



ANALISIS Y MEDICION DEL FLUJO DE CALOR GENERADO EN UN CIRCUITO ELECTRONICO



JEISON MARIN ALFONSO
Ingeniero electrónico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS

**BUCARAMANGA
2005**



ANALISIS Y MEDICION DEL FLUJO DE CALOR GENERADO EN UN CIRCUITO ELECTRONICO



JEISON MARIN ALFONSO
Ingeniero electrónico

Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ingeniería: Área Eléctrica y Electrónica.

Director
C. RODRIGO CORREA C.
Profesor Titular

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS

BUCARAMANGA
2005

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme fortalecido y permitido culminar el proyecto.

A mis padres y mi hermano por su apoyo incondicional.

A mi Director de Proyecto, el Doctor Rodrigo Correa, y el profesor Jaime Barrero, por su valioso aporte en mi formación profesional.

A mis amigos, el Diseñador Industrial Mauricio Reyes y la Ingeniera Electrónica Nohora Viviana Bonilla, por su gran ayuda.

INDICE

1. PANORAMA GENERAL DEL PROYECTO	12
1.1 DESCRIPCION Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	12
1.2 METODOLOGIA DE DESARROLLO.	16
1.2.1 Construcción de un equipo de medida.	16
1.2.2 Calibración y pruebas al equipo.	16
1.2.3 Análisis y medición del flujo de calor en circuitos electrónicos prototipo.	17
1.3 LOGROS	17
1.4 BOSQUEJO DEL PRESENTE TEXTO.	19
2. FUNDAMENTOS TEORICOS	20
2.1 DEFINICIONES BASICAS EN TERMODINÁMICA [1]	20
2.1.1 Calor	21
2.1.2 Trabajo	22
2.1.3 Caloría	23
2.1.4 Calor específico	24
2.1.5 Relación Calor – Temperatura	24
2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	25
2.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	26
2.3.1 Transferencia de calor por conducción	26
2.3.2 Transferencia de calor por convección	29
2.3.3 Aletas disipadoras de calor	30
2.3.4 Transferencia de calor por radiación	33
2.4 MEDICION DE TEMPERATURA	34
2.4.1 Termopar	34
2.4.2 RTD	34
2.4.3 Sensores basados en uniones semiconductoras	35

2.4.4 Termistor	36
2.5 CALORIMETRIA DIRECTA	38
2.6 ENERGIA Y POTENCIA ELECTRICA	39
2.6.1 Potencia en elementos circuitales	40
2.6.2 Potencia En CA	42
2.6.2.1 Potencia Instantánea	42
2.6.2.2 Potencia promedio	42
2.6.2.3 Valores eficaces de una onda sinusoidal	43
2.6.2.4 Potencia compleja y reactiva	43
Referencias	45
3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CALORIMETRO	46
3.1 DISEÑO PRELIMINAR	46
3.2 CONSTRUCCION	49
3.2.1 Caja Portacircuitos	49
3.2.2 Recipiente De Vidrio	51
3.2.3 Capa Aislante	52
3.2.4 Caja Exterior Y Motor	56
3.2.5 Base y cerrado de la caja superior	57
3.3 CONSIDERACIONES FINALES	58
4. INTERFAZ ELECTRÓNICA	59
4.1 FUNCIONES GENERALES	61
4.2 HARDWARE DE LA INTERFAZ	61
4.2.1 Bloque de Monitoreo de temperatura	62
4.2.2 Bloque de acondicionamiento de la señal y filtrado	63
4.2.3 Bloque de conversión análogo-digital	66
4.2.4 Módulo del microcontrolador y periféricos	68
4.3 SOFTWARE DE LA INTERFAZ	73
4.3.1 Modo Normal	73
4.3.1.1 Opción Monitorear	74
4.3.1.2 Opción Lectura de datos	74
4.3.1.3 Opción Enviar Datos	74
4.3.1.4 Opción Sensores	75
4.3.2 Modo Monitoreo	76
4.3.3 Modo Lectura de Datos	78
4.4 PROGRAMA EN LABVIEW	79

5. CALIBRACION DEL EQUIPO	85
6 PRUEBA CON UN CIRCUITO ELECTRONICO	92
6.1 PRUEBA CON DISIPADOR	93
6.2 PRUEBA SIN DISIPADOR	95
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
7.1 CONCLUSIONES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	98
7.2 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS	99
7.3 RECOMENDACIONES	100

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Aplicación de los tubos de calor en circuitos electrónicos	12
Figura 1.2 Causas de fallas en circuitos electrónicos	14
Figura 1.3 Equipo de medida (Calorímetro para circuitos electrónicos)	17
Figura 2.1 Un circuito como sistema termodinámico	21
Figura 2.2 Definición de Calor	21
Figura 2.3 Aletas disipadoras de Calor	30
Figura 2.4 Ejemplo de calorimetría directa	39
Figura 3.1 Vista General del Diseño Preliminar del CALPAC	47
Figura 3.2 Vista del diseño de la capa aislante del CALPAC	47
Figura 3.3 Plano General del diseño preliminar del CALPAC	48
Figura 3.4 Caja Portacircuitos.	49
Figura 3.5 Aletas del mercado adaptadas al equipo	50
Figura 3.6 Recipiente de Vidrio	51
Figura 3.7 Ajuste de la caja de aluminio a la de vidrio	51
Figura 3.8 Aislantes usados	52
Figura 3.9. a) Recipiente de vidrio cubierto con polietileno en espuma. b) Caja exterior con placas de asbesto	54 54
Figura 3.10. Corte lateral de la capa aislante.	55
Figura 3.11. Modelo de la capa aislante como 3 resistencias térmicas.	55
Figura 3.12. Aislamiento de: a) La tapa frontal. b) La tapa superior	55
Figura 3.13. Aislante de icopor en las tapas	55
Figura 3.14. Caja exterior	56
Figura 3.15. Ajuste mecánico para cambiar de 100 RPM a 20 RPM	57
Figura 3.16. Motor y Agitador	57
Figura 3.17. Base de ruedas	58
Figura 3.18. Cierre de la tapa superior	58
Figura 3.19. Calorímetro Para Circuitos Electrónicos, CALPAC	59
Figura 4.1. Interfaz Electrónica CALPAC	60
Figura 4.2. Diagrama de Bloques del Hardware de la Interfaz Electrónica CALPAC	61
Figura 4.3. Curva característica del termistor USP4313	62
Figura 4.4. Ubicación de los sensores	63
Figura 4.5. Puente de Wheatstone para acondicionamiento de la señal	64
Figura 4.6. Amplificador de instrumentación usado en el módulo electrónico	64
Figura 4.7. Amplificador de instrumentación usado en el módulo electrónico	65
Figura 4.8. Etapa de filtrado	66
Figura 4.9. Conversor Análogo Digital	67
Figura 4.10. Configuración del conversor para modo de trabajo de 0V a 5V	67
Figura 4.11. Tarjeta de la parte análoga del módulo electrónico	68

