especialmente diseñado para medir calores de combustión, el de reacción mide, como lo dice su nombre, los calores de reacción en disoluciones acuosas [Encyclopedia, 2013. Accessed February 3, 2020]. La estructura más básica de este tipo de calorímetro se presenta en la Figura 2-5.

2.2.3. Calorímetro de escaneo diferencial

En este dispositivo, la muestra se encuentra contenida en una pequeña cápsula de aluminio o bandeja, en donde el flujo de calor es medido de forma diferencial, entre el horno y la muestra y entre el horno y la referencia. Estas medidas son tomadas con termómetros de resistencia de platino, obteniendo como medida la capacidad calorífica c_p [J/K] (refiérase a la Figura 2-6). El principio de funcionamiento es la compensación del calor, es decir, el calor medido es compensado por energía eléctrica, tomando en cuenta, además de los incrementos de temperatura, la potencia consumida para lograr esos incrementos, detalle que lo diferencia de los demás [Brown, 2008].

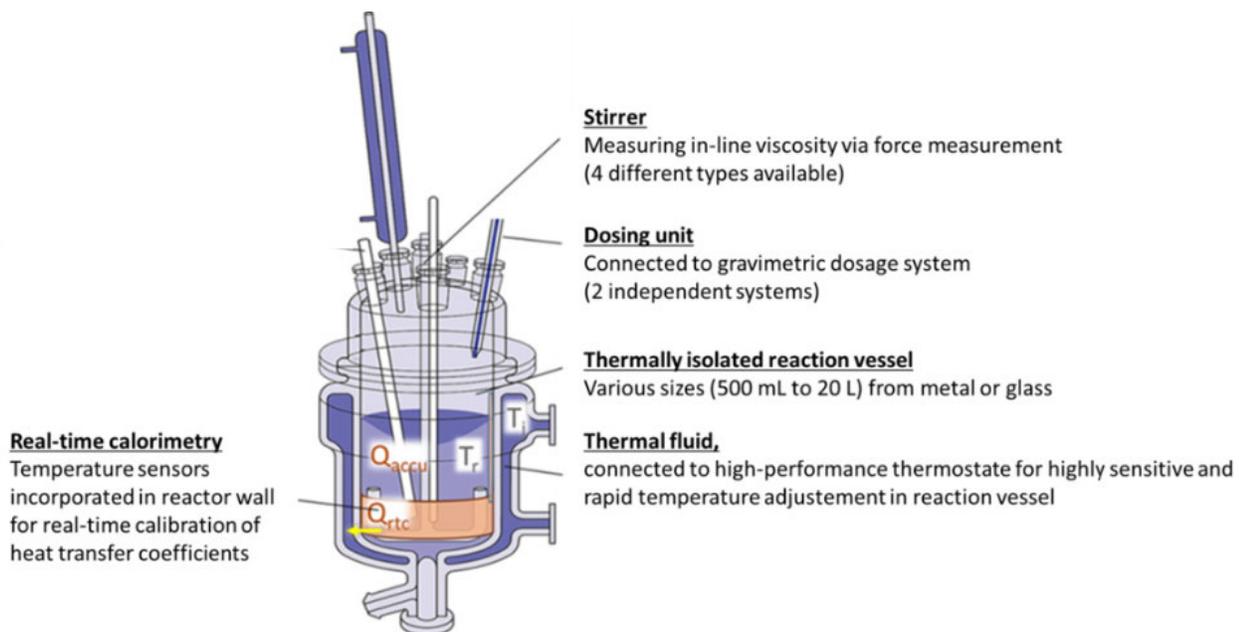


Figura 2-5: Calorímetro de reacción. Imagen de origen en [Kandelbauer and Lehnert, 2018]

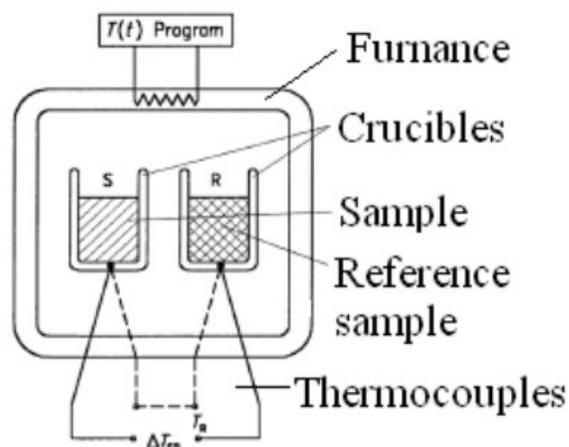


Figura 2-6: Calorímetro de escaneo diferencial. Imagen de origen en [Kasala et al., 2010]

2.2.4. Calorímetro a presión constante

Un calorímetro a presión constante mide el cambio en la entalpía de una reacción, ocurriendo en una solución en donde la presión atmosférica permanece constante pero el volumen cambia mientras que el proceso ocurre. Este tipo de dispositivo es un instrumento sencillo utilizado generalmente para determinar los cambios de calor en reacciones de

neutralizaciones ácido-base y calores de disolución y dilución [Nogent and Tacon, 2002].

2.2.5. Calorímetro adiabático

Este tipo de calorímetros son utilizados para reacciones espontáneas donde cualquier cambio de temperatura en la secuencia de la reacción y/o cualquier cambio que pueda generar el material bajo análisis, es detectado de inmediato gracias al medio adiabático en se encuentra [Brown, 2008]. Una estructura general de este calorímetro es presentada en la Figura ??.

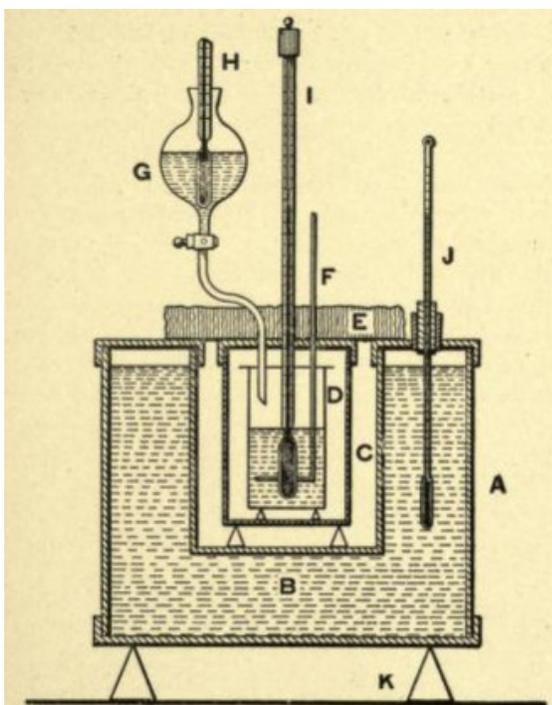


Figura 2-7: Calorímetro adiabático. ©. Nevil Monroe Hopkins [1905. Accessed May 20, 2020]

Los calorímetros también pueden clasificarse de acuerdo a dos criterios, como se puede observar en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Clasificación de calorímetros [Wonhee et al., 2012]

Criterio Primario	Criterio Secundario
Principio de Medición	Compensación de calor
	Acumulación de calor
	Intercambio de calor
Modo de operación	Estático
	Isotérmico
	Isoperibólico
	Adiabático
	Dinámico
	Escaneo de alrededores
	Escaneo isoperibólico
	Escaneo adiabático
Principio de construcción	Cámara de medición individual
	Cámara de medición doble o diferencial

2.3. Aplicaciones de los calorímetros

La calorimetría ha encontrado valor en su capacidad para reconocer diferencias sutiles en los materiales que no pueden ser apreciadas a simple vista, además de que no son evidentes con alguna otra técnica o método. Como ya se ha mencionado, la calorimetría permite determinar el intercambio de calor que ocurre en una reacción química u otro proceso, permitiendo así, entender el mecanismo del proceso que se está analizando. Los avances en la electrónica y el desarrollo de nuevos calorímetros han cambiado la situación de aplicaciones de la calorimetría. Actualmente estos dispositivos tienen un amplio uso para la caracterización física y química diaria de materiales dentro de una vasta gama de aplicaciones de investigación, siendo la alta sensibilidad y estabilidad de la señal medida durante largos periodos de tiempo características que hacen a los calorímetros adecuados para el estudio del cambio de temperatura [Haines, 2002].

Algunas aplicaciones de la calorimetría son:

1. Medición de la cantidad de calor absorbido o disipado en una reacción química o un proceso físico.
2. Un calorímetro puede medir exactamente la temperatura de una sustancia u objeto en estudio antes y después de que los cambios ocurren, así como la magnitud de calor que se intercambia con los alrededores.
3. Se pueden determinar características de los materiales, por ejemplo, sustancias peligrosas en las que se necesita saber si cumplen las normas y si es seguro y apropiado su uso.
4. Los calorímetros se pueden usar para medir el crecimiento de bacterias y el cultivo de levadura. Por ejemplo, se aprovecha la característica adiabática del calorímetro para hacer crecer colonias de bacterias (como *Enterococcus faecalis* o *Klebsiella pneumoniae*) a diferentes condiciones y examinar diferentes características de estas, como pH y densidad, y encontrar tratamientos para contrarrestar infecciones.
5. El campo de la ingeniería química es uno de los que más requiere el uso de calorímetros en el proceso de seguridad, conservación de alimentos, medición de calor en eventos de enlaces moleculares y en la unidad de operación. Además de servir para determinar la concentración de algunas sustancias en composiciones muy complejas.

Después de haber introducido brevemente la calorimetría, se presenta una descripción sucinta del cálculo fraccionario y su utilización en el modelado de sistemas.

2.4. Cálculo Fraccionario

El cálculo fraccionario es una poderosa herramienta utilizada para modelar sistemas complejos. Hoy en día los científicos pueden describir y modelar los fenómenos físicos con ecuaciones diferenciales ordinarias, pero en muchos casos, el cálculo clásico no es suficiente para tener un modelo real del sistema. En estos casos, es útil la aplicación del cálculo fraccionario para explicar y verificar los fenómenos que no son modelados satisfactoriamente con métodos clásicos. Este cálculo no es más que la generalización del cálculo clásico, en el que el orden de derivación y/o integración son fraccionarios y no solamente enteros [Guia-Calderon et al., 2015].

En la actualidad, existen diferentes formas de operadores fraccionarios [Mihailo et al., 2019]. Algunos de los más utilizados son Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov, Caputo, Weyl y Erdely-Kober. Cada una de estas variantes de operadores tienen diferentes propiedades, además de que se pueden ajustar para tener un modelo matemático más acorde a lo que se busca o que facilite su análisis. En este trabajo se utilizó la variante del operador diferencial de Riemann-Liouville, que es la derivada de Caputo-Dzhrbashyan, esta es representada como ${}^C D_t^\alpha f(t)$ y definida por:

$${}^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} \left. \frac{df}{d\tau} \right|_{t=\tau} d\tau, \quad \alpha \in [0, 1], \quad (2-7)$$

La Ec. (2-7) se usa con frecuencia en la actualidad debido a que, según los expertos, añade una nueva dimensión al estudio del cálculo fraccionario dado que integra un kernel de transformación singular [Caputo, 1967]. Este operador es trabajado y nombrado por simplicidad como CD . Además, para poder seguir trabajando con el cálculo fraccionario, también se necesita de la transformada de Laplace, generalmente aplicada al operador utilizado durante el proceso. Recordando que la definición matemática clásica del operador de Laplace está dado por la Ec. (2-8):

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt, \quad (2-8)$$

La transformada de Laplace para el caso de derivadas fraccionarias en el sentido de CD está representada por la siguiente relación, Ec. (2-9)

$$\mathcal{L}\{{}^C D^\alpha f(t)\} = s^\alpha F(s) - f(0), \quad \alpha \in [0, 1] \quad (2-9)$$

la cual nos sirve para transformar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Muchas veces este último nos sirve para poder realizar manipulaciones matemáticas más simples. Posteriormente, para volver a llevarnos al dominio del tiempo, debemos realizar la transformada inversa de Laplace, definida por la Ec. (2-10)

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi j} \lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} F(s)e^{st} ds \quad (2-10)$$

En este caso, la función fraccionaria exponencial involucrada es la *función de Mittag-Leffler de tres parámetros o de Prabhakar*, que cuenta con tres parámetros que son α , β , y γ . Ésta

se representa como $E_{\alpha,\beta}^{\gamma}$ [Garra and Garrappa, 2019]. Para poner en contexto esta función, su definición es la siguiente:

$$E_{\alpha,\beta}^{\gamma}(z) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\gamma + k)z^k}{k!\Gamma(\alpha k + \beta)}, \quad \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C}, \Re(\alpha) > 0. \quad (2-11)$$

Esta función fue introducida a principios del siglo XIX por el matemático Magnus Gustaf Mittag-Leffler. El principal interés de estudio de esta función está relacionado a la importancia que presenta en el cálculo fraccionario, sobre todo cuando se trata de describir sistemas o fenómenos que implican propiedades dieléctricas, ecuaciones no lineales, conducción de calor, así como en problemas con condiciones iniciales [Garra and Garrappa, 2019].

Por la complejidad y dependencia de los parámetros, esta función aún no se encuentra perfectamente estandarizada y estudios recientes proponen nuevas propiedades y usos de ella. Sin embargo, se sabe que existe una relación directa entre cada uno de estos tres parámetros, y que cuando los tres tienen el valor de 1, la función es la función exponencial e^x . Por efectos de estudio, en este trabajo solamente se tomará en cuenta la variación del parámetro α y β por lo que representaremos la función de ML como $E_{\alpha,\beta}$. Esta ecuación biparamétrica se define de la siguiente manera:

$$E_{\alpha,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}. \quad (2-12)$$

2.5. Algoritmo Levenberg-Marquardt (LM)

Los algoritmos de optimización nos ayudan a seleccionar el mejor elemento (valor óptimo) con respecto a algún criterio, para el problema que se esté resolviendo, ya sea minimizando o maximizando la función que representa dicha situación. Para este trabajo de tesis, se necesitó de la optimización para realizar ajustes con el menor error entre las curvas obtenidas de manera experimental y teórica, encontrando el valor óptimo para el orden de la ecuación en el modelo fraccionario (que se describe en la siguiente sección).

El algoritmo de optimización Levenberg-Marquardt, se presenta como la combinación

de dos conocidos algoritmos, el de descenso del gradiente de Gauss y el de Gauss-Newton, lo que lo convierte en uno de los algoritmos más utilizados y robustos por las características que posee, principalmente porque en muchos casos puede encontrar una solución incluso comenzando la “búsqueda” muy lejos del valor mínimo final. El problema que resuelve este algoritmo trata la minimización de los mínimos cuadrados no lineales [Ranganathan, 2004].

Los problemas de minimización surgen generalmente en casos de ajustes de curvas, que es para lo que fue utilizado en este trabajo de tesis. Esto es, para encontrar los valores óptimos para algunos términos que ayudaran a ajustar de una manera más cercana el modelo fraccionario al modelo experimental. Utilizando en nuestras ecuaciones el valor óptimo para α con el fin de encontrar el error mínimo de la suma de errores cuadráticos, como se establece en la Ec. (2-13)

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\operatorname{argmín}} S(\alpha) = \underset{\alpha}{\operatorname{argmín}} \left\{ \sum_{i=1}^m [y_i - f(\alpha, \mathbf{x}_i)]^2 \right\}, \quad (2-13)$$

donde, $S(\alpha)$ es la suma de errores cuadráticos o desviaciones, y_i y x_i son los datos experimentales previamente obtenidos, $f(\alpha, x_i)$ son los valores estimados, los cuales son obtenidos por la función que modela el comportamiento de los datos (x_i, y_i) según el vector de parámetros α .

El algoritmo Levenberg-Marquardt viene formalmente definido por la siguiente ecuación de recurrencia,

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \operatorname{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})]^{-1} \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - f(\alpha, \mathbf{x})], \quad (2-14)$$

donde \mathbf{J} es el gradiente de la función $f(\alpha, X)$ y λ es un factor de amortiguamiento. Además, X y Y son los vectores con componente i que se está analizando.

3 Modelo del calorímetro

Para lograr una mejor correspondencia entre el modelo matemático teórico con el comportamiento experimental, se realizaron una serie de pruebas con el dispositivo construido e instrumentado. Adicionalmente, se utilizó el cálculo fraccionario, para encontrar un modelo que se ajustara al comportamiento experimental del calor mediante la modificación del parámetro α en la función de ML [Garra and Garrappa, 2019]. Este modelo se obtuvo a través de la definición de Caputo-Dzharbayhan [Caputo, 1967], utilizada debido a que nos permite tratar problemas con condiciones iniciales, cosa que otros modelos, a pesar de ser más conocidos y estudiados, no lo permiten. Para realizar el acercamiento de los modelos tradicional y fraccionario se hizo una caracterización con la ecuación de transferencia de calor de Fourier, en donde se utilizaron datos experimentales, para después encontrar el valor óptimo del parámetro α de la función especial de ML a través del método de optimización Levenberg-Marquardt (LM) [Ranganathan, 2004].

3.1. Modelado matemático del calorímetro

El sistema para el modelo matemático se define de acuerdo a la Figura 3-1 en la que podemos observar las partes principales del sistema como las cámaras con fluidos diferentes, el disipador de calor, el medio en el que se encuentra que es un entorno de aislamiento y un universo representando por el medio ambiente que rodea al calorímetro con una temperatura T_a .

Para llevar a cabo el modelado matemático del calorímetro se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones [Cruz-Duarte, 2018]:

- El sistema opera en estado estable.

- El sistema se construyó con materiales macroscópicamente isotrópicos y excelentes conductores térmicos.
- El fluido posee propiedades termofísicas constantes.
- La energía disipada por el dispositivo de prueba se transfiere completamente hacia el fluido de trabajo.
- El flujo de calor se considera uniforme y constante.
- Los cambios energéticos son despreciables con respecto a la radiación térmica, las fugas al exterior, la energía cinética y potencial.
- El régimen del fluido completamente desarrollado.
- La masa y densidad del fluido permanecen constantes.

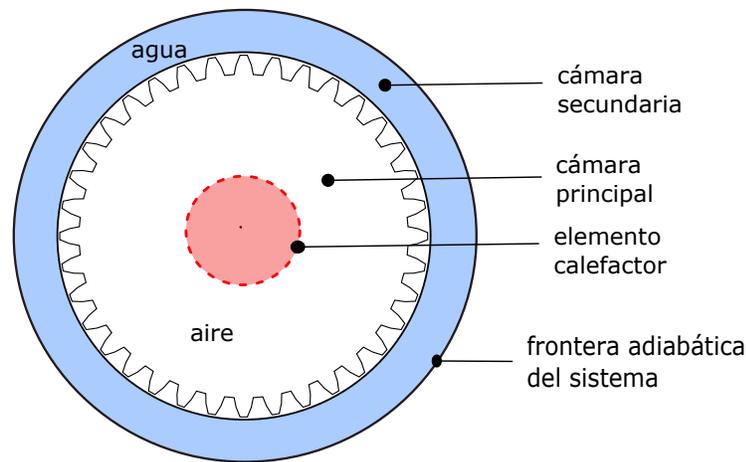


Figura 3-1: Calorímetro como sistema termodinámico bajo estudio.

Tomadas en cuenta estas consideraciones, la manera más sencilla de modelar el cambio de temperatura que ocurre dentro del calorímetro es mediante un balance de energía y masa, para lo que se utiliza la Primera Ley de la Termodinámica presentada en la Ec. (3-1):

$$\Delta E = \left(\sum Q_i \right)_{entra} - \left(\sum Q_i \right)_{sale} + \left(\sum W_i \right)_{entra} - \left(\sum W_i \right)_{sale} \quad (3-1)$$

Así como, el Principio de Conservación de masa, referente a la Ec. (3-2):

$$\left(\sum_i \dot{m}_i \right)_{entra} - \left(\sum_i \dot{m}_i \right)_{sale} = \Delta \dot{m}_{sis} \quad (3-2)$$

Retomando la Ec. (3-1) podemos eliminar el término correspondiente al trabajo debido a que este sistema no interactúa con ningún tipo de esta energía, con lo cual se obtiene la Ec. (3-3), lo que nos dice que el cambio de energía dentro del sistema (calorímetro) es directamente proporcional al calor generado por el circuito microelectrónico.

$$\Delta E = Q. \quad (3-3)$$

Ahora bien, bajo la suposición de que no existe un cambio de masa y de que existe una propiedad característica para cada sustancia relacionada con la transferencia de calor llamada calor específico (c [J/kg·K]) y que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad. Este término lo utilizó por primera vez el profesor Joseph Black (1728-1799) en 1760, considerando esta aportación como el comienzo de la calorimetría como ciencia. [Cengel and Boles, 2006]. Tanto la Ec. (3-2), como la Ec. (3-3) son esenciales para el modelado del calorímetro, por lo que podemos combinar ambas expresiones con la suposición anterior y encontrar una nueva relación para el balance de energía en un sistema cerrado como se muestra en la Ec. (3-4):

$$Q = mc\Delta T, \quad (3-4)$$

Sin embargo, la Ec. (3-4) no es suficiente para saber el comportamiento del calor. Según la Ley de Fourier, el flujo de calor \dot{Q} en un material isotrópico está dado por la Ec. (3-5), en donde λ es la conductividad térmica:

$$\frac{\delta Q}{dt} = -\lambda \frac{\Delta T}{dx}, \quad (3-5)$$

La conductividad térmica, es una capacidad física de los materiales que mide la capacidad que estos tienen para la conducción de calor, además, dentro de esta capacidad influye también la resistencia que se crea naturalmente en el material de transferencia al paso del calor. Para este tipo de situaciones, la ley de Fourier se enuncia de la manera

mostrada en la Ec. (3-6):

$$Q = \alpha A \Delta T \Delta t \quad (3-6)$$

en donde α [W/m²·K] es el coeficiente de transferencia de calor y A [m²] es la sección transversal de la sección que atraviesa el flujo de calor. Entonces, nos encontramos con el problema de que no conocemos la resistencia del calorímetro, y que para calcular el valor de α necesitamos saber la densidad del flujo de calor y es completamente desconocida. Si bien, pudiéramos calcular la resistencia planteando el modelo tomando en cuenta los mecanismos de transferencia de calor [Cruz-Duarte, 2018]. Por simplicidad en el método, se optó por trabajar con un modelo térmico equivalente utilizando un valor estimado para esta resistencia.

3.2. Modelo térmico equivalente

Cuando hablamos de modelos térmicos, existen algunas variables complejas de modelar o que implican conocimientos muy específicos de transferencia de calor. Además, para áreas afines a la electrónica es más fácil modelar sistemas eléctricos que sistemas térmicos. Por eso se decidió encontrar el modelo eléctrico equivalente a nuestro sistema. Existen en la literatura las equivalencias directas que se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Relación de equivalencias del modelo Térmico-Eléctrico [Stosur et al., 2014].

Q Calor [J]	\dot{Q} Flujo de calor [W]	C_θ Capacidad calorífica [J/K]	R_θ Resistencia térmica [K/W]	θ Temperatura [K]
q Carga [C]	I Corriente [A]	C Capacitancia [F]	R Resistencia [Ω]	V Tensión [V]

Para tener un modelo matemático térmico se plantean primero las ecuaciones en función de las variables térmicas que nos interesan. Por ejemplo, la resistencia térmica R_θ [K/W] en función del cambio de temperatura y del calor,

$$R_\theta = \frac{\Delta T}{\dot{Q}}. \quad (3-7)$$

De la misma manera, la capacidad calorífica representa la habilidad para almacenar calor en respuesta a un cambio de temperatura dado, lo cual es representado por (3-8),

$$C_\theta = \frac{Q}{\Delta T} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]. \quad (3-8)$$

En otras palabras, esta capacidad es la razón entre la cantidad de calor que pierde o absorbe un objeto y su cambio de temperaturas. Para trabajar este circuito se consideró un solo nodo y los componentes principales de la Tabla 3-1, dando origen al esquema mostrado por la Figura 3-2.

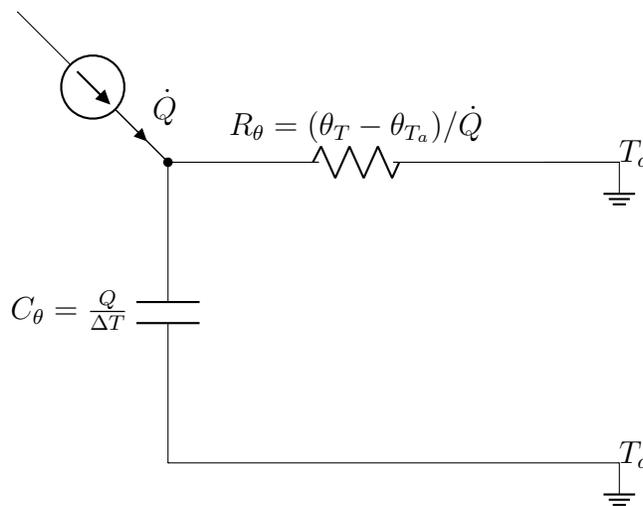


Figura 3-2: Modelo eléctrico equivalente del modelo térmico.

El diagrama en la Figura 3-2 nos muestra el circuito eléctrico equivalente de nuestro sistema térmico con el que es factible realizar un análisis circuital. Al suponer dos corrientes salientes y la corriente entrante de la fuente, se obtiene la Ec. (3-9),

$$C \frac{d}{dt} \theta(t) + \frac{1}{R} \theta(t) = \dot{Q} h(t). \quad (3-9)$$

La Ec. (3-9) representa el modelo eléctrico equivalente en donde $h(t)$ es la función escalón de Heaviside. Este modelo es el mismo que se utilizará en las siguientes secciones para mejorar y ajustar a un modelo fraccionario. Cabe mencionar que para fines prácticos en el circuito eléctrico θ representa la temperatura.

3.3. Instrumentación electrónica original

El prototipo utilizado para este trabajo de tesis fue propuesto y construido en [Cruz-Duarte, 2018]. Este se encuentra físicamente en la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. El prototipo fue instrumentado con sensores distribuidos geoméricamente alrededor del cilindro que compone la estructura interna del calorímetro. Los componentes utilizados fueron los sensores de temperatura DS18B20 con mediciones en °C con la tecnología *1-Wire*. Estos dispositivos son ideales para ambientes controlados, supervisión o monitoreo de sistemas de temperatura dentro de construcciones, equipos o maquinaria y sistemas de control de procesos. Estos sensores fueron utilizados en su versión normal de integrado TO-92 para la cámara principal, donde hay aire como fluido de trabajo, y su versión sumergible para la cámara secundaria donde encontramos agua como fluido de trabajo. La configuración de esta versión de empaquetado se basa en tres terminales (*i.e.*, GND, DQ y V_{DD}) como se muestra en la Figura 3-3.

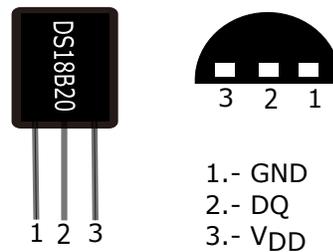


Figura 3-3: Pines de configuración del sensor de temperatura instrumentado.

Como se sobreentiende, el pin 1 es la conexión a tierra, el pin 2 es para la transmisión de datos, y el pin 3 es el de alimentación. A continuación se enuncian las propiedades más importantes de este dispositivo, que resultan de mayor interés para este estudio:

- Rango de operación de -55°C a 125°C .
- Alimentado entre 3.3 V y 5 V.
- Resolución programable desde 9 hasta 12 bits.
- Exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en el rango de medición de -10°C a 85°C , $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en el rango

de -30°C a 100°C y de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en el rango de -55°C a 125°C .

- Modo de energía parásita, en caso de requerirse, dos pines de operación (DQ y GND)
- No requiere componentes externos.