Figura 4.12. Microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola	68
Figura 4.13. Teclado matricial y módulo LCD	70
Figura 4.14. Memoria EEPROM	71
Figura 4.15. Diagrama electrónico de la tarjeta digital	72
Figura 4.16. Tarjeta digital del módulo electrónico	72
Figura 4.17. Fuente regulada del equipo	73
Figura 4.18. Opción enviar datos	74
Figura 4.19. Mensaje para enviar datos	74
Figura 4.20. Mensaje mientras envía datos.	74
Figura 4.21. Opción Sensores	75
Figura 4.22. Opción Configurar	75
Figura 4.23. Opción Visualizar	75
Figura 4.24. Opción promedio	76
Figura 4.25. Mensaje si no está habilitado un sensor	76
Figura 4.26. Mensaje si un sensor está fuera de rango	76
Figura 4.27. Mensajes para iniciar monitoreo	77
Figura 4.28. Mensajes en modo monitoreo	78
Figura 4.29. Opciones en modo lectura de datos	79
Figura 4.29b Lectura de un dato	
Figura 4.30 <i>Frame</i> de inicialización de variables	80
Figura 4.31 <i>Frame</i> de Adquisición de Temperatura	80
Figura 4.32. <i>Frame</i> de visualización de datos	81
Figura 4.33 <i>Frame</i> de análisis de datos	81
Figura 4.34. <i>Frame</i> para abrir Excel	82
Figura 4.35. <i>Frame</i> para exportar datos a Excel	82
Figura 4.36. <i>Frames</i> de finalización	83
Figura 4.37. Panel de monitoreo en LabView	84
Figura 4.38. Datos disponibles durante monitoreo	84
Figura 5.1 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 25W	86
Figura 5.2 Gráfica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 25W	87
Figura 5.3 Gráfica de la potencia registrada por el calorímetro con bombillo de 25W	88
Figura 5.4 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 40W	88
Figura 5.5 Grafica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 40W	89
Figura 5.6 Gráfica de la potencia registrada por el calorímetro con bombillo de 40W	90
Figura 5.7 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 60W	90
Figura 5.8 Grafica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 60W	91
Figura 5.9 Potencia registrada por el calorímetro para un bombillo de 60W	91
Figura 6.1 Circuito de prueba	92
Figura 6.2 Prueba con el circuito electrónico	93
Figura 6.3 Datos de la prueba con disipador	94
Figura 6.4 Gráfica de Temperatura Vs Tiempo en el calorímetro para circuito con disipador	95
Figura 6.5 Gráfica de Potencia Vs Tiempo para circuito con disipador	95
Figura 6.6 Gráfica de Temperatura Vs Tiempo en el calorímetro para circuito sin disipador	96
Figura 6.7 Gráfica de Potencia Vs Tiempo para circuito sin disipador	96

TITULO: ANALISIS Y MEDICION DE FLUJO DE CALOR GENERADO EN UN CIRCUITO ELECTRONICO.*

AUTOR: Marin Alfonso Jeison.**

PALABRAS CLAVES: Calor, Temperatura, Circuitos Electrónicos, Calorímetro, Disipación de Calor, Medición de Calor.

DESCRIPCION

La gran influencia que tienen las altas temperaturas en el comportamiento de los circuitos electrónicos, y por lo tanto, la necesidad que existe en determinar de una forma cuantitativa la efectividad que estos tienen en disipar el calor generado durante su funcionamiento, motivaron la realización de este proyecto, que consiste en el planteamiento de una alternativa para dicha medición – la calorimetría directa – y el desarrollo de un prototipo que ajustara esta alternativa dentro de las características propias de los circuitos electrónicos.

El prototipo realizado es un equipo nombrado como CALPAC (calorímetro para circuitos electrónicos), el cual mide el flujo de calor a través de un circuito, en unidades de potencia (watts). Este texto presenta el desarrollo de las 4 etapas principales en la realización del proyecto. La primera, un análisis del marco teórico sobre el cual se justificó la alternativa elegida para medir calor y se soportó el diseño del prototipo; la segunda, el diseño y construcción del equipo; la tercera, el diseño y construcción del sistema de adquisición de datos, llamado módulo electrónico del CALPAC; y finalmente, la calibración y pruebas del prototipo y el análisis de resultados. Este proyecto muestra como la unión de conocimientos de diversas áreas, en este caso, termodinámica, electrónica y diseño industrial, permiten la generación de ideas y construcción de equipos de gran utilidad dentro del marco investigativo.

El calorímetro para circuitos electrónicos desarrollado dentro de esta tesis y con la colaboración de la dirección de investigaciones (DIF) de fisicomecánicas y el grupo de investigación CEMOS en la escuela de ingeniería Eléctrica, quedó como otra alternativa para realizar estudios térmicos en dispositivos y circuitos electrónicos, sobretodo, si se desea saber como están disipando el calor.

* Tesis de maestría.

** Facultad de Fisicomecánicas, Maestría en Ingeniería, Director de Proyecto: Prof. Carlos R. Correa

TITLE: ANALYSIS AND MEASUREMENT OF HEAT FLOW GENERATED IN AN ELECTRONIC CIRCUIT.*

AUTHOR: Marin Alfonso Jeison.**

KEY WORDS: Heat, Temperature, Electronic Circuits, Calorimeter, Heat Dissipation, Heat Measurement.

DESCRIPTION

The big influence that high temperatures have on the behavior of the electronic circuits and therefore the existent necessity to determine in quantitative form the effectiveness these have dissipating the heat generated during its functioning, motivated the realization of this project that consists on the establishment of an alternative for such measuring – the direct calorimetry – and the development of a prototype that would fit this alternative within the proper characteristics of the electronic circuits.

The carried out prototype is an equipment called CALPAC (Calorimeter for electronic circuits), which measures the flow of heat through a circuit in potency units (watts). This text presents the development of the four main stages in the realization of the project. The first one is the analysis of the theoretical framework in which was justified the chosen alternative to measure heat and supported the design of the prototype; the second one is the design and construction of the equipment; the third one is the design and construction of the data acquisition system called the electronic model of the CALPAC; and finally, the gauging and testing of the prototype and the analysis of the results. This project shows how the union of diverse areas, in this case, thermodynamics, electronics and industrial design, allow the generation of ideas and the construction of high – utility equipment within the investigative framework.

The calorimeter for electronic circuits developed in this thesis and with the contribution of the Director of Investigations (DIF) of the physicomechanics faculty and the group of investigation CEMOS in the Electric Engineer Faculty, remains as another choice to develop thermal studies in electronic circuits and devices, overall, if wanted to know how to dissipate heat.

* Thesis of Masters.

** Faculty of physicomechanics, Masters in Engineering, Director of Project: Prof. Carlos R. Correa.

1. PANORAMA GENERAL DEL PROYECTO

Este libro trata del proyecto de maestría titulado “Análisis y medición de del flujo de calor generado en un circuito electrónico”, desarrollado dentro del marco investigativo del grupo CEMOS (Grupo de investigación en control, modelado, electrónica y simulación), en el área de la termodinámica y transferencia de calor, aplicada a la electrónica, y con el apoyo de la dirección general de investigaciones de la facultad de Fisicomecánicas (DIF). En este capítulo se hace un bosquejo del trabajo realizado, partiendo de la descripción del plan de proyecto, los objetivos iniciales, la justificación, las etapas de desarrollo y los logros obtenidos. Al final se presenta una descripción general de la organización y temática de los demás capítulos de este texto.