En el prototipo de DICIS-UG se contaba inicialmente con seis sensores DS18B20, tres colocados dentro de la cámara principal con aire, y los otros tres dentro de la cámara secundaria con agua como fluido de trabajo. La distribución original de estos sensores es como se muestra en la Figura 3-4. Es importante mencionar que los datos son obtenidos a

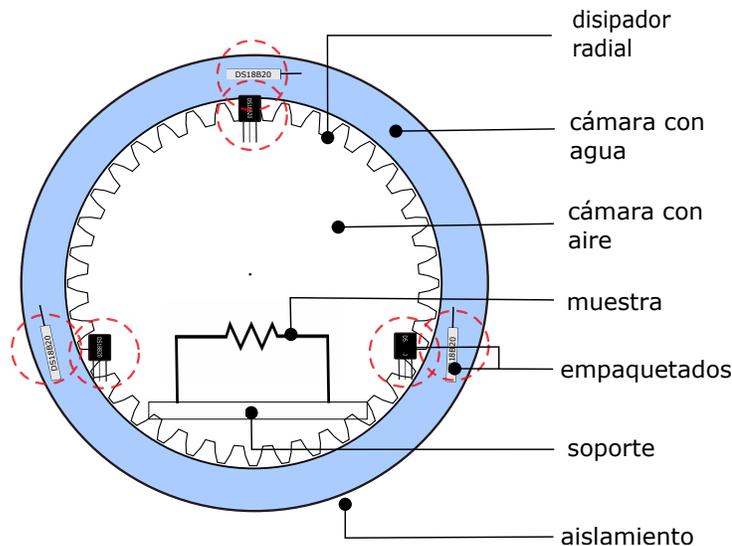


Figura 3-4: Distribución de sensores en configuración original del Calorímetro UG.

través de la conexión de puertos GPIO de una *Raspberry Pi Zero*, que a su vez se encuentra conectada de manera inalámbrica por medio de red de WiFi a una computadora, la cual, nos muestra los resultados en tiempo real en la terminal del sistema operativo.

Sin embargo, desde un principio se observó que esta cantidad y configuración de sensores se podía incrementar y modificar para mejorar la calidad de la medición del calor. Se realizaron pruebas con las mediciones originales, como se muestra en las Figuras 3-5 y 3-6, observando que el comportamiento no es completamente el deseado, al no ser una curva suave y monótona. En primer instancia podemos observar en estas figuras que existe una falla en el aislamiento que nos provoca caída de temperatura, incluso en la cámara principal. En la Figura 3-5 se muestra el comportamiento general de los sensores, tanto en

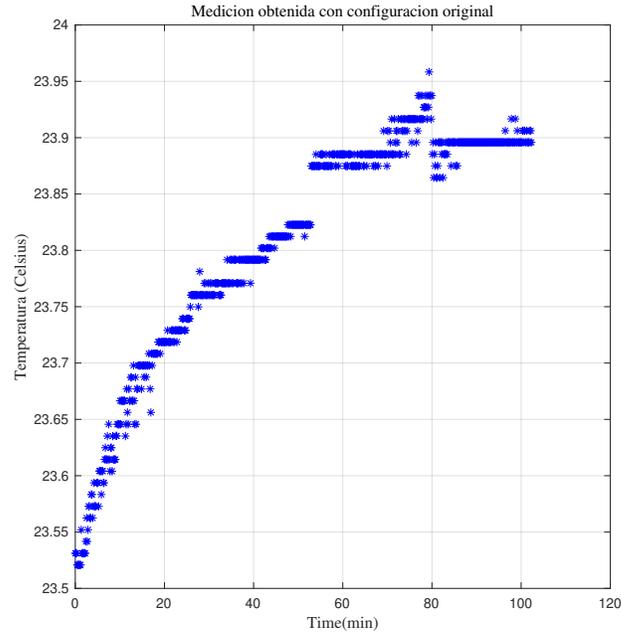


Figura 3-5: Gráfica de medición de la temperatura en la distribución original de sensores.

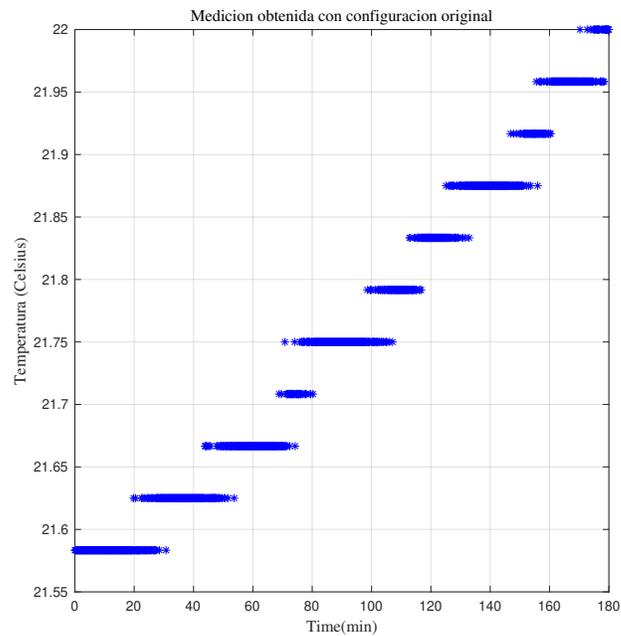


Figura 3-6: Medición de sensores de temperatura en agua.

agua como en aire, observando un comportamiento esperado del fluido pero no el deseable. En la Figura 3-6 se puede notar el comportamiento escalonado de las mediciones (solamente en agua), este comportamiento se debe a que los sensores están programados para muestrear

en un determinado tiempo y con una cantidad específica de datos para mostrar debido a su naturaleza digital. Hechas estas observaciones, se procedieron a realizar las mejoras que se creyeron convenientes a la instrumentación.

3.4. Mejoras al modelo e instrumentación

3.4.1. Mejoras propuestas al modelo original

Para este efecto, fueron utilizadas las herramientas del cálculo fraccionario para encontrar el modelo del calorímetro adecuado con el fin de poder ajustar el modelo teórico al modelo experimental, al basarse exclusivamente en los resultados de las mediciones realizadas. En primer instancia se hizo uso de la derivada fraccionaria propuesta por Caputo-Dzhrbashyan, esta, es una derivada fraccionaria que ha agregado una nueva dimensión al estudio de las ecuaciones diferenciales. Aunado a lo anterior, se hizo uso de la función de Mittag-Leffler, la cual da origen a una función exponencial especial dependiente de dos parámetros, $E_{\alpha,\beta}$.

Modelo Ordinario

Basado en el modelo presentando en [Cruz-Duarte, 2018] y teniendo en consideración la ecuación diferencial Ec. (3-9), se identificó como variable dependiente, la temperatura θ y como variable independiente, el tiempo t asumiendo a R_θ y C_θ como valores constantes. Se procede a adimensionalizar propiamente la ecuación a través del cambio de variables mostrado a continuación,

$$\theta = \tilde{\theta}\Theta, \quad (3-10)$$

$$t = \tilde{t}\tau. \quad (3-11)$$

Siendo Θ [°C] y τ [s] dos parámetros característicos del sistema, mientras que $\tilde{\theta}$ y \tilde{t} son adimensionales. Realizando la sustitución de los parámetros de (3-10) y (3-11) en (3-9)

se obtiene lo siguiente:

$$C_\theta \frac{\Theta}{\tau} \frac{d\tilde{\theta}}{d\tilde{t}} + \frac{1}{R_\theta} \Theta \tilde{\theta} = \dot{Q}(\tilde{t}). \quad (3-12)$$

Al dividir esta ecuación entre el coeficiente del término de la máxima derivada $C_\theta \cdot \Theta / \tau$, obtenemos la Ec. (3-13),

$$\frac{d\tilde{\theta}}{d\tilde{t}} + \frac{\tau}{RC} \tilde{\theta} = \frac{\tau}{C\Theta} \dot{Q}_0 h(\tilde{t}), \quad (3-13)$$

siendo $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 h(t)$, con \dot{Q}_0 como una constante y $h(t)$ la función escalón unitario. Ahora bien, ya que nuestro sistema es causal, podemos omitir la función escalón en el modelo presentado en la Ec. (3-13). Con el objeto de adimensionalizar la Ec. (3-13) los coeficientes de esta se igualan a la unidad y posteriormente, se encuentran las equivalencias de estos términos en función de las mismas constantes,

$$\frac{\tau}{RC} = 1 \quad \longrightarrow \quad \tau = RC, \quad (3-14)$$

$$\frac{\tau \dot{Q}_0}{C\Theta} = \frac{R\dot{Q}_0}{\Theta} = 1 \quad \longrightarrow \quad \Theta = R\dot{Q}_0. \quad (3-15)$$

Al realizar las sustituciones de (3-14) y (3-15) en (3-13) se obtiene la ecuación adimensional del modelo simplificado,

$$\frac{d\tilde{\theta}}{d\tilde{t}} + \tilde{\theta} = 1. \quad (3-16)$$

La solución tradicional para la Ec. (3-16), con la condición inicial $\tilde{\theta}(0) = 0$, es dada por la curva clásica observada en la carga de un capacitor en un circuito RC alimentado con una fuente constante,

$$\tilde{\theta}(t) = 1 - e^{-\tilde{t}} \quad (3-17)$$

En este caso particular, revertir a la forma dimensional es fácil de encontrar usando las Ec (3-14) y (3-15) en (3-11) y (3-10) respectivamente, resultando la Ec. (3-18)

$$\theta(t) = R_\theta \dot{Q}_0 (1 - e^{-t/R_\theta C_\theta}) \quad (3-18)$$

Finalmente, utilizando la diferencia de temperaturas $\theta(t) = \theta_T(t) - \theta_{T_a}$, obtenemos la

relación de temperatura $\theta_T(t)$ absoluta,

$$\theta_T(t) = R\dot{Q}_0 (1 - e^{-t/R_\theta C_\theta}) + \theta_{T_a} \quad (3-19)$$

3.4.2. Modelo Caputo-Dzhrbashyan (CD)

Para encontrar el modelo Caputo-Dzhrbashyan (CD), primero debemos conocer el modelo fraccionario. Este nuevo esquema se escribe a continuación a partir de la Ec. (3-16), como

$$\frac{d^\alpha \tilde{\theta}}{d\tilde{t}^\alpha} + \tilde{\theta} = 1, \quad \tilde{\theta}(0^+) = 0. \quad (3-20)$$

Ahora bien, reemplazamos el operador fraccionario por el operador fraccionario de CD mediante la transformación de la Ec. (3-21),

$$\frac{d^\alpha \tilde{\theta}}{d\tilde{t}^\alpha} \longrightarrow {}^{\text{CD}}D_{\tilde{t}}^\alpha \tilde{\theta}(\tilde{t}), \quad (3-21)$$

y aplicando la transformada de Laplace a la expresión resultante, mediante la transformación directa dada por (3-22), tenemos:

$$\mathcal{L} \left\{ {}^{\text{CD}}D_{\tilde{t}}^\alpha \tilde{\theta}(\tilde{t}) \right\} (s) = s^\alpha \tilde{\theta}(s), \quad (3-22)$$

que se puede reescribir la Ec. (3-20) en el dominio de la frecuencia compleja s mediante

$$s^\alpha \tilde{\theta}(s) + \tilde{\theta}(s) = \frac{1}{s}. \quad (3-23)$$

Así, mediante un despeje de la Ec. (3-23), obtenemos de forma explícita la respuesta a nuestro problema en el dominio de Laplace. La cual viene dada por la Ec. (3-24),

$$\tilde{\theta}(s) = \frac{1}{s(s^\alpha + 1)}. \quad (3-24)$$

Para determinar la transformada inversa de la Ec. (3-24), utilizamos la siguiente equivalencia, [Monje et al., 2010],

$$\frac{s^{\alpha\gamma - \beta}}{(s^\alpha + a)^\gamma} \iff t^{\beta-1} E_{\alpha,\beta}^\gamma [-at^\alpha], \quad (3-25)$$

lo que da lugar a la respuesta del sistema en la Ec. (3-26). Para ello se utilizó $a = 1$, $\gamma = 1$, y $\beta = 1$,

$$\tilde{\theta}(\tilde{t}) = 1 - E_{\alpha}(-\tilde{t}^{\alpha}). \quad (3-26)$$

Finalmente, restituyendo el cambio de variable a la Ec (3-26), tenemos que su forma dimensional es representada por

$$\theta(t) = R\dot{Q} \left(1 - E_{\alpha} \left[- \left(\frac{t}{RC} \right)^{\alpha} \right] \right). \quad (3-27)$$

En el caso de la respuesta biparamétrica, donde hay una dependencia entre dos de los parámetros, tenemos para el caso particular de $\gamma = 1$ y $\beta = \alpha + 1$, que nos conduce a

$$\frac{1}{s(s^{\alpha} + a)} \iff t^{\alpha} E_{\alpha, \alpha+1}^1[-at^{\alpha}] \quad (3-28)$$

donde la ecuación dimensional correspondiente viene dada por,

$$\theta(t) = R\dot{Q} \left(1 - E_{\alpha, \alpha+1} \left[- \left(\frac{t}{RC} \right)^{\alpha} \right] \right). \quad (3-29)$$

Las Ec. (3-27) y (3-29) nos representa el comportamiento de la temperatura del sistema en el modelo fraccionario. Bajo la modificación del parámetro α en estrecha correlación con el parámetro β , se utilizó la Ec (3-29) para realizar el ajuste al comportamiento de los datos experimentales

Un método de optimización es requerido para poder estimar los parámetros iniciales de ajuste del modelo teórico del calorímetro con respecto a las curvas de los datos experimentales. Para este efecto, se utilizó Levenberg-Marquardt. Este método encuentra una solución numérica al problema de minimización de una función, generalmente no lineal dentro de un espacio definido.

3.4.3. Arreglos incrementales de sensores

En este trabajo se aumentaron gradualmente los sensores en ambos fluidos de trabajo con respecto a la disposición inicial antes mencionada. En aire, se incrementaron hasta llegar a 10 sensores en total y hasta 6 sensores en agua. El incremento de los sensores se realizó

de forma gradual en ambos fluidos, sin embargo, es importante saber que el comportamiento obtenido en los sensores en agua es el más importante para nosotros, debido a que es un fluido con propiedades de transferencia de calor estables, tomando en cuenta que el aire no es un medio idóneo en la uniformidad de la distribución del calor.

Se sabe que existe transferencia de calor cuando hay cuerpos o sistemas a distintas temperaturas, además de que hay variaciones de temperatura conforme pasa el tiempo, lo que provoca que la distribución de calor en los sistemas no sea uniforme, provocando un campo de temperaturas. Dentro de este campo, existen lugares geométricos que se encuentran a la misma temperatura llamados *isotermas*. Basados en la geometría cilíndrica del calorímetro, se asume que la temperatura y la disipación de potencia térmica se distribuye de forma uniforme y homogénea como se muestra en la Figura 3-7a, porque idealmente ese sería su comportamiento. Debido al aislamiento de las cámaras del calorímetro, se puede asumir que el calor sólo puede fluir en dirección radial, tomando en cuenta como eje el centro del círculo que resulta de la sección transversal del cilindro [Incropera and DeWitt, 2002]. Sin embargo, por efectos naturales, la dispersión del calor se distribuye, en primer instancia, hacia las partes menos energéticas en el cilindro y de ahí se distribuye uniformemente al resto de este.

Para obtener la Figura 3-7 se realizó una simulación con ayuda del paquete *PDE model* de Matlab y los ajustes de transferencia de calor (con su función *Thermalmodel*), dichas configuraciones nos permiten observar a través de este paquete, el comportamiento ideal en la geometría circular, cabe mencionar que los ejes de las Figuras 3-7a y 3-7b solamente simulan la geometría como una unidad, y que las figuras representan perspectivas diferentes. Esta simulación se alimentó con un vector de mediciones de temperatura y tiempo, extraídos de datos experimentales realizados previamente durante el monitoreo de una resistencia de 25 W. Estos datos se aplicaron a la Ley de Fourier que nos ilustra la dispersión del calor dentro de la cámara principal.

En la Figura 3-7 se muestra el comportamiento del calor y se observa cómo este se conserva, en mayor magnitud, al centro de la geometría, al mantenerse alrededor de la fuente de calor y dispersándose de manera uniforme. Esto en el caso ideal en donde la cámara esté completamente aislada y que es el caso considerado en este trabajo de tesis.

Tomando en cuenta la simulación anterior, se realizaron los arreglos incrementales

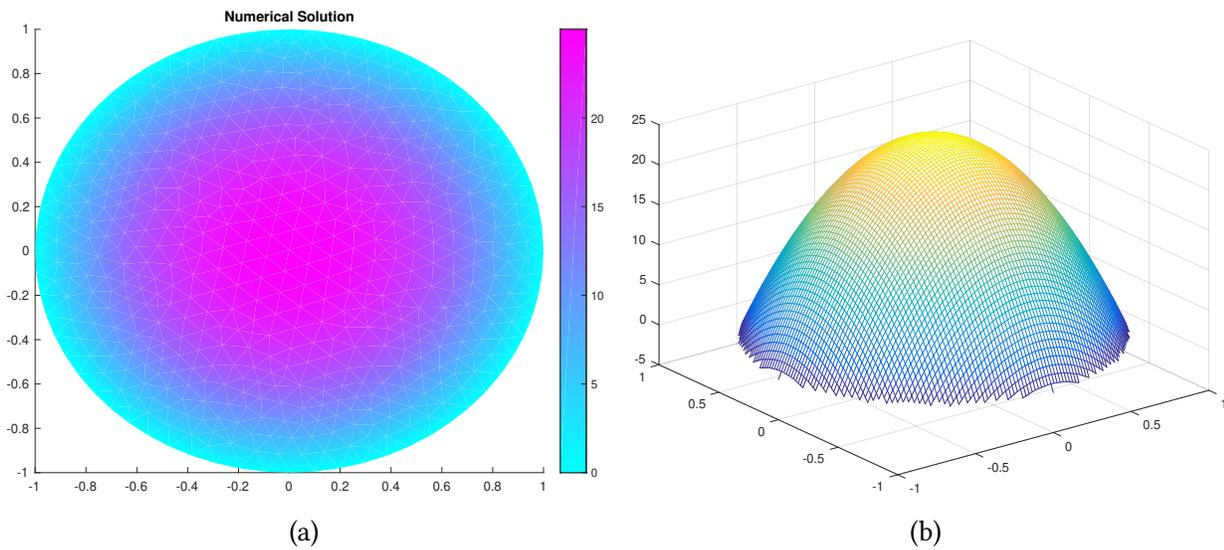


Figura 3-7: Simulación que muestra la dispersión del calor en una geometría circular como unidad.

de la siguiente manera: en primer instancia se colocaron dos sensores más en la cámara con aire como se observa en la Figura 3-8. También se dejó la resistencia en la parte

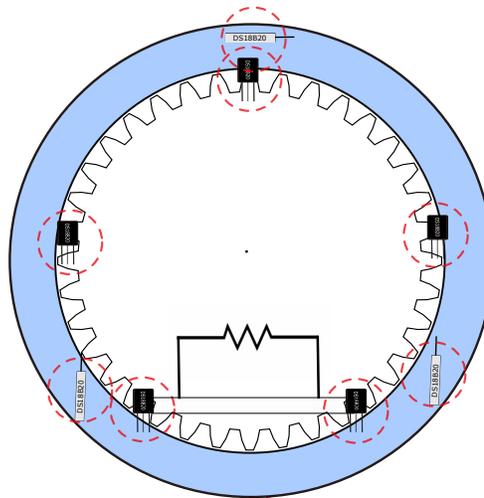


Figura 3-8: Configuración con cinco sensores en aire y tres en agua.

superior del cilindro de la cámara principal. En seguida, se realizó una medición colocando el objeto de medición en la parte media de la cámara, sujeta con dos delgados hilos para mantener la posición cuidando que el material utilizado no alterara las mediciones. A pesar del incremento de sensores, las mediciones continuaban con fluctuaciones fuertes, por lo que se realizó un reacomodo de los sensores en la parte superior de la cámara principal y un

incremento adicional en el agua, (colocando dos sensores extras). Teniendo como resultado final una configuración de cinco sensores en aire y seis en agua. Bajo este esquema se tiene un total de 11 de ellos capturando mediciones en tiempo real y con la resistencia en el centro de la cámara, como se muestra en la Figura 3-9.

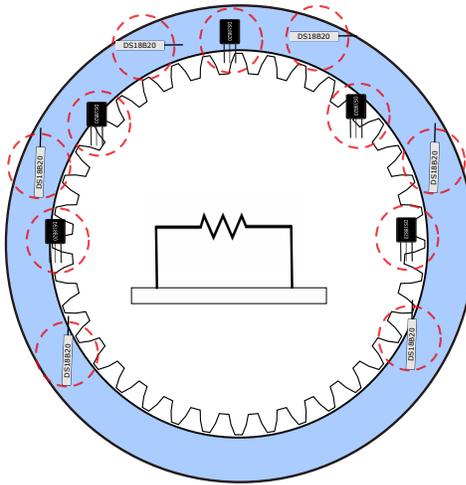


Figura 3-9: Configuración con 5 sensores en aire y 6 en agua.

3.5. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos fue diseñado en el trabajo original. Este sistema consta de una *Raspberry Pi*, que a través de *Python*, hace la conversión de los datos recibidos por cada uno de los sensores. Los sensores son identificados a través de su ID que fueron adquiridos mediante comandos en la terminal, debido a que ya tienen un código de identificación asignado desde su fabricación, y después, agregados al programa de adquisición para ser reconocidos y leídos.

A continuación, en la Tabla 3-2 se presentan los datos técnicos de los componentes (originales y agregados) principales del sistema de adquisición implementado en el calorímetro. En la Figura 3-10 se pueden observar 3 etapas para el proceso de recolección y tratamiento de los datos, que son descritas a continuación:

1. En esta primera etapa se realiza la medición de la temperatura por los sensores

Tabla 3-2: Datos técnicos del sistema de adquisición de datos.

Componente	Descripción
Raspberry Pi Zero W	Procesador Broadcom BCM2835 @ 1 Ghz ARM 11, 512 MB de memoria RAM LPDDR2, Ranura para tarjeta Micro-SD, dos conectores micro-USB para corriente e intercambio de datos, 8 GB de almacenamiento, salida de vídeo mini-HDMI a 1080p, puertos GPIO, 5 volts de alimentación, WiFi 802.11n y Bluetooth 4.0,
Sensores de temperatura	Rango de temperatura de -55 a 125 °C, resolución de 9 a 12 bits (configurable), interfaz 1-Wire, identificador interno único de 64 bits, precisión $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$, tiempo de captura inferior a 750 ms, alimentación: 3.0V a 5.5V,
Equipo de cómputo	Computadora básica, teclado, mouse y los programas Python y FileZilla instalados para llevar a cabo el monitoreo, además del protocolo SSH.

instalados dentro de la cámara principal y secundaria del calorímetro, recordando que los sensores ya entregan una medición digital. Cada una de estas mediciones, son entregadas a la *Raspberry Pi Zero W*.

2. En la etapa dos, se hace el procesamiento y ordenamiento de los datos por sensor, además de registrarse la fecha y hora de la medición. Los datos se pueden ver en la terminal del sistema operativo debido a una conexión entre la computadora y la *Raspberry Pi* a través de WiFi utilizando el protocolo SSH, a través del cuál los usuarios pueden descargar los datos experimentales.
3. En la parte tres del proceso se realiza el envío y ploteo de los datos en una página web creada para el monitoreo remoto del calorímetro.

3.5.1. Programación de alto nivel

En cuestión de programación del sistema, se muestra un diagrama en la Figura 3-11, en donde nos muestra cómo se lleva a cabo el procesamiento de los datos en *Python* desde el encendido del calorímetro, que comienza con la conexión de la *Raspberry Pi* a la

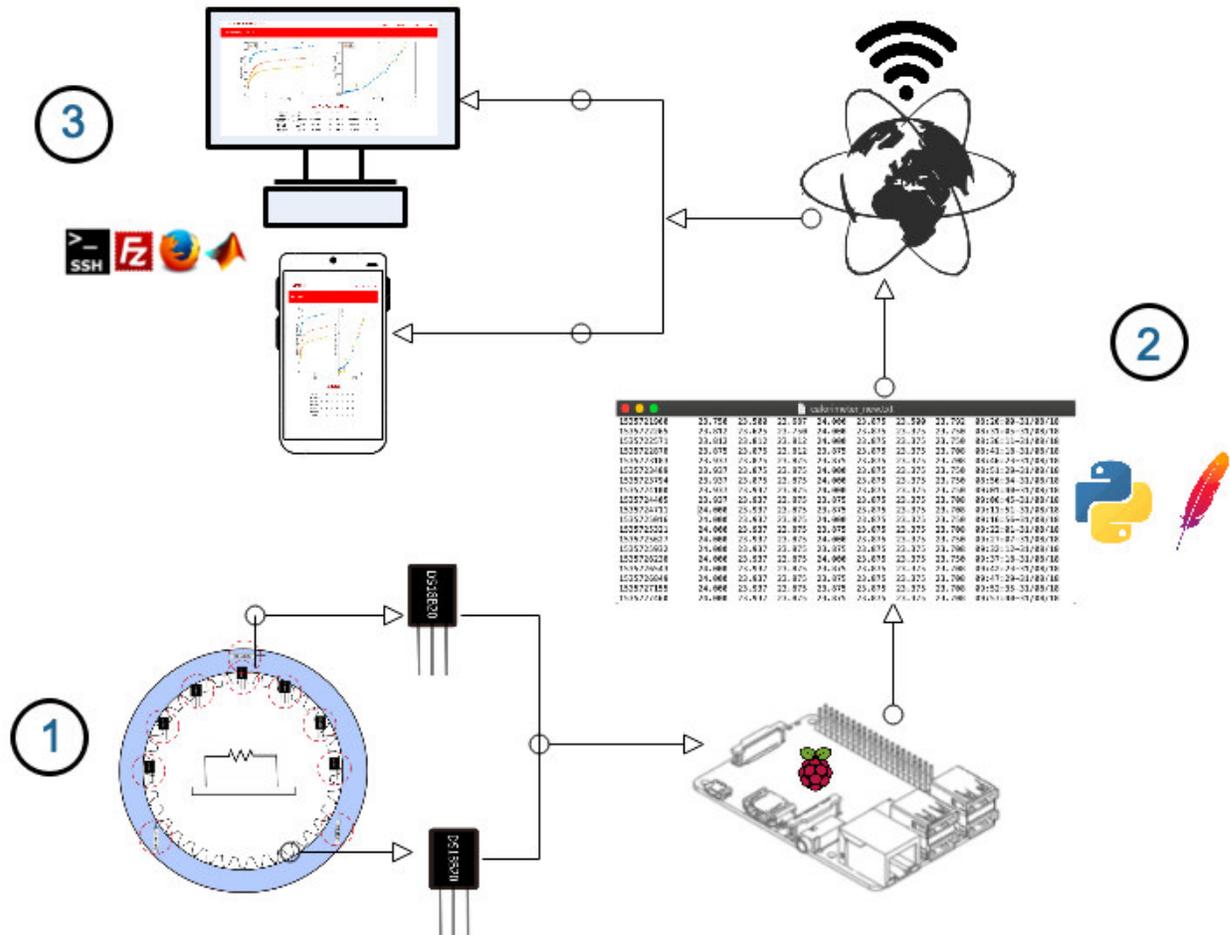


Figura 3-10: Diagrama del sistema completo de calorimetría y monitoreo.

electricidad. El reconocimiento de los sensores se realiza por medio de su ID, compuesto por un código de 12 dígitos, por ejemplo, para el sensor llamado “aire 1”, es identificado por Python como “4384d9116461”, y así es como cada sensor tiene su ID para ser manipulado. Una vez identificados en el programa, se hace la conversión para obtener la temperatura en °C. Después de este procedimiento, se realiza una separación de las mediciones hechas en agua y en aire, para tener un mejor control a cerca de las lecturas a las que se les tiene que agregar la propiedad correspondiente dependiendo del medio. En este caso, se utilizan las mediciones en agua por ser nuestro fluido de interés. Después de la separación de datos, los cálculos con temperaturas en agua se envían a un procesamiento digital en Matlab, en donde se realizan las gráficas de comportamiento de calor. Estas gráficas, posteriormente son enviadas a una página web, creada en el trabajo original, para poder tener un monitoreo remoto del calorímetro [Cruz-Duarte, 2018].