1.1 DESCRIPCION Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

Las altas temperaturas en un circuito son uno de los problemas más comunes en los sistemas electrónicos modernos. Los circuitos integrados son cada vez más rápidos y de menor tamaño, con una gran cantidad de transistores incorporados internamente. Esta alta densidad de semiconductores junto con las características de velocidad y tamaño desarrolladas y requeridas por la industria moderna, incrementan el calor generado por dispositivo. Dentro de los criterios de diseño de un circuito integrado se debe tener presente su transferencia de calor, puesto que ésta característica es de gran influencia para estimar su fiabilidad.

Para mejorar la transferencia de calor, tradicionalmente los sustratos en los chips microelectrónicos son hechos de materiales como la fibra de vidrio y tienen interconexiones de cobre que ayudan a la conducción de calor dentro del sustrato y fuera del micro chip. Otros diseños incluyen propagadores de calor suplementarios de cobre sólido u otro material conductor dentro del sustrato. Inclusive, se han desarrollado sustratos con una capa de diamante, pero su uso es muy limitado debido a su alto costo.

En los últimos años también se han construido dispositivos con micro canales y pequeños micro tubos de calor para implementarse a los chips y mejorar así su disipación de calor [1] (ver figura 1.1).

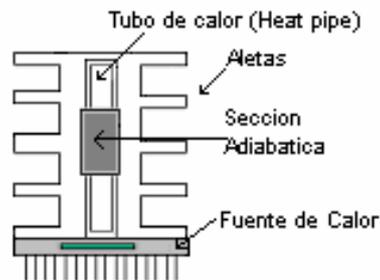


Figura 1.1 Aplicación de los tubos de calor en circuitos electrónicos.
(Referencia: http://www.univ-reims.fr/Labos/LEO/Qirt_2000/docs/7-12Legierski.htm).

Como se puede notar, las técnicas microelectrónicas ya no solo se usan para el desarrollo de dispositivos electrónicos sino también para el desarrollo de aplicaciones que ayuden a una buena transferencia de calor; esto ha provocado que junto con el avance de la tecnología microelectrónica, exista un gran desarrollo de la tecnología encargada del manejo térmico en dispositivos electrónicos, con el objetivo de crear nuevos mecanismos de transferencia de calor en los chips. Inclusive, la disipación de calor se ha constituido en un factor limitante para la futura miniaturización de los circuitos electrónicos [2].

Todo esto nos muestra que diseñar un circuito electrónico sin tener en cuenta su comportamiento térmico puede constituirse en un gran error. Un ejemplo es lo sucedido con el primer procesador Pentium, que a causa de su velocidad interna de operación generó un sobrecalentamiento y por ende, continuos errores de procesamiento de información.

La probabilidad de una falla en un sistema electrónico es extremadamente dependiente de su temperatura de operación, por lo que es necesario poder describir su comportamiento térmico para predecir futuros errores de funcionamiento así como evaluar su diseño. No es suficiente que un circuito electrónico funcione en forma apropiada, sino

también que su comportamiento térmico sea favorable para su implementación. Un buen desempeño térmico depende fundamentalmente, de que el diseño del circuito permita que el autocalentamiento generado por la potencia eléctrica que consume cuente con una efectiva disipación, de tal manera que la temperatura de sus componentes no se incremente. El propósito del presente trabajo es la descripción y análisis de éste autocalentamiento y no del calentamiento producido por fuentes externas de calor.

La figura 1.2 muestra los resultados de un estudio realizado por un programa de la fuerza aérea de los Estados Unidos sobre las principales causas de los daños en los circuitos electrónicos [3]. En esta gráfica se puede apreciar como los problemas referentes a la temperatura se constituye en la principal causa para que un sistema electrónico no se comporte correctamente.

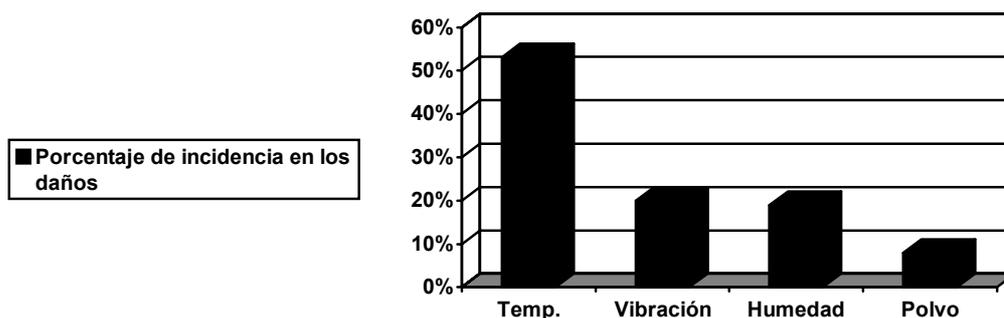


Figura 1.2. Causas de fallas en circuitos electrónicos.
(Referencia: USA Air Force Avionics Integrity Program. [www.flitherm.com]).

Dada la importancia de la influencia de la temperatura en la fiabilidad del comportamiento de los circuitos electrónicos, y dado que este incremento térmico es inversamente proporcional a la eficiencia del circuito en disipar el calor; es de gran utilidad, y en algunos casos, necesario, estimar cuantitativamente el flujo calorífico de los circuitos electrónicos durante su funcionamiento. Se necesita de un sistema (el cual se desarrolló en el presente trabajo) que realice ésta labor con las siguientes características:

- *Que realice un análisis directo y en tiempo real:* Se requiere de un sistema que evalúe el comportamiento calorífico del circuito durante el funcionamiento, esto para diferenciarlo de los sistemas computacionales que lo simulan.
- *Que se adecúe al tamaño de los circuitos comúnmente utilizados.* Si bien, existen equipos de medición de flujo de calor, la mayoría no se adecuan a esta necesidad específica.
- *Que sea confiable.* De tal manera que sirva como referencia para otros métodos cuya confiabilidad deba ser probada o que necesiten de calibración.
- *Que muestre los resultados de una manera clara y precisa.* Así el diseñador o el operador del circuito podrá contar con las herramientas necesarias para la toma de decisiones.
- *Que esté disponible en nuestro medio.*
- *Que sea reproducible.*

Contar con una manera viable y confiable de evaluar el comportamiento térmico de un circuito electrónico permitirá diseñar, construir y verificar con estándares de calidad más altos las aplicaciones electrónicas. En los países generadores de tecnología electrónica el factor térmico hace parte del diseño de cualquier aplicación; si se miran las especificaciones de cualquier dispositivo ya vienen incluidas las térmicas, y como se mencionó, inclusive se están generando aplicaciones microelectrónicas encargadas exclusivamente de mejorar la disipación de calor. Por lo tanto es necesario crear en nuestro medio esa cultura ya establecida en los países productores de electrónica, de tener en cuenta el diseño térmico en las aplicaciones que se desarrollen, y aun si no se genera tecnología, de verificar dicho desempeño en los circuitos que se adquieran. Un adecuado manejo de la temperatura en un circuito garantiza más de un 50% de su confiabilidad (ver figura 1.2), y se deben tener herramientas que permitan cuantificar estos parámetros.

1.2 METODOLOGIA DE DESARROLLO

Para poder realizar el análisis y descripción del comportamiento calorífico en tiempo real de un circuito electrónico, el proyecto se dividió en las tres etapas siguientes:

1.2.1 Construcción de un equipo de medida.

El equipo de medida tiene como función cuantificar el flujo calor generado por el circuito (en W/s). Este equipo es llamado “calorímetro”, puesto que mide directamente la cantidad de calor generado. La técnica usada para este propósito fue la calorimetría directa, la cual se describirá más detalladamente en el capítulo 2. Existen varios equipos que implementan esta técnica para medir flujo de calor, pero la diferencia fundamental del calorímetro desarrollado en este proyecto con respecto a los existentes en el mercado, es su diseño exclusivo para circuitos electrónicos.

Este equipo cuenta aparte con una interfaz electrónica a la que están conectados los sensores de temperatura usados en el calorímetro y por medio de la cual se realiza el respectivo acondicionamiento de las señales sensadas y se envían estos datos al computador. El computador analiza los datos por medio de una aplicación en Labview; también quedó la opción de mirar un registro general de datos por medio del hiperterminal de Windows, para el caso en que no este disponible el software Labiew. La interfaz cuenta además con un teclado y una pantalla que permite el análisis de datos aun si no se cuenta con un computador a la mano, y cumple funciones como almacenamiento de datos, activación y monitoreo de sensores, y otras que serán explicadas en el capítulo 4.

1.2.2 Calibración y pruebas al equipo.

Los requerimientos térmicos de un calorímetro son exigentes, tanto en su parte mecánica, como en su parte electrónica, por lo que en esta etapa se evaluaron y se dio una estimación del error en la medida que el equipo produce. Fue necesario diseñar un sistema de monitoreo de temperatura de una muy alta resolución y un sistema mecánico de muy poca transferencia de calor hacia el exterior. Para probar su funcionalidad, se analizó el flujo calorífico en bombillos de diferente consumo de potencia, y por ende, de

diferente disipación calorífica. Con las gráficas obtenidas de calentamiento y enfriamiento interno, se pudo caracterizar el calorímetro.



**Figura 1.3 Equipo de medida (Calorímetro para circuitos electrónicos).
(Referencia: Autor)**

1.2.3 Análisis y medición del flujo de calor en circuitos electrónicos prototipo.

Finalmente se hicieron las pruebas con circuitos electrónicos y en algunos casos se midió su comportamiento térmico, sin disipadores de calor, y con disipadores. Esto permitió conocer de una manera exacta la acción del disipador de calor sobre el circuito. Con los datos obtenidos se pudo esbozar de una manera general un modelo termodinámico de los circuitos.

1.3 LOGROS

Hasta ahora en nuestro medio no se conocía una alternativa precisa de cuantificar el flujo de calor de una tarjeta electrónica, por lo que el proyecto no solo tuvo el componente práctico expuesto, sino además un componente investigativo, ya que para llevarlo a cabo se usaron técnicas de calorimetría directa que son comunes en mediciones médicas, químicas o agrícolas, mas no en el ámbito electrónico.

Los datos recogidos por el sistema diseñado, también abrieron la posibilidad de analizar el manejo de potencia dentro del circuito, comparando su consumo de potencia eléctrica con su calor generado y su capacidad de disipación.

Además, el proyecto también realizó un aporte a la academia, ya que el área de la termodinámica y la transferencia de calor en la electrónica será un área de enseñanza continua en la escuela, y los resultados del proyecto ofrecen bases teóricas confiables del tema.

A la culminación de este proyecto, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Se inició una línea de investigación en el grupo CEMOS relacionada con la aplicación de la termodinámica en el diseño de circuitos electrónicos.
- Se diseñó y construyó un calorímetro capaz de medir el flujo de calor generado por unidad de tiempo (potencia) por un circuito eléctrico.
- Sirvió como apoyo para un proyecto de investigación inscrito en el DIF, relacionado con monitoreo de variables de proceso.
- Sirvió como apoyo para un trabajo de pregrado en Ingeniería Eléctrica (en proceso de culminación) que permitirá a futuro poder determinar digitalmente la potencia activa consumida por un sistema eléctrico.
- Se escribió un artículo para la revista de la facultad de Ingenierías Fisicomecánicas de la UIS.
- Se dejó el camino abierto para la realización de proyectos que involucren disipación de calor en circuitos.
- El grupo CEMOS ganó más experiencia en el área de modelado y diseño de equipos, desde el punto de vista termodinámico.

1.4 BOSQUEJO DEL PRESENTE TEXTO.

En el capítulo 2 se expone el marco teórico sobre el cual está soportado el proyecto. Allí se presentan definiciones básicas y se explica la primera ley de la termodinámica junto con la calorimetría directa y su relevancia en la medición calorífica en circuitos. También se muestran los distintos tipos de sensores de temperatura, haciendo énfasis en los termistores, los cuales se usaron en el calorímetro. Finalmente se hacen consideraciones sobre potencia eléctrica, ya que esta es la que finalmente se convierte en calor en un circuito.

El capítulo 3 muestra el diseño y construcción del calorímetro, los materiales usados, las dimensiones, las características técnicas del equipo y las recomendaciones para futuros prototipos. Es interesante aquí poder ver como se diseña un equipo que se ajusta a los requerimientos propios de la calorimetría directa (explicados en el capítulo 2) aplicada a la electrónica. Aunque se tomaron como referencia equipos de calorimetría directa usados en otras áreas de investigación diferentes a la electrónica, el diseño del calorímetro es propio del grupo CEMOS.

En el capítulo 4 se describen las características de la interfaz electrónica, encargada del monitoreo, almacenamiento y transmisión de las señales de temperatura. Este equipo fue diseñado para trabajar con rangos de temperatura de 0 a 100°C y una resolución de 0.03°C. Aquí también se describen el software de la interfaz y la aplicación en labView para un análisis en tiempo real.

El capítulo 5 describe las pruebas al equipo con bombillos de diferente consumo de potencia.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones, y se anexan las hojas de datos de los circuitos integrados usados y los diagramas de bloques de los algoritmos de programación de la interfaz electrónica.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos sobre los que se basa este trabajo. Básicamente se mencionan algunos temas propios de la termodinámica como la primera ley y conceptos básicos de transferencia de calor. Además se hace referencia a la medición de temperatura y los distintos tipos de sensores disponibles. Otro aspecto importante que se trata es el relacionado con la calorimetría directa, sobre la cual está basada la parte experimental de este proyecto. Finalmente se explicará el significado de “potencia eléctrica”. En la medida en que se van presentando las definiciones, se tratarán de relacionar con el tema de interés: flujo de calor en circuitos electrónicos. Todos estos conceptos son fundamentales si se quiere entender y justificar las características de diseño del calorímetro para circuitos electrónicos, presentadas en los capítulos 3 y 4.