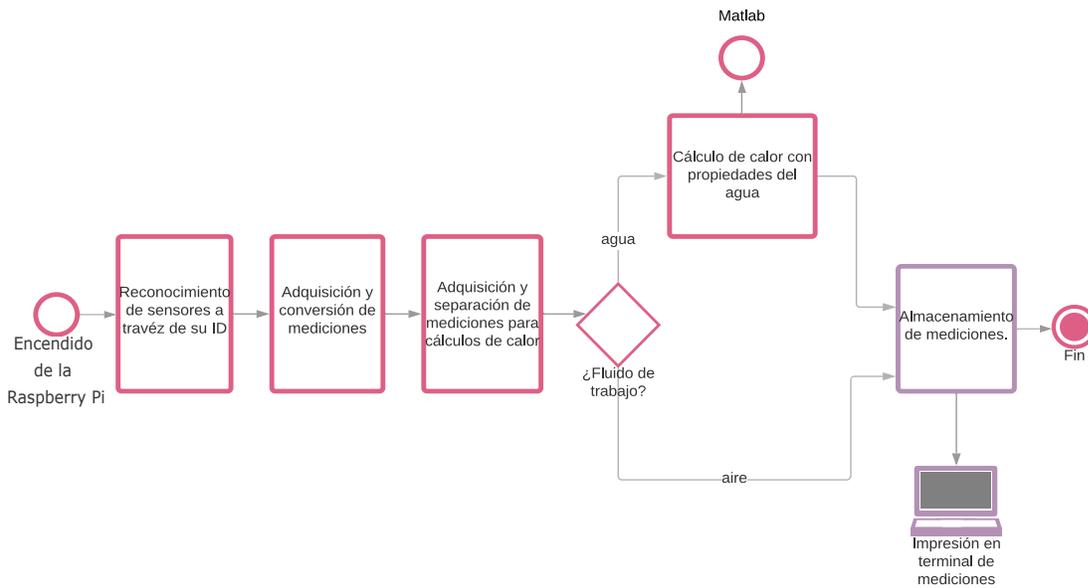


Figura 3-11: Diagrama del proceso de programación en Python.

Finalmente, todas las mediciones son almacenadas en archivos .txt, además de ser impresas en la terminal del sistema en tiempo real.

En este capítulo se describieron las aplicaciones de cada uno de los conceptos implementados, se desarrolló el modelo matemático experimental, así como la estrategia incremental que se implementó en este trabajo de tesis, en el siguiente capítulo presentaremos los resultados experimentales de este trabajo.

4 Implementación y resultados experimentales

Para realizar la implementación práctica de las técnicas descritas en el capítulo anterior y llevar a cabo las pruebas experimentales se utilizó el calorímetro con el que se cuenta en la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca dentro del Laboratorio de Telemática, diseñado y construido por Jorge M. Cruz-Duarte en 2018, mostrado en la Figura 4-1.

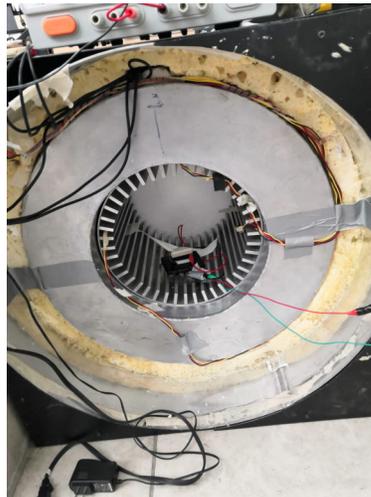


Figura 4-1: Calorímetro utilizado como dispositivo de prueba.

Antes de iniciar la etapa experimental se realizaron algunas adecuaciones físicas. El primer paso que se realizó en la re-instrumentación del calorímetro fue el cambio de cableado en el 90 % del dispositivo, para mejorar las conexiones entre sensores y *Raspberry*. Se utilizó cable de calibre 20, nuevas terminales de conexión para los sensores y soldadura entre los cables y terminales. Las convenciones utilizadas, con el fin de tener un mayor orden y respetando el cableado original, fueron las siguientes:

- Cable rojo para la conexión a alimentación de 3.3 V a 5 V (Vcc),
- Cable blanco para la recepción de datos (DQ),
- Cable negro para la conexión a tierra (GND).

Además, también se unieron y soldaron todas las puntas de los cables de datos, los GND y todos los Vcc que están en contacto con las terminales, debido a que se observaron interrupciones en las lecturas por desconexión o contacto nulo de estos cables con las terminales que conectan a la *Raspberry Pi*. De esta manera, se aseguró que todos los cables fueran de una sola conexión a la terminal y no existieran cables sueltos de algún sensor.

Para la revisión de los datos experimentales se realizaron tres diferentes pruebas de parámetros:

- **Prueba de balance térmico:** Obtención de parámetros antes de entrar en operación, con el calorímetro abierto registrando la temperatura ambiente. En esta etapa se comenzó realizando pequeñas pruebas de tres horas para observar el comportamiento de los sensores. Además, se ajustaron los parámetros de muestreo a nueve segundos, resultando un sistema estable y listo para las pruebas experimentales verdaderas.
- **Prueba de análisis térmico:** Obtención de mediciones de temperatura con diferentes dispositivos de prueba en condiciones controladas y no controladas, la etapa de análisis de datos más importante del proyecto. En esta etapa se analizó el acomodo de las mediciones para su análisis, así como la realización de gráficas del comportamiento térmico para diferentes resistencias que nos permitieran ver el comportamiento de la temperatura y el calor en ambos fluidos de trabajo.
- **Prueba de mapeo térmico:** Obtención de parámetros con elementos que trabajen con altos niveles de potencia eléctrica. En esta etapa, se utilizó la resistencia de más alta potencia al voltaje máximo soportado por ésta y se analizó el comportamiento térmico.

Para analizar los datos se realizó un promedio de las mediciones, en donde se tomó en cuenta sólo la cantidad de sensores en funcionamiento y la temperatura obtenida por cada una de ellos. Otra manera que se utilizó para el tratamiento de los datos fue el *promedio*

ponderado, en donde los pesos utilizados para cada medición fueron las distancias a las que estaban colocados cada uno de los sensores alrededor de toda la geometría de las cámaras.

Después de analizar las pruebas y reconfiguraciones de sensores que se realizarían en el calorímetro se procedió a realizar la experimentación.

4.1. Revisión de datos experimentales

La revisión de los datos experimentales se realizó en Matlab con ayuda de Excel para el ordenamiento de datos. Las temperaturas analizadas son resultado de un promedio de temperatura dependiendo de la cantidad de sensores utilizados. Además de usar temperaturas ponderadas de acuerdo a los radios en los que fueron colocados los sensores, tratando de que siempre fueran simétricos. En la Tabla 4-1, se muestra un ejemplo de cómo se ordenaron los datos, por nombre del sensor, medición y hora de la medición para poder obtener un promedio aritmético o ponderado.

Tabla 4-1: Ejemplo de ordenamiento de datos para procesamiento

Sensor	T °C
Aire 1	22
Aire 2	21.937
Aire 3	22
Aire 4	22.062
Aire 5	22
Aire 6	21.125
Aire 7	22
Agua 1	21.875
Agua 2	21.75
Agua 3	21.125
Prom 10	21.8874

Las configuraciones se realizaron con base a un desarrollo iterativo-incremental, en la que cada nueva iteración y ordenamiento de sensores se convertía en un pequeño esquema

a analizar. El dispositivo evolucionaba en cada incremento, para después, proporcionar un resultado completo sobre la configuración final. Estas configuraciones se realizaron en pares de sensores, primero en agua y después en aire, con el fin de dejar un sistema estable en ambos fluidos de trabajo. Debido a que se supuso un sistema estable y completamente aislado, teóricamente la dispersión del calor se lleva a cabo de manera uniforme, por eso la colocación de los sensores abarca toda la circunferencia de las cámaras. Sin embargo, conforme avanzó la experimentación se observó un comportamiento no tan uniforme que se estudió a detalle.

Por esta razón, se hicieron también pruebas con los sensores cubriendo, en mayor medida la parte superior de la cámara principal, observando pequeños cambios en las gráficas de mediciones, como curvas más continuas y comportamientos más acorde al esperado.

La configuración original de los sensores se presenta en la Figura 4-2a. En la Figura 4-2b, se muestra la gráfica con el comportamiento de las mediciones en esa configuración. Podemos observar un comportamiento escalonado que, definitivamente, complicaría en exceso el análisis al tomar estos datos experimentales para realizar un ajuste de curvas por modelo fraccionario, que es uno de los objetivos de este trabajo de tesis.

Analizada esta primer y original configuración, se realizó un incremento de dos sensores más en aire, teniendo así un total de 5 sensores en aire y 3 sensores en agua. En esta configuración, mostrada en la Figura 4-3, se observan los sensores cubriendo, en mayor medida, la parte inferior de las cámaras y más cerca del dispositivo de medición. Fue en este análisis donde se observó que los sensores que estaban en la parte inferior no cambiaban de temperatura en un largo tiempo (1 hora) y el sensor en la parte superior tenía cambios mucho más rápidos en la temperatura que registraba, por lo que se decidió a utilizar una reconfiguración de sensores para monitorear el comportamiento.

Por su parte, en la Figura 4-3b, se observa una gráfica más continua, pero con espacios y saltos abruptos aún.

Realizada la reconfiguración el resultado fue el mostrado en la Figura 4-4b, en donde en el inciso b) se puede observar un claro cambio en el registro de mediciones que nos arroja una curva menos escalonada, con una continuidad y curvatura más visible.

Para mejorar la captura de los datos, se agregaron dos sensores extra a la cámara con

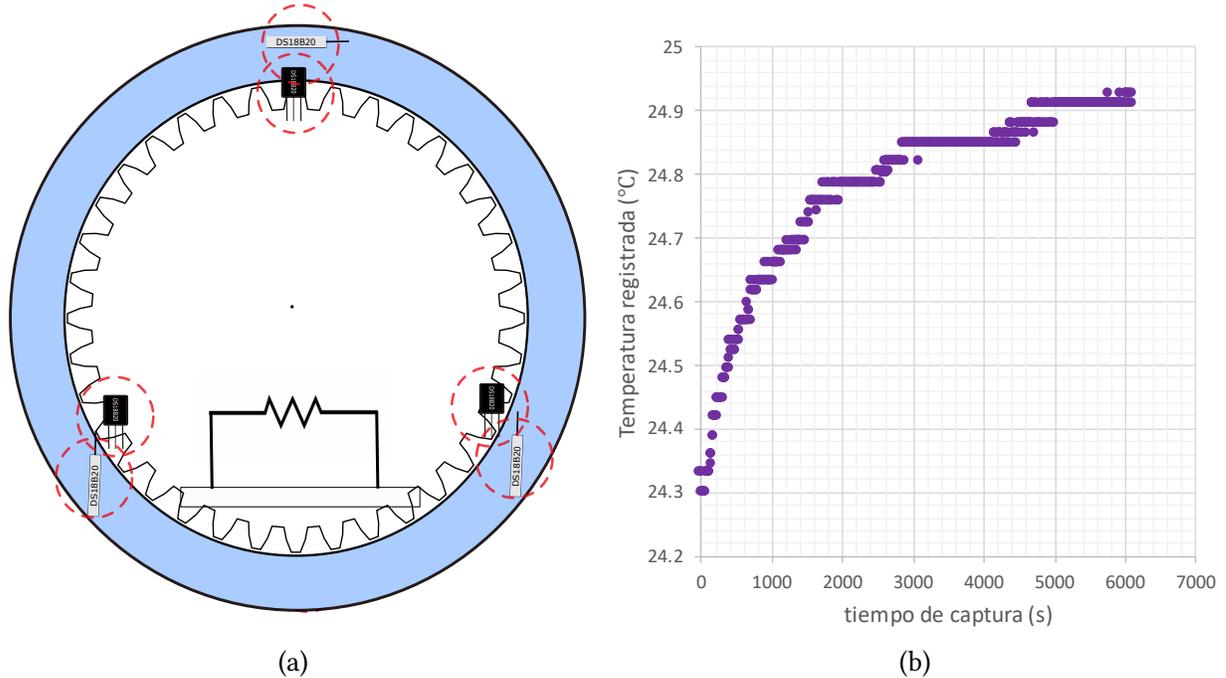


Figura 4-2: Comportamiento de la temperatura con 3 sensores en aire y 3 sensores en agua como configuración original.

agua, teniendo la configuración mostrada en la Figura 4-5a. En la Figura, 4-5b podemos observar que la gráfica es mejor definida por las mediciones, teniendo un pequeño desajuste, seguramente por alguna deficiencia en el sellado de la cámara principal. Por lo que se procedió a sellar las posibles fugas.

Después de observar este comportamiento con esa cantidad de sensores, se decidió implementar más sensores en agua, contando con un total de 5 sensores en aire y 6 sensores en agua, teniendo siempre cuidado con las distancias utilizadas entre cada sensor para hacer la distribución uniforme. Realizada esta configuración, se tuvo el siguiente resultado: En la Figura 4-6 se observa un comportamiento de las lecturas con una tendencia menos escalonada, lo que nos sirvió para llevar a cabo el ajuste del modelo matemático teórico al experimental a través de las herramientas del cálculo fraccionario como se ha mencionado anteriormente. En la configuración mostrada en la Figura 4-6a, se puede observar cómo se abarca en mayor medida la circunferencia de ambas cámaras, captando así en mayor cobertura la dispersión de calor. Realizadas varias y diversas pruebas con esta configuración final, se dejó como configuración definitiva para las mediciones subsecuentes.

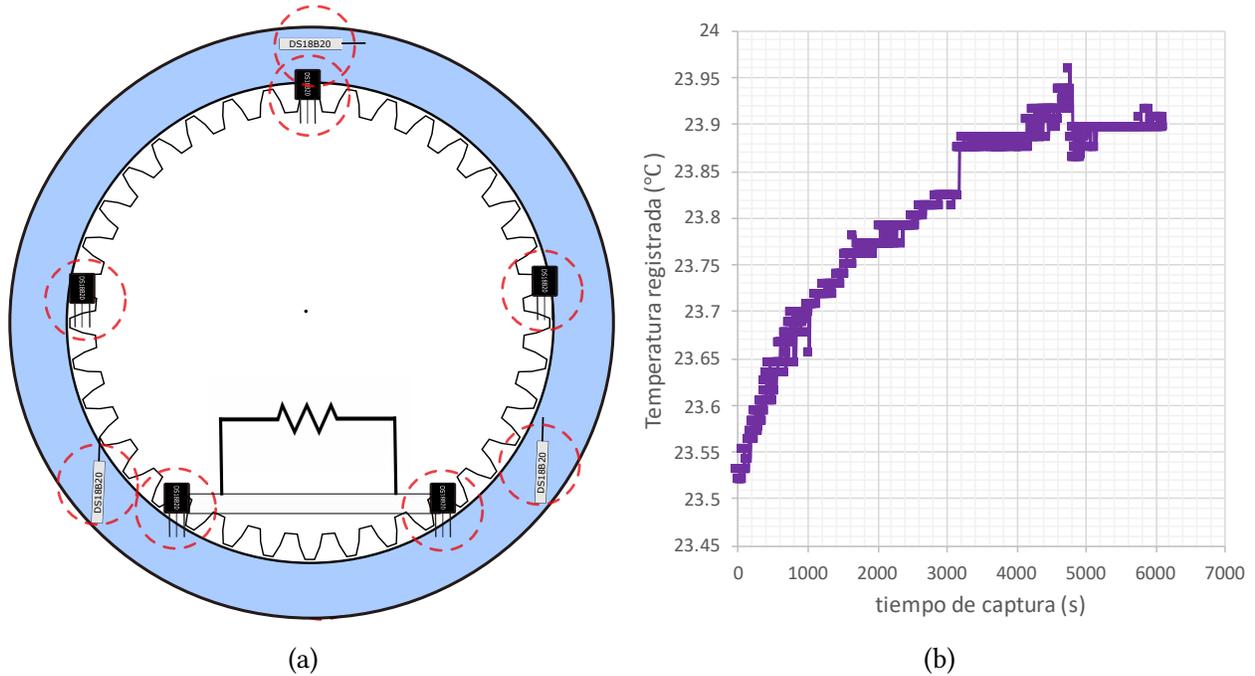


Figura 4-3: Configuración y comportamiento de la temperatura con 5 sensores en aire y 3 en agua.

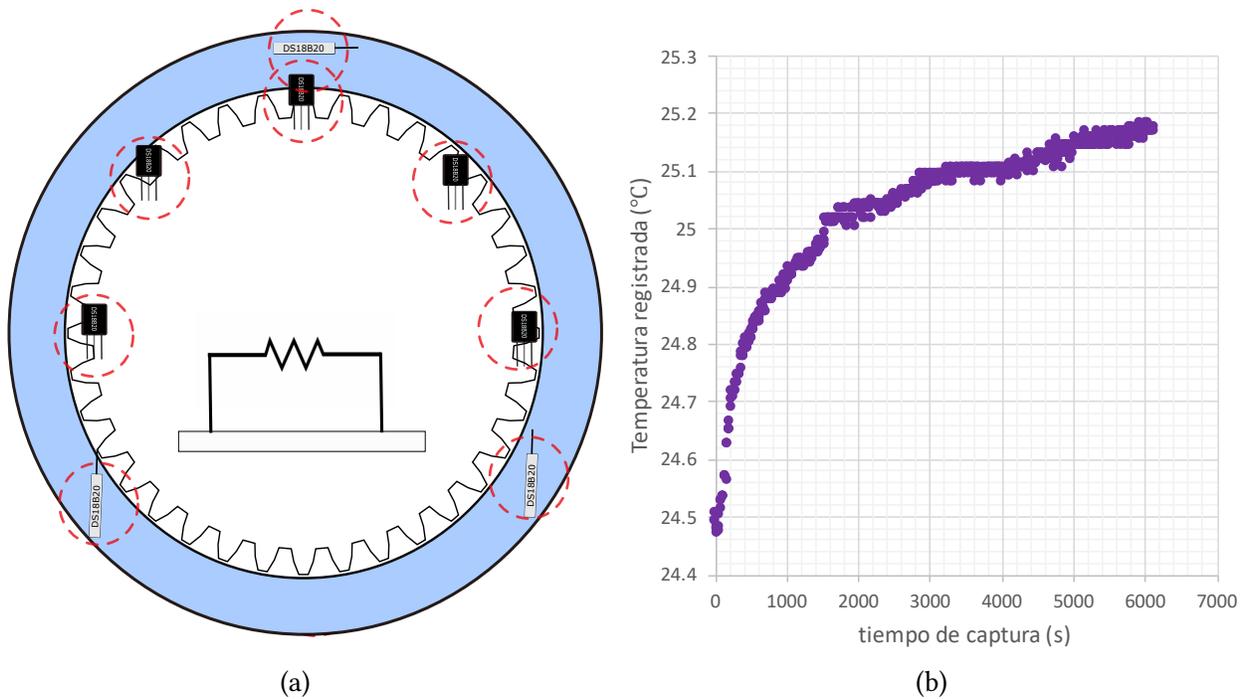


Figura 4-4: Reconfiguración con sensores en la parte superior de la cámara principal.

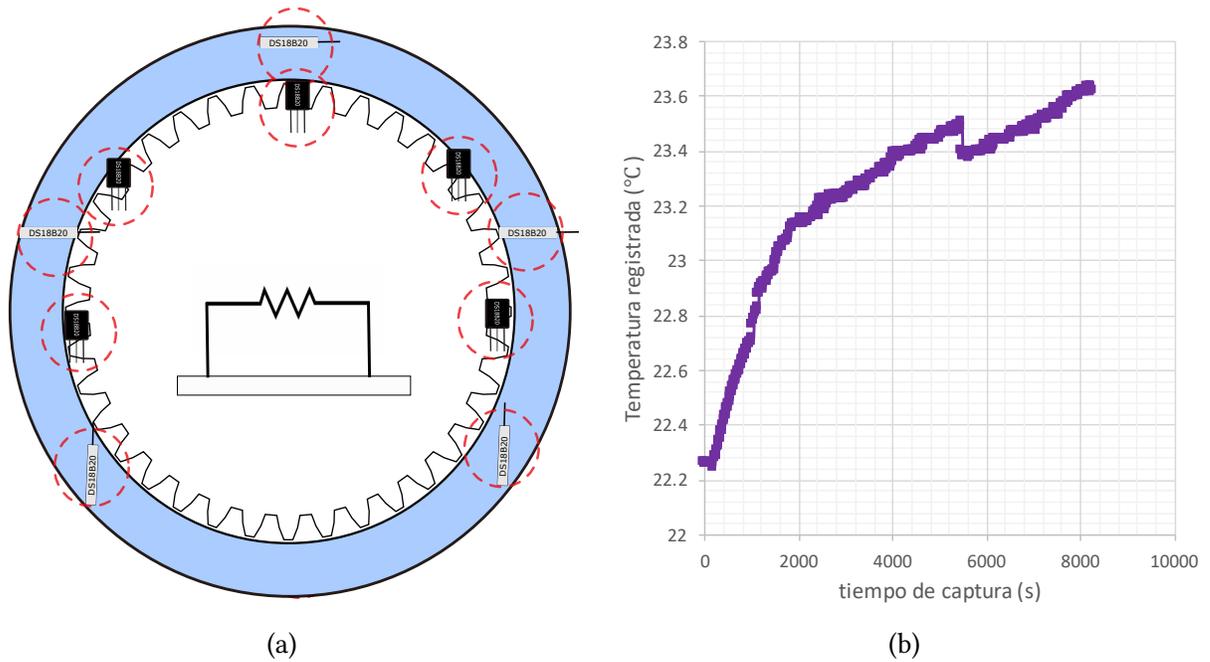


Figura 4-5: Comportamiento de la temperatura con 5 sensores en aire y 5 sensores en agua.

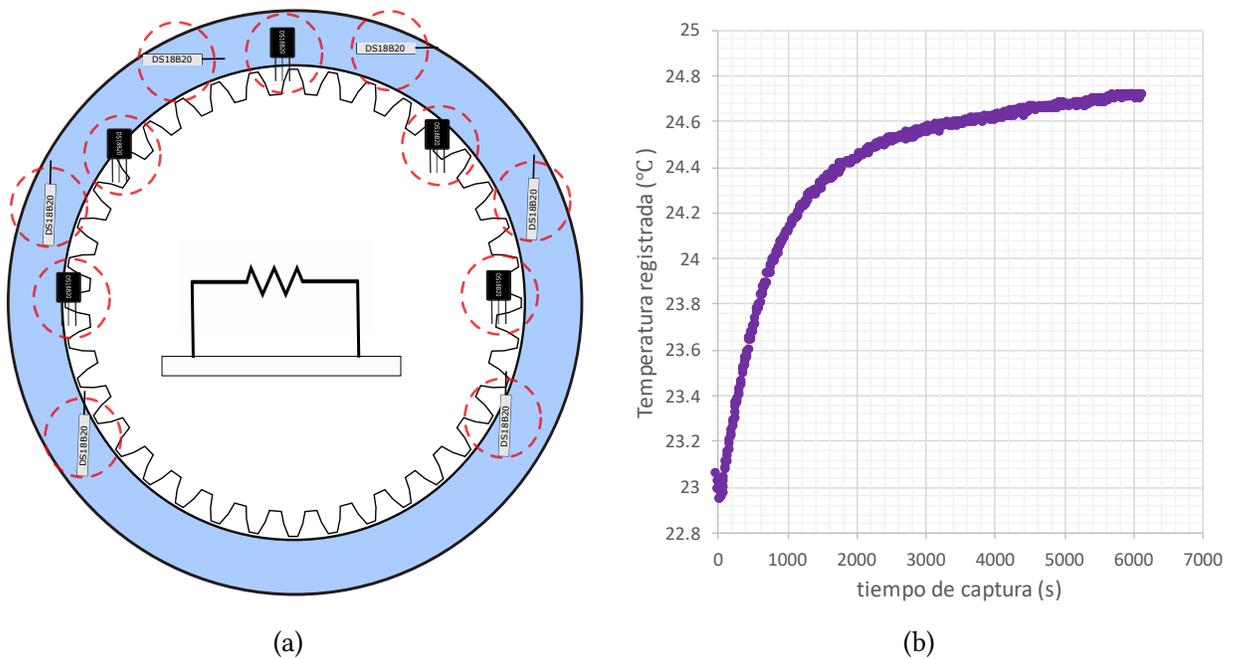


Figura 4-6: Comportamiento de la temperatura con 5 sensores en aire y 6 sensores en agua.

4.2. Ajuste teórico-experimental del modelo matemático

Para llevar a cabo el procedimiento de ajustar el modelo teórico al los datos experimentales, se tomaron en cuenta datos experimentales tomados del análisis de una resistencia de potencia de 100Ω a 25 W y 45 V aplicado por una fuente externa de voltaje. El monitoreo se llevó a cabo por diferentes intervalos de tiempo medido en horas, midiendo el comportamiento de la temperatura tanto en aire como en agua, siendo los datos tomados del muestreo en agua los utilizados para la aproximación, debido a que el agua es un fluido más estable en la variación de sus propiedades térmicas a diferencia del aire. La configuración utilizada para el ajuste, y configuración final de este trabajo es la mostrada en la Figura 4-6a, teniendo como salida la curva experimental presentada en la Figura 4-7

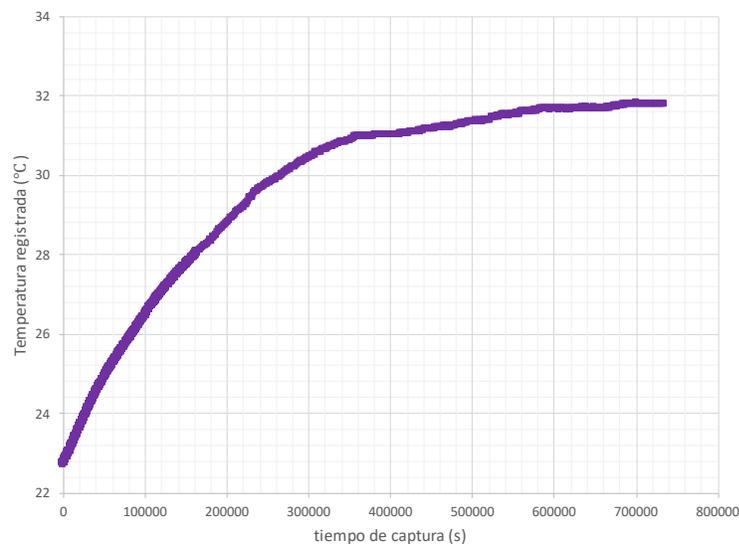


Figura 4-7: Gráfica que muestra la curva utilizada para el ajuste del modelo térmico.

Cabe mencionar que se llegó a esta curva después de varias pruebas y reconfiguraciones y en la Figura 4-8, se muestra la evolución de éstas: En la curva gris se observa el comportamiento que se obtenía de tener únicamente tres sensores en agua, una gráfica escalonada con lapsos grandes sin registrar un cambio de temperatura, mientras en la curva naranja, comienza a tener una tendencia más continua pero sin presentar aún la curvatura esperada. Finalmente, en la curva azul se observa la curva esperada con mayor uniformidad y continuidad, siendo una curva apta para el ajuste de modelos.