2.1 DEFINICIONES BASICAS EN TERMODINÁMICA [1]

El objetivo general de la termodinámica, es, a partir de unas leyes, obtener relaciones entre las propiedades macroscópicas de un determinado sistema cuando este se somete a algún proceso. El primer paso y el más importante, es entonces determinar con claridad el sistema a analizar, que en este caso es un circuito electrónico, aunque en el desarrollo del texto se aclararán las condiciones de este sistema o si se habla de otro sistema. Dentro de las fronteras de nuestro sistema, no se incluye normalmente la fuente de poder del circuito, por lo que la potencia consumida va a ser una variable de entrada al sistema y no parte de él. Igualmente, el ambiente que rodea al circuito tampoco hace parte del sistema (esta fuera de su frontera) por lo que el flujo de calor que cede el circuito será una variable de salida del sistema, figura 2.1. Sin embargo, si el circuito ejecuta algún trabajo mecánico, el dispositivo que mueva, o que sea afectado por el trabajo que el circuito esté entregando, se tratará de incluir dentro del sistema a analizar, para que en lo posible no se incluya dicho trabajo como salida del sistema. Si este trabajo mecánico está dentro del

sistema, de todas maneras a la postre se convertirá en calor y se seguirán teniendo solo dos variables en el sistema: potencia consumida y calor entregado (además del cambio de energía interna, pero esto se verá más adelante). Si para propósitos prácticos, es imposible colocar dentro del sistema a analizar este trabajo mecánico, entonces habrá que añadir al análisis otra variable de salida: Potencia entregada por el circuito.

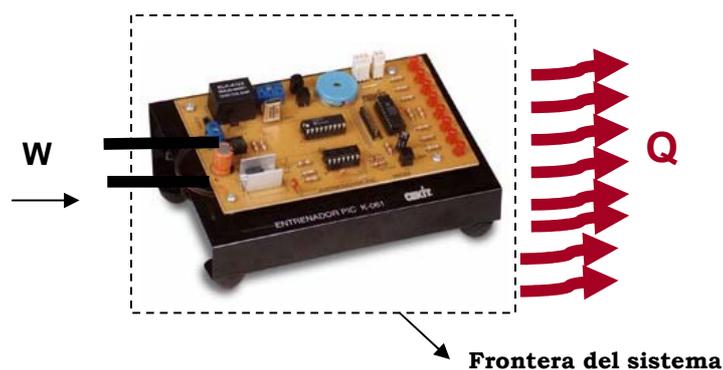


Figura 2.1 Un circuito como sistema termodinámico.
(Fuente: Autor)

2.1.1 Calor

Es una forma de energía que se transfiere a través de los límites de un sistema a otro en virtud de su diferencia de temperatura. Ningún sistema “contiene calor”, este concepto solo aparece cuando hay transferencia de energía, figura 2.2

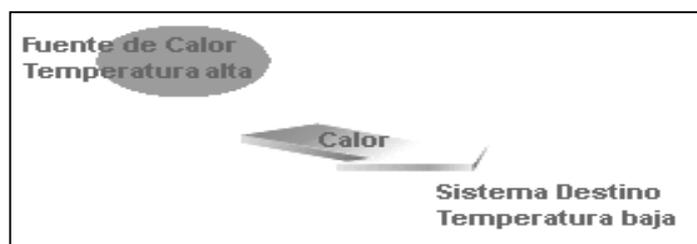


Figura 2.2 Definición de Calor.
(Fuente: <http://www.edu.aytolacoruna.es/aula/fisica/fisicalInteractiva/Calor/>)

En la medida en que existe esta transferencia de energía, las temperaturas que la producen tienden a igualarse, la temperatura mayor desciende y la menor aumenta, hasta que haya equilibrio térmico (que es la ley cero de la termodinámica).

Por lo tanto, un circuito no contiene calor, pero sí tiene incrementos de temperatura internos que conducirán a un gradiente de temperatura con respecto a la temperatura ambiente y se producirá flujo de calor.

Un sistema que no permite el flujo de calor a través de sus fronteras, se denomina sistema adiabático. Para que haya flujo de calor, el sistema debe permitir en sus fronteras la acción de alguno de los tres mecanismos de transferencia de calor que serán explicados en la sección 2.3. Por lo tanto, si un circuito no ofrece mecanismos efectivos de transferencia de calor, el flujo de energía disminuye y el desequilibrio térmico entre el circuito y su ambiente se prolonga, y debido al consumo de potencia del circuito que si es constante, la temperatura interna del circuito aumenta desmedidamente.

El propósito del presente proyecto es medir de una manera cuantitativa la velocidad de este flujo calorífico en los circuitos y así determinar su comportamiento termodinámico.

2.1.2 Trabajo

Es otra forma de energía. Físicamente se define como una fuerza F actuando a lo largo de un desplazamiento x en la misma dirección de la fuerza. Este concepto se podría generalizar para cualquier tipo de trabajo (no solo mecánico) como la acción de una propiedad intensiva (independiente de la masa) y el cambio de una propiedad extensiva (que varía con la masa).

En termodinámica se dice que un sistema ejecuta trabajo si el único efecto en el medio exterior (cualquier cosa externa al sistema) puede ser el levantamiento de un peso. Por ejemplo, un circuito electrónico que consume cierta potencia en virtud del voltaje y la corriente que maneja al colocarle a una carga (Ver numeral 2.6) podría ser conectado a los bornes de un motor que a su vez levante un peso durante su funcionamiento;

termodinámicamente se dice que la energía usada por el circuito esta en forma de trabajo, ya que su efecto podría ser el de levantar un peso.

Es importante aclarar que si bien el efecto podría ser el levantamiento de un peso, no necesariamente tiene que estar levantando el peso para que sea considerado trabajo. La energía que consume un circuito electrónico es considerada trabajo levante o no un peso, y si es usada para eso, quiere decir que luego se convierte en energía cinética y/o un cambio en la energía interna del sistema, pero si no, se convierte en otra forma de energía que normalmente resulta en forma de calor.

Tanto el calor, como el trabajo, son formas de energía que solo aparecen durante un proceso y no son variables de estado, es decir, su magnitud depende de la trayectoria que realizaron en dicho proceso, a diferencia de variables como la presión, o la temperatura, cuyos valores no dependen de la trayectoria. Por eso es también incorrecto afirmar que un sistema posee trabajo, ya que para que haya trabajo, debe haber desplazamiento (en el caso de la potencia eléctrica, hay un “desplazamiento” de corriente en virtud de una diferencia de potencial). Todo sistema para cambiar su estado, necesita un proceso que involucre realizar o recibir trabajo, o absorber y ceder calor. Los circuitos electrónicos en funcionamiento realizan transformaciones constantes de energía, y casi siempre se realiza trabajo sobre el sistema, y el sistema en compensación cede calor.

2.1.3 Caloría

La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del agua de 14.5°C a 15.5°C se denomina caloría, esta es usada como unidad de medida para el calor. En el sistema internacional la unidad de medición para la energía es Julios (J), y dado que el calor es una forma de energía la caloría tiene un equivalente en julios; el físico ingles James Prescott Joule (1818-1889) mediante un experimento determinó que una caloría equivale a 4.181 J.

2.1.4 Calor específico

La Cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura un grado se denomina capacidad calorífica del elemento. El calor específico es la capacidad calorífica por unidad de masa de dicha sustancia.

2.1.5 Relación Calor – Temperatura

Para que un sistema cambie su temperatura (y en general cualquier cambio de estado) se necesita agregarle o quitarle cierta cantidad de energía (calor en este caso). La termodinámica clásica relaciona la energía necesaria para dicho cambio con el gradiente de temperaturas asociado por medio de la ecuación 2.1:

$$Q = mc_p\Delta T \quad (2.1)$$

Donde m es la masa del sistema (Kg), C_p su calor específico (J/ Kg K) y Q es la energía asociada al cambio de temperatura (J) y ΔT es el cambio de temperatura en K.

La ecuación 2.1 muestra que para que una medición de flujo de calor sea posible, es necesario que el sistema afectado tenga una masa y un calor específico conocido, además de una distribución de temperatura uniforme en toda la masa. Si consideramos a un circuito electrónico como sistema, definitivamente no cumple estas condiciones, es decir, no se puede hablar del calor específico de un circuito, ya que en su totalidad está compuesto con diferentes materiales, y mucho menos se puede afirmar que su temperatura es uniforme en toda su masa, ya que la realidad es que hay puntos calientes, y puntos fríos; por lo tanto es prácticamente imposible usar la ecuación 2.1 directamente en un circuito para calcular el flujo de calor.

Es necesario entonces buscar la manera de transferir el flujo de calor del circuito, a un sistema que si tenga calor específico conocido y que si pueda tener una distribución de temperatura uniforme. Como se verá más adelante, de esto se encarga la calorimetría directa y por lo tanto la ecuación 2.1 se convertirá en la base de los cálculos.

2.2 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Cuando un sistema experimenta un ciclo, la primera ley de la termodinámica dice que la transferencia de calor neta durante el ciclo es igual al trabajo realizado por el sistema durante ese ciclo. Ahora, si existe un cambio de estado en el sistema, es decir, si el sistema no regresa a su estado original, la diferencia entre la transferencia de calor y el trabajo realizado durante el proceso es igual al cambio de energía del sistema; esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} dE &= \delta Q - \delta W \\ \delta Q &= dE + \delta W \end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde Q es calor y W trabajo, ambos dados en unidades de energía (Nm=J). La energía (E) es la suma de la energía interna del sistema, su energía potencial y su energía cinética:

$$E = EC + EP + E \text{ int.} \tag{2.3}$$

La energía interna de un sistema, es entonces toda forma de energía que no es ni potencial ni cinética, como por ejemplo la energía química, la energía asociada al movimiento interno de las moléculas o la energía asociada a la estructura atómica. En circuitos electrónicos, existen elementos que almacenan energía como condensadores o bobinas, cuya energía se puede catalogar dentro del circuito como energía interna. A la energía interna normalmente se le señala como U . La ecuación general de la primera ley para un sistema que cambia del estado 1 al estado 2 (sin transferencia de masa) es entonces de la siguiente forma:

$$\begin{array}{cccccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \\ \text{Transferencia de} & \text{Cambio de} & \text{Cambio de} & \text{Cambio de energía} & \text{Trabajo} & \\ \text{calor neta} & \text{energía interna} & \text{energía cinética} & \text{potencial} & \text{Realizado} & \\ {}_1Q_2 = U_2 - U_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1W_2 & & & & & \end{array} \tag{2.4}$$

Otra manera más común de enunciar la primera ley de la termodinámica es decir que la energía no se crea ni se destruye, sino se transforma. Visto esto a través de las ecuaciones, significa que la energía neta del sistema tiene que estar presente o en forma de trabajo o en forma de calor o en forma de energía cinética potencial o interna. Si el sistema lo permite, pueden haber transformaciones de un tipo de energía a otro; por ejemplo en los circuitos electrónicos existen transformaciones constantes de energía en forma de trabajo a energía en forma de calor.

2.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. [2]

La transferencia de calor estudia el intercambio de energía por causa de una diferencia de temperatura, la rapidez de dicho intercambio y la determinación de las temperaturas asociadas. La termodinámica predice la cantidad de calor que interviene en un proceso (ecuación 2.1) sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución, mientras que un estudio de transferencia de calor en un sistema analiza la *rapidez* de dicha transferencia.

Existen tres modos básicos de transferencia de calor: por conducción, por convección y por radiación. La conducción de calor se lleva a cabo a través de un cuerpo sólido, la convección de calor se realiza en la superficie de un cuerpo en virtud de un fluido en movimiento, y la radiación se refiere a la energía involucrada en la radiación electromagnética propia de la materia.

2.3.1 Transferencia de calor por conducción.

Trasferencia de energía a través de un cuerpo, desde la región de alta temperatura hacia la región de baja temperatura, proporcional a la conductividad del cuerpo, el área transversal al flujo de calor y a la diferencia de temperatura, e inversamente proporcional a la distancia de transferencia:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.5)$$

Esta expresión es conocida como la ley de Fourier. q es el flujo de calor (W), A es el área transversal perpendicular al flujo de calor (m^2), T es la temperatura dada en grados Kelvin (K), x es la coordenada en dirección del flujo y k es la conductividad térmica del sólido cuyas unidades son entonces (W/mK). La conductividad es una propiedad de los materiales que dice cuán fácil es la conducción de calor a través de ellos, depende de su estructura microscópica y tiende a variar con la temperatura. Esta es elevada en metales y en general en cuerpos continuos que sean buenos conductores de electricidad, y es baja en los gases y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, corcho o poliestireno que se denominan por eso aislantes térmicos. En la tabla 2.1 se presentan algunos valores de conductividad para ciertos materiales.

Mas adelante, en el capítulo 3, que trata sobre la construcción del equipo de medida usado en este trabajo, se hará referencia a algunos datos de la tabla 2.1.

La ecuación 2.5 muestra la conducción de calor solo a lo largo del eje de coordenadas cartesianas x , sin embargo en un problema real puede haber conducción de calor en las otras dos direcciones de este sistema de coordenadas. Una ecuación más general para la conducción de calor es la ecuación 2.6

Material	[W/(m K)]
Diamante	2300
Tántalo	575
Plata	420
Cobre	400
Aluminio	240
Vidrio. Hormigón	0,8
Agua	0,59
Madera. Asbestos	0,08
Poliestireno	0,028
Aire	0,024

Tabla 2.1. Conductividad térmica de algunos materiales.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi = -\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 es la ecuación general de la conducción de calor tridimensional en estado transitorio y con generación interna de calor, donde ϕ es la energía generada en el interior del elemento por unidad de volumen y de tiempo (W/m^3), c es el calor específico del material (J/Kg K) y ρ es su densidad (Kg/m^3).

Resolver analíticamente la ecuación 2.6 (que es una ecuación en derivadas parciales) para un problema particular es en algunos casos muy difícil, por lo que para resolverla normalmente se emplean métodos numéricos o se hacen consideraciones especiales sobre el problema para que la solución analítica sea factible. Las consideraciones más comunes tienen que ver con reducir el problema a una o dos dimensiones y considerar la conductividad térmica constante con la temperatura; el problema se reduce aún más si es no estacionario. Obviamente, cualquier consideración que se haga, debe ser con argumentos que prueben que en la realidad el comportamiento del sistema se puede ajustar a ellas. Otra manera de agilizar la solución es transformar la ecuación a otro sistema de coordenadas que se adapte más a la geometría del problema; por ejemplo, si se desea describir el flujo de calor a través de un cilindro, es mucho más cómodo trabajar en coordenadas cilíndricas. Si se considera que la conductividad térmica es constante, la ecuación 2.6 en coordenadas cartesianas y cilíndricas respectivamente, queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\phi}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\phi}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.8)$$

Donde $\alpha=k/\rho c$ es la difusividad térmica del material, la cual entre mayor sea, mas rápidamente se difundirá el calor a través de él.