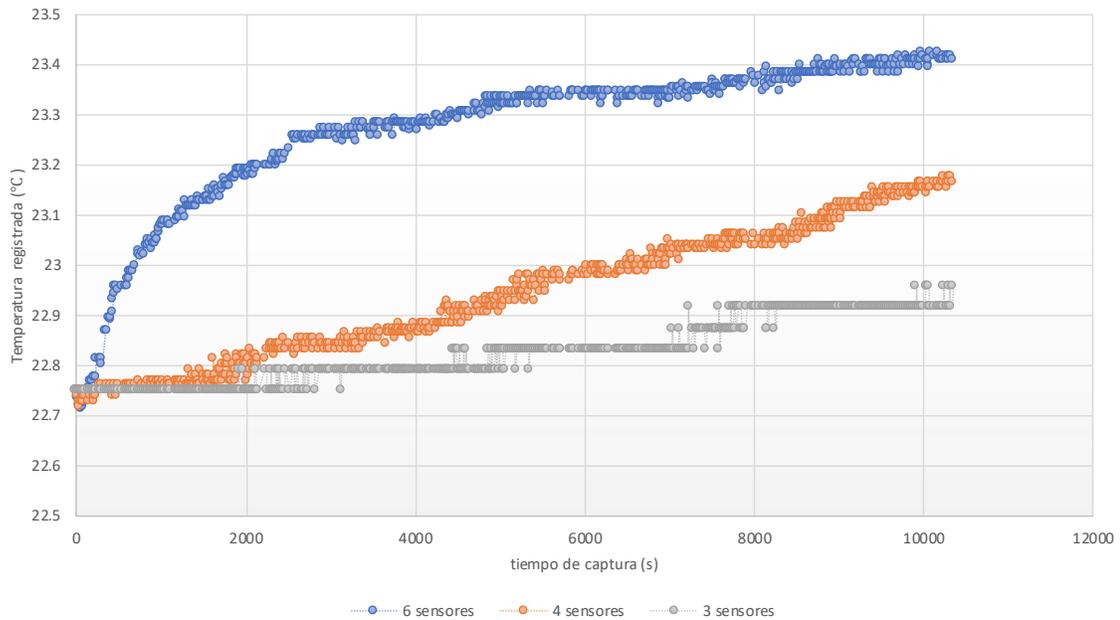


Figura 4-8: Evolución de las curvas al paso del ajuste incremental de sensores.

4.3. Comparativa entre datos reales y simulados

El proceso de adquisición se llevó a cabo durante 204.18 horas consecutivas, lo que equivale a 8.5 días de mediciones continuas. Se realizó durante este tiempo debido a que se esperó a que el sistema alcanzara el equilibrio entre fugas y potencia generada. Se capturaron las temperaturas de todos los sensores cada 10 segundos, posteriormente fueron ordenados y filtrados para su procesamiento a través de la estimación de la temperatura media en cada instante de captura. Después de realizar el filtrado de datos, se acomodaron en dos columnas, una de tiempo y una de temperatura. Los datos de tiempo se normalizaron en una escala menor, que permitiera tener una mejor manipulación de ellos y no trabajar con cantidades tan grandes. Estos datos se procesaron en Matlab, siguiendo el algoritmo que se describe a continuación:

Mediante el Algoritmo 1 se encuentran los valores óptimos para los valores de α , valor necesario para ajustar la curva de comportamiento de la variación de temperatura y que nos ayudan a la estimación de parámetros del circuito. Estos parámetros se encuentran por medio de propiedades ya conocidas del sistema, para un valor inicial. Posteriormente, habiendo obtenido los valores del modelo del comportamiento de calor \dot{Q} , se realiza la estimación de los parámetros R y C como variables desconocidas para estimar el valor de

Algoritmo 1 Algoritmo de optimización Levenberg-Marquardt(LM) para estimar $\alpha = [a, b]^T$

Salida: $\alpha = [a, b]^T$

Entrada: Inicialización de variables: $[\mathbf{x}, \mathbf{y}] = \text{Data}(x_i, y_i)$

1: Normalización de datos externos en horas $\hat{x} = x/3600$;

2: Estimación inicial del vector de parámetros $\alpha_o = [a_o, b_o]^T$;

mientras $iter < N_{iter}$ & $Err > \epsilon$ **hacer**

3: Encontrar $J_i = \frac{\partial f(\hat{X}, \alpha)}{\partial \alpha}$

4: $\alpha_{n+1} = \alpha_n + [(J^T J + \lambda \text{diag}(J^T J))]^{-1} J^T [\mathbf{y} - f(\alpha_n, \hat{x})]$

5: $Err = \|\alpha_{n+1} - \alpha_n\|_2$

6: $\alpha_n = \alpha_{n+1}$

7: $iter = iter + 1$

fin mientras

acuerdo a la ecuación de calor que ya se tiene. Los valores encontrados para este circuito son los presentados en la Tabla 4-2

Tabla 4-2: Valores óptimos para resistencia y capacitancia del modelo.

elemento	valor
Resistencia	0.0004 K/W
Capacitancia	151.16 kJ/K

Además, por medio del modelo encontrado con la Ec. (3-27) se realiza el ajuste al comportamiento experimental. En este caso, se ajusta el parámetro α hasta que el error entre experimental y teórico sea el mínimo, resultando ambas curvas lo más semejantes posibles, dejando el parámetro β dependiente de α (i.e., $\beta = \alpha + 1$).

Se decidió comenzar a analizar los valores de α tomando valores mayores y menores alrededor del valor original 1. En la Figura 4-9 se muestran los primeros ajustes. Cabe mencionar que el hecho de que $\alpha = 1$ significa que estamos utilizando el modelo tradicional visualizando que la gráfica del modelo fraccionario queda sobrepuesta a la del modelo tradicional. También se observa que a pesar de que no ajusta del todo al final de la curva, tampoco está muy alejado de la realidad. En esta Figura también podemos observar cómo para los valores $\alpha > 1$ las curvas se van por encima de la curva de datos experimentales y que a mayor valor la curva presenta una separación mayor, así como los valores para

$\alpha < 1$ se van por debajo de los datos experimentales, presentando un comportamiento cada vez más alejado de éstos cuando el valor se hace más pequeño.

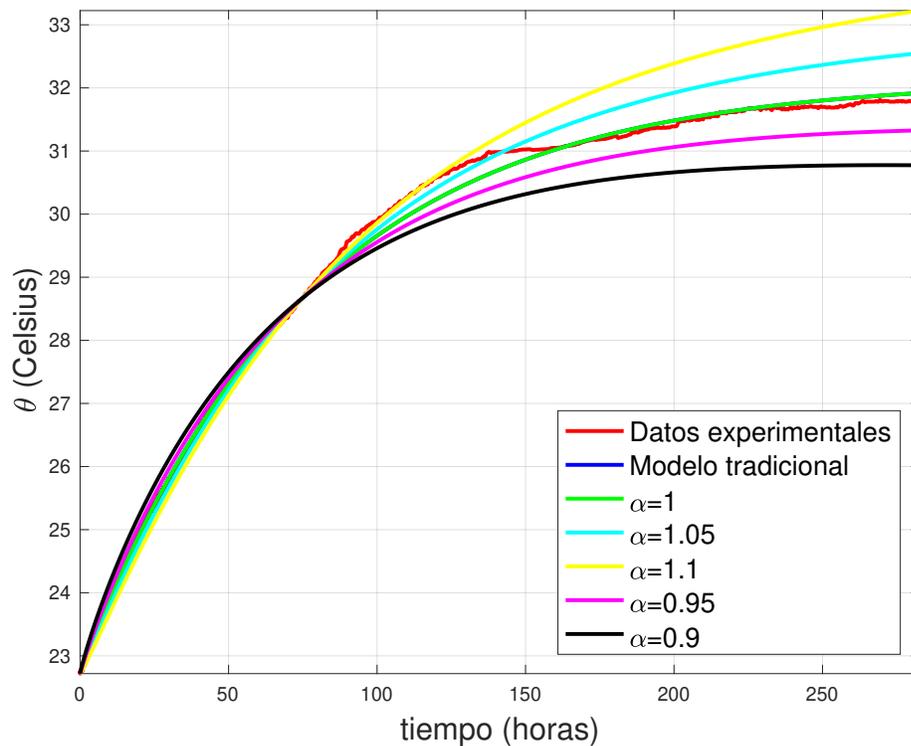


Figura 4-9: Variación de la temperatura en la configuración final.

Por lo tanto, el valor óptimo de α debía estar en el rango $0.95 > \alpha > 1.05$ y debido a estas observaciones se realizó un barrido para los valores de α cercanos a uno para encontrar el valor óptimo en el que el modelo tradicional fuera la máxima aproximación a los datos experimentales, además de observar el comportamiento de éste a lo largo del barrido. El resultado de este análisis fue $\alpha^* = 0.9935$ con un error mínimo de $0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$. Gráficamente se puede observar en la Figura 4-10 el ajuste de estas curvas.

4.4. Análisis de error

De acuerdo al análisis realizado en la sección anterior, se encuentra un error ponderado, el cual, podemos inferir que se debe a los siguientes motivos:

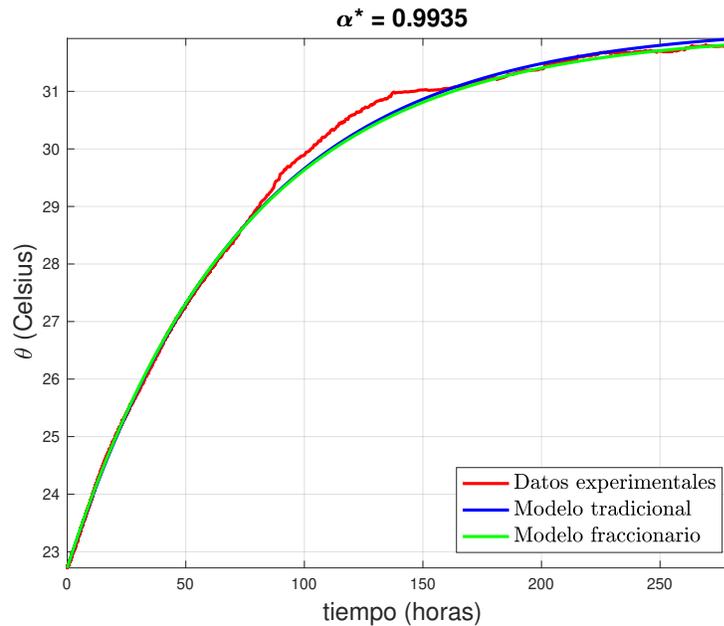


Figura 4-10: Valor óptimo de α que ajusta los datos experimentales

- Pequeñas Fugas.** En el primer análisis que se realizó al tomar y probar el equipo de medición (calorímetro), se encontró que había variaciones en la temperatura cuando se encendía el aire acondicionado del lugar. Observado este evento se realizaron ajustes físicos, como aislar mejor las cámaras y/o mantener apagado el aire acondicionado mientras se realizaban las mediciones. Aún tomadas estas medidas, no siempre se tuvo control absoluto de las condiciones y recordando que al tratarse de un ambiente encerrado cualquier pequeña corriente de aire puede perturbar la medición.
- Propiedades del fluido de trabajo.** Debido a que el agua ya tenía tiempo almacenada en la cámara secundaria, las propiedades de ésta pueden presentar un mayor error con las teóricamente aplicadas.

Puntos que se tienen que tratar con mayor detenimiento en trabajos futuros para realizar la mejora total del dispositivo.

Para realizar la verificación del valor óptimo de α se realizó un barrido alrededor de la curva experimental, utilizando los valores de α en un rango de 0.95 a 1.1 y aplicando un método de error, este error se basa en la comparación de las temperaturas experimentales, contra las temperaturas encontradas por el modelo fraccionario, es decir, la comparación

entre un valor observado y un valor predicho. Por ello se aplicó la definición de error cuadrático medio y así encontrar el valor en donde la curva presente el mínimo error, esto se puede ver en la Ec. (4-1)

$$\alpha^* = \underset{\alpha \in D}{\operatorname{argmín}} \|\theta_T - \hat{\theta}_T(\alpha, x)\|_2 \quad (4-1)$$

donde D es un intervalo de búsqueda alrededor de 1, θ_T son los valores medidos experimentalmente de la diferencia de temperatura, y $\hat{\theta}_T$ son los valores estimados por la Ec. (3-29).

Al realizar un primer barrido sin utilizar este método de error ponderado, se encontró una variación de 0.25 °C, al obtener un valor para α de 1.0056, gráficamente el error también es observable como se muestra en la Figura 4-11b. En la gráfica de la Figura 4-11a se puede ver la evolución del error para dos valores de α en donde se reduce el error.