Cuando el problema es unidimensional y estacionario, normalmente para resolverlo se aplica la primera ley de la termodinámica a un volumen elemental y se obtiene una ecuación diferencial aplicando la ley de Fourier al análisis. Si el problema es multidimensional, bajo condiciones especiales del problema, se han definido ciertas ecuaciones que los matemáticos han estudiado a fondo: La ecuación de *Fourier* (ecuación 2.7), la ecuación de *Poisson* (Ecuación 2.7 pero en régimen estacionario) y la ecuación de *Laplace* (Ecuación 2.7 en régimen estacionario y sin generación interna de calor).

2.3.2 Transferencia de calor por convección.

Transferencia de calor que se lleva a cabo desde una superficie hacia un fluido en movimiento. Puede existir un flujo natural, o un flujo forzado. Ejemplos clásicos de convección son: el movimiento del viento sobre la tierra, la circulación del agua en un tubo o el movimiento de gas en un heatpipe (dispositivo disipador de calor); un ejemplo de convección forzada es el aire de un ventilador incidiendo sobre un disipador de calor con aletas en un circuito electrónico.

No es posible, en general, escribir una ecuación simple que relacione el flujo de calor por convección a gradientes de temperatura u otros parámetros termodinámicos, cada caso debe tratarse por separado. En el caso de un flujo forzado externo, la tasa de transmisión de calor por convección desde una superficie de área A está dada aproximadamente por la fórmula:

$$q = hA(T_p - T_\infty). \quad (2.9)$$

Que se conoce como ley de enfriamiento de Newton, donde T_p es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura de la corriente libre del fluido y h es una constante de proporcionalidad que depende de la forma y la orientación de la superficie y también de

$\Delta T = T_p - T_\infty$. Cuando se trata de convección natural, normalmente el flujo de calor no es proporcional a ΔT , sino a potencias de ΔT como $\Delta T^{5/4}$ o $\Delta T^{4/3}$, dependiendo de la velocidad y/o viscosidad del flujo.

2.3.3 Aletas disipadoras de calor.

Una aplicación en la que los principios de conducción y convección actúan simultáneamente, es en el análisis de aletas disipadoras (conocidas comúnmente como disipadores de calor) para circuitos electrónicos. Estas aletas normalmente se colocan en dispositivos electrónicos que manejan alta potencia con el propósito de disipar el calor y evitar que las altas temperaturas lo quemem. En la figura 2.3 se pueden observar distintos tipos de geometrías.

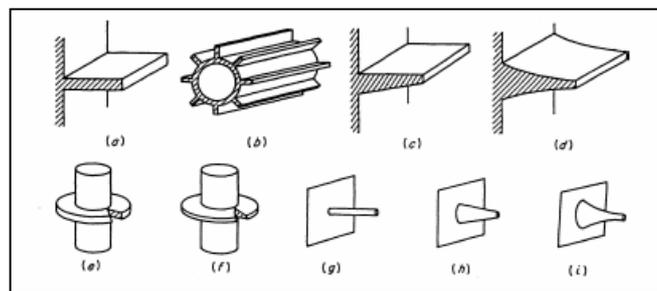


Figura 2.3 Aletas disipadoras de Calor
(Fuente: www.ajou.ac.kr/~mems/detail.htm.)

Considerando flujo unidimensional a través de una aleta, se pueden determinar fácilmente las ecuaciones diferenciales que gobiernan la variación de temperatura a lo largo de ella, ecuaciones cuya solución depende de las condiciones de contorno de la aleta. Estas pueden ser esencialmente tres: uno, que en el extremo de la aleta halla pérdida de calor por convección, dos, que el extremo esté aislado, y tres, que la aleta sea de tal longitud que para el análisis del problema se pueda suponer longitud infinita. Para cada una de las condiciones hay una solución de la ecuación diferencial.

Como ejemplo, para una aleta rectangular recta como la mostrada en la figura 2.3 (a) la ecuación diferencial a resolver es la siguiente

$$kA_c \frac{d^2 T}{dx^2} - hP(T - T_\infty) = 0 \quad (2.10)$$

Donde A_c es el área de la sección transversal de la aleta y P es el perímetro a lo largo de ella. Al resolverla teniendo en cuenta la primera condición de contorno antes mencionada y conociendo la temperatura de la base de la aleta T_B (segunda condición de contorno general para cualquier caso) la solución de la ecuación es la siguiente:

$$\frac{T - T_\infty}{T_B - T_\infty} = \frac{\cosh m(L - x) + (h / mk) \sinh m(L - x)}{\cosh mL + (h / mk) \sinh mL} \quad (2.11)$$

Donde $m^2 = hP/kA$ y L es la longitud de la aleta. Esta es la distribución de temperaturas a lo largo de la aleta en función de la distancia a la base (x). Si el problema se resuelve usando la segunda condición de frontera mencionada, el resultado es:

$$\frac{T - T_\infty}{T_B - T_\infty} = \frac{\cosh m(L - x)}{\cosh mL} \quad (2.12)$$

Y con la tercera condición:

$$\frac{T - T_\infty}{T_B - T_\infty} = e^{-mx} \quad (2.13)$$

A partir de la ley de Fourier (teniendo en cuenta que todo el calor perdido por la aleta debe ser conducido hacia la base en $x=0$) junto con la distribución de temperatura a lo largo de la aleta, se puede calcular la pérdida de calor en ella. Por ejemplo, en el caso de la ecuación 2.13 esta pérdida da:

$$q = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = -m(T_B - T_\infty)e^{-m(0)} = \sqrt{hPkA}(T_B - T_\infty) \quad (2.14)$$

Los demás casos se dejan como ejercicio.

En la práctica, un disipador de calor se debe construir con un material con alta conductividad térmica. Observando la Tabla 2.1 el diamante tiene una conductividad térmica de 2300W/mK pero es extremadamente caro y no se le puede dar forma; el mejor material maleable es el tántalo, el problema es que es muy raro en la naturaleza y por ello bastante caro también. Como segunda opción esta la plata, menos cara pero no a un precio asequible. Los siguientes son el cobre, oro y aluminio. Evidentemente el oro queda descartado por su elevado precio así que quedan el cobre y el aluminio que son los metales más usados en los disipadores. Muchos disipadores de bajo precio están fabricados en acero siendo casi inútiles en la refrigeración de integrados. A veces lo importante no es la elección de uno u otro metal lo que más influye sino es mas determinante el diseño. Aunque efectivamente el cobre conduce mucho mejor el calor, el aluminio necesita más energía para subir su temperatura, así el alto calor específico compensa a una menor conductividad atenuando las variaciones de calor y la diferencia en la práctica no es tan grande como se podría esperar en un principio.