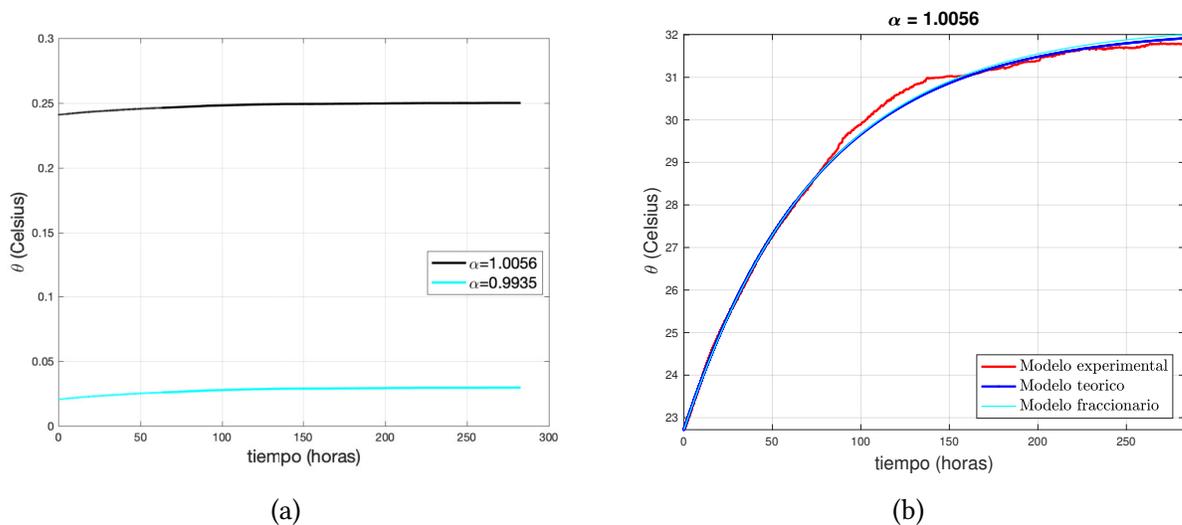


Figura 4-11: Comportamiento del modelo fraccionario con α menor que 1

Aplicando un barrido con pocos puntos (12 valores para α), obtuvimos la Figura 4-12a con un error de 0.23 °C, reduciendo el error pero pudiendo mejorar. Posteriormente, se realizó un barrido de 120 valores, en el que se encontró el valor óptimo para α en 0.9935 con un error de 0.03 °C. En la Figura 4-12b se puede observar que la superficie se cubre casi por completo analizando todo el intervalo de búsqueda.

Por medio de estos barridos y con ayuda de la optimización se logró llegar a este resultado, utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt programado en Matlab. Posteriormente, después de analizar los resultados obtenidos, se procede a concluir.

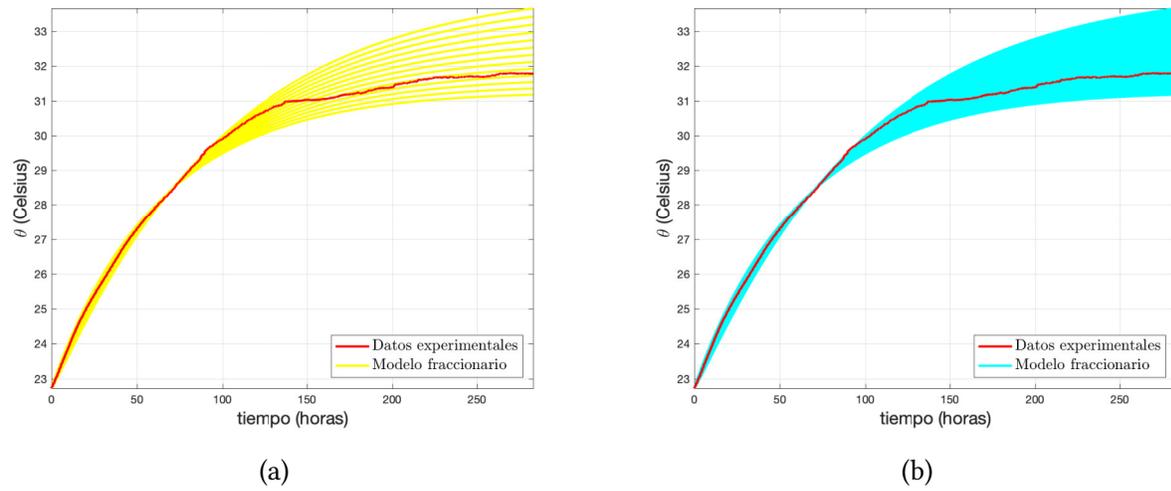


Figura 4-12: Comportamiento del modelo fraccionario con α menor que 1.

5 Capítulo V: Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se propuso una nueva instrumentación para el prototipo de calorímetro no convencional, diseñado por [Cruz-Duarte, 2018] en la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, adoptando una técnica incremental para ajustar el número de sensores, tomando en cuenta las siguientes estrategias para su ubicación:

- **Geometría.** Se tomó en cuenta la geometría circular de la sección transversal de las cámaras, tanto primaria como secundaria, para realizar la colocación de los sensores. También se realizó el análisis en Matlab sobre la uniformidad de la dispersión del calor. Cabe mencionar que al ser una geometría cilíndrica, aporta beneficios a la colocación geométrica y en el distanciamiento uniforme de los sensores.
- **Información mutua entre las posiciones elegidas y las no seleccionadas.** De acuerdo a la observación realizada en las experimentaciones, se analizó el comportamiento de los sensores para realizar los ajustes pertinentes. Dado que los cambios en los sensores ubicados en las partes bajas del calorímetro no eran significativos y no causaban mayor impacto en las mediciones, se probó con una nueva configuración, en donde todos los sensores estaban al nivel del dispositivo de prueba y en la parte superior de este, generando curvas con menos perturbaciones.

Con estas estrategias, se llegó a la configuración de 5 sensores en aire y 6 sensores en agua, como se presenta en la Figura 4-6a, teniendo una curva más estable y continua.

Ahora bien, obtenido este ajuste instrumental se realizó un ajuste de curvas entre los modelos experimentales y teóricos utilizando las herramientas del cálculo fraccionario. En un principio, el modelo original presentaba un error al final de las curvas de 0.25 °C. Si bien, el error pudiera no ser significativo, se pudo mejorar.

Al aplicar el método de optimización de Levenberg-Marquardt, se realizó el ajuste de curvas y como resultado de éste se obtuvo un α de 0.9935, con el que se minimizó el error hasta 0.03 °C.

Además, también se obtuvieron valores óptimos para la resistencia y capacitancia del modelo del circuito eléctrico equivalente. En el futuro, se puede mejorar con el cálculo de la resistencia que provocan los materiales de construcción del prototipo.

Bibliografía

- O. Alfredo Gómez, P. Piero de Mileri, and Claude Ewert de G. Diseño, construcción y calibración de un calorímetro de solución de precisión media. *Revista colombiana de química*, 15:9–22, 1986.
- Henry Dreyfuss Associates. *The Measure of Man and Woman – Human Factors in Design*. Whitney Library of Design, 1993.
- David Bracken. Performance testing of a large volume calorimeter. *Los Alamos National Laboratory Research Library*, 2004.
- M. E. Brown. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. Elsevier, 2008.
- M. Caputo. Linear model of dissipation whose q is almost frequency independent. *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 13:529–539, 1967.
- Y.A Cengel. “Cooling Electronic Equipment”, in *Heat Transfer: A Practical Approach*. New York: J. Wiley, 2002.
- Y.A Cengel and M. A. Boles. “*Thermodynamics: an engineering approach*”. New York: J. Wiley, 5a edition, 2006.
- J.M. Cruz-Duarte. *Calorimetry in the thermal analysis of microelectronic circuits*. Tesis de doctorado, Universidad de Guanajuato, DICIS, Salamanca, Guanajuato, México, 2018.
- Sierociuk. Dominik, Dzieliński. Andrzej, Sarwas. Grzegorz, Petras. Ivo, Podlubny. Igor, and Skovranek Tomas. Modelling heat transfer in heterogeneous media using fractional calculus. *Royal Society*, 371:583–592, 2013.
- A Dzielinski., Sierociuk. D, and Sarwas. G. Some applications of fractional order calculus. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci*, 58:583–592, 2010.

- A. Dzieliński and D Sierociuk. Fractional order model of beam heating process and its experimental verification. *New trends in nanotechnology and fractional calculus applications*, pages 287–294, 2010.
- New World Encyclopedia. Calorimeter, 2013. Accessed February 3, 2020). URL [//www.newworldencyclopedia.org/p/index.php?title=Calorimeter&oldid=968163](http://www.newworldencyclopedia.org/p/index.php?title=Calorimeter&oldid=968163).
- Roberto Garra and Roberto Garrappa. The prabhakar or three parameter mittag–leffler function: Theory and application. *Elsevier Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 56: 314–329, 2019.
- J.E. González, L. Lira, and A. Rodríguez. Calorimetría adiabática y sus aplicaciones. *Simposio de Metrología CENAM*, 2010.
- M. Guia-Calderon, J.J. Rosales-García, R. Guzmán-Cabrera, A. González-Parada, and J. A. Alvarez-Jaime. El cálculo diferencial e integral fraccionario y sus aplicaciones. *Acta Universitaria*, 25:20–27, 2015.
- P. J. Haines. *Principles of Thermal Analysis and Calorimetry*. RSC Paperbacks, Cambridge CB4 OWF, UK, 2002.
- Harke. Numerical simulation of the natural convection, 2008. Accessed June 3, 2020). URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ConvectionHeatSink.png>.
- L. He, S. Elassaad, Y. Hu, and W. Yao. System-in-package: Electrical and layout perspectives. *Foundations and TrendsR in Electronic Design Automation*, 4:143–161, 2010.
- Yan Liu. Hong, Huan He. Ji, and Biao Li Zheng. Fractional calculus for nanoscale flow and heat transfer. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 24: 1227–1250, 2014.
- F.P. Incropera and D.P DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. McGraw Hill Science/Engineering/Math, 2002.
- Andreas Kandelbauer and Ralph Lehnert. *Project Oriented Learning.ªnd .ªpen Outcome Labsin the Education of Young Researchers in Polymer Science and Technology*. Formatex Research Center (Badajoz, Spain), 2018. ISBN 978 8494 7512 40.

- Jozef Kasala, H Mäsiar, and I Pernis. A r c h i v e s investigation of selected thermo-physical properties in the co-based superalloy: Experiment and application study. *Archives of Foundry Engineering*, 10, 01 2010.
- Bloschock. Kristen P and Avram Bar-Cohen. Advanced thermal management technologies for defense electronics. *Proceedings of SPIE 8405, Defense Transformation and Net-Centric Systems*, 8405:84050I, 2012.
- Dave Lee. ¿Por qué apple renuncia al cargador inalámbrico para iphone que había prometido?, Apr 2019. URL <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47774802>.
- Lis David. Diagram of bomb calorimeter, 2012. Accessed May 20, 2020. URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bomb_Calorimeter_Diagram.png.
- J Liu and T Wang. Carbon nanotubes for thermal management of microsystems. *Springer*, pages 775–791, 2018.
- Yang Liu, Liming Shi, and Yaohua Li. Comparison analysis of loss calculation methods and measurement techniques in power electronics and motor systems. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 32:530–534, 2013.
- LNE. Laboratoire national de métrologie et d'essais (lne), 2020. Accessed July 20, 2020). URL <https://www.lne.fr/fr>.
- B. P. MacLeod, D. K. Fork, B. Lam, and C. P. Berlinguette. Calorimetry under non-ideal conditions using system identification. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138 (5):3139–3157, 2019.
- J. Marin, D. Tibaduiza, and R. Correa. Determinación experimental de la cantidad de calor emitido por un circuito electrónico. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11:191–2012, 2012.
- P. Lazarevic Mihailo, R. Rapaic Milan, and B. Sekara Tomislav. Introduction to fractional calculus with brief historical background. *ResearchGate [revista en la Internet]*, 2019. doi: 10.18576/pfda/050206.
- C.A. Monje, Y.Q. Chen, B.M. Vinagre, D. Xue, and V Feliu. Fractional-order systems and controls: Fundamentals and applications. *Springer, Heidelberg*, Appendi, 2010.

- Michael J Moran and Howard N Shapiro. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken NJ, USA, 1999.
- Hajmohammadi. M.R, Mohammadifar. M, and Ahmadian-Elmi. M. Optimal placement and sizing of heat sink attachments on a heat-generating piece for minimization of peak temperature. *Elsevier*, 143, 2019.
- Nevil Monroe Hopkins. Calorimetro, 1905. Accessed May 20, 2020. URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calorimetro_-_Monroe_Hopkins.png.
- Hélène Nogent and Xavier Le Tacon. The differential reaction calorimeter: a simple apparatus to determine reaction heat, heat transfer value and heat capacity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15:445–448, 2002.
- Novel Concepts Inc. Flow vector heat sink fluid, 2007. Accessed June 3, 2020. URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flow-vector-heat-sink-fluid-WBG.jpg>.
- I Podlubny. *Fractional differential equations*. Academic Press, 1998.
- A. Qazi Zade, M. Renksizbulut, and J. Friedman. Heat transfer characteristics of developing gaseous slip-flow in rectangular microchannels with variable physical prop-erties. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32:117–127, 2011.
- Ananth Ranganathan. Levenberg-marquardt algorithm, 2004. URL http://www.ananth.in/Notes_files/lmtut.pdf.
- R. Razouk, G. Failleau, O. Beaumont, S. Plumeri, and B. Hay. A heat-flux calorimeter prototype for measuring the thermal power released by radioactive waste packages. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 65 (9):2518–2526, 2018.
- Giovanny-A. Rodríguez, Liliana Giraldo-Gutiérrez, and Juan-Carlos Moreno-Piraján. Evaluación de la señal generada en un calorímetro de conducción de calor en la determinación de entalpias de inmersión para caracterización de sólidos porosos. *Afnidad LXVI*, 66:129–144, 2009.
- AZo Sensors. Colorimeters - structural design and applications. *AZoSensors*, page 1, 2015.

-
- M. Stosur, P. Dawidowski, M. Szewczyk, P. Balcerek, and K. Sowa. Modeling and simulation of thermal behavior within typical gis busduct using atp-empt program. *ResearchGate*, 2014.
- Hans Weber. New principles of calorimetric design. *Elsevier Scientific Publishing Company*, pages 29–38, 1974.
- L. Wonhee, L. Jinyoung, and K Joonyoung. Development and applications of chip calorimeters as novel biosensors. *Nanobiosensors in Disease Diagnosis*, I:17–29, 2012.

Salamanca, Gto., a 05 de Agosto del 2020.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTÍN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Martha Cecilia Arellano Alamilla del **Programa de Maestría en** Ingeniería Eléctrica y cuyo número de **NUA** es: 143876 del cual soy director. El título de la tesis es: "Reconfiguración incremental de sensores en la instrumentación de un calorímetro no-convencional"

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.



Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes
 NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO

ATENTAMENTE



Dr. Jorge Mario Cruz Duarte
 NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



Dr. Arturo García Pérez
 NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



Dr. José Ruiz Pinales
 NOMBRE Y FIRMA
VOCAL