Para el desarrollo de este proyecto, las propiedades conductivas de las aletas son fundamentales para el funcionamiento del equipo de calorimetría diseñado. En el capítulo 3 se muestra el diseño de unas aletas colocadas en el interior de una caja con el propósito de aumentar la transferencia de calor a la superficie de la caja. Normalmente las aletas son usadas para transmitir el calor desde su base, la cual está conectada al sistema caliente, hasta la punta de la aleta, y luego allí por convección disipar el calor. Sin embargo en el diseño mostrado en el capítulo 3, no se quiere transferir calor desde una base, sino hacia una base, por lo que se usan las aletas en sentido inverso. Esto no se hace comúnmente, pero se obtuvieron buenos resultados.

2.3.4 Transferencia de calor por radiación

Se refiere a la Transferencia de calor por medio de la radiación electromagnética. Si esta radiación es por causa de una diferencia de temperaturas se denomina radiación térmica; la agitación térmica hace que los electrones se muevan de unas bandas de energía a otras emitiendo así fotones en la banda del espectro electromagnético infrarrojo. Por radiación es la manera en la que nos llega el calor de una fogata o el calor del sol siendo mucho más absorbentes las superficies oscuras y sin brillo.

Una ecuación general y simplificada que describe la transferencia de calor por radiación térmica entre una superficie T_1 encerrada completamente por otra superficie mucho mayor que se mantiene a T_2 , es la siguiente:

$$q = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4). \quad (2.15)$$

Donde σ es la constante de proporcionalidad y se denomina constante de Stefan–Boltzman, que tiene un valor de $5,669 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$, ε es el factor de emisividad el cual compara la capacidad de radiación de la superficie con la de un cuerpo que radia en forma ideal (cuerpo negro) y A es el área de la superficie a temperatura T_1 .

Específicamente en un circuito electrónico, la radiación infrarroja emitida por las resistencias y transistores es absorbida por el silicio de la cubierta sin salir al exterior, por lo que la radiación es insignificante comparada con las otras formas de transmisión de calor. Sin embargo si es una resistencia lumínica, como un bombillo, mas del 60% del calor es transmitido por radiación (según la eficiencia del bombillo). En algunos sistemas electrónicos es algo complicado determinar exactamente el porcentaje de calor transferido por conducción, el porcentaje por convección y el porcentaje por radiación de forma separada, sin embargo lo que si se puede afirmar es que la suma de los tres métodos, da el calor total disipado. De acuerdo al diseño del calorímetro para circuitos electrónicos que será presentado en el capítulo 3, no interesará determinar por separado la acción de cada método, sino se tendrá un resultado total debido a los tres métodos.

2.4 MEDICION DE TEMPERATURA [4]

Para la medición de temperatura existen básicamente cuatro tipos de sensores: Termopar, RTD, Termistor y sensores basados en uniones semiconductoras. A continuación se mencionan las características principales de cada uno.

2.4.1 Termopar

Es un conjunto de dos metales distintos con una unión firme en un punto o en una zona. La medición de temperatura es posible gracias al efecto Seebeck, atribuido a Thomas J. Seebeck, quien descubrió que en un circuito de dos metales distintos homogéneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, aparece una corriente eléctrica.

Los valores de tensión en función de la temperatura de los termopares, están tabulados. Una fórmula aproximada del comportamiento de la tensión en un termopar es:

$$V_{AB} = C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2) \quad (2.16)$$

T_1 y T_2 Son las temperaturas de cada unión y C_1 y C_2 son constantes que dependen de los materiales A y B.

Como desventajas en un termopar, está su no linealidad y su poca estabilidad y sensibilidad. Como ventajas principales están su alcance para medir grandes temperaturas, su tiempo de respuesta relativamente rápido, su robustez, simplicidad, variedad de tipos y economía. Para aplicaciones industriales son los más usados.

2.4.2 RTD

Los RTD (*Resístanse Temperature Detector*) son detectores de temperatura basados en una resistencia eléctrica, con coeficiente positivo (aumento de resistencia con la

temperatura). Su fundamento es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Esta dependencia se puede expresar de la forma:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n) \quad (2.17)$$

Donde R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia, T el incremento de temperatura respecto a la de referencia y $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$, son constantes dependientes del material. Algunos materiales de los que esta construido un RTD son el platino, el cobre, el níquel o el molibdeno.

Este sensor tiene como limitaciones que no se pueden medir temperaturas próximas ni superiores a la fusión del conductor, que los autocalentamientos del sensor interfieren considerablemente con la fidelidad de la medida y que la presencia de deformaciones mecánicas provoca también cambios en la resistencia eléctrica.

Como ventajas, se tiene que su sensibilidad es unas 10 veces mayor a la de los termopares, la alta repetibilidad, estabilidad a largo plazo y exactitud en el caso del platino, y el bajo costo en el caso del cobre y del níquel.

2.4.3 Sensores basados en uniones semiconductoras

Se basan principalmente en la dependencia térmica de la tensión base-emisor, V_{BE} , de un transistor, cuya corriente de colector sea constante.

Ya varias empresas aprovechando esta característica han diseñado circuitos integrados donde por medio de arreglos internos de transistores y amplificadores, logran volverlos muy sensibles a cambios de temperatura. La tabla 2.2 muestra algunas referencias.

Estos sensores se usan frecuentemente en multímetros digitales, y en aplicaciones para medir la temperatura en componentes activos en funcionamiento (si la sonda se aísla eléctricamente). Su ventaja es que su respuesta es lineal, muy exacto y económico, pero

su rango de medida no es muy alto, requiere fuente de alimentación y es un poco lento con respecto al RTD y el termistor.

Modelo	Sensibilidad	Margen	Exactitud
AD592CN	1 μ A/K	-25°C a + 105°C	0.3°C
LM35	\pm 10 mV/K	-55°C a + 150°C	\pm 0.25°C
LM335A	10 mV/K	-40°C a + 100°C	\pm 1°C
MMBTS 102	-2,25 mV/K	-40°C a + 150°C	\pm 2°C
REF-02A	2,1 mV/K	-55°C a + 125°C	\pm 0.5°C
TMP-01	5 mV/K	-55°C a + 125°C	\pm 0,6°C

Tabla 2.2. Algunas referencias de sensores basados en uniones semiconductoras. (Fuente: Pallas Areny, Sensores y acondicionadores de señal, 3 edición, pg 387).

2.4.4 Termistor.

Es otra clase de sensor resistivo. Los termistores son resistores variables con la temperatura basados en semiconductores. Si su coeficiente de temperatura es negativo se denomina NTC, (*Negative Temperature Coefficient*) mientras que si es positivo se denomina PTC (*Positive Temperature Coefficient*).

Para las NTC en un margen de temperaturas reducido (50°C), la dependencia se puede considerar de tipo exponencial de la forma:

$$R_T = R_0 \exp\{B(1/T - 1/T_0)\} \quad (2.18)$$

Donde R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia y T_0 es dicha temperatura expresada en Kelvins. El parámetro B es denominado temperatura característica del material, y tiene valores de 2000K a 5000K.. Una ecuación como la 2.18 ofrece un error del orden de \pm 0,3°C; se han modelado otras ecuaciones con más parámetros además de B , que hacen que se logren errores de solo \pm 0,01°C en un margen de 100°C.

Aunque el termistor no es lineal es el sensor que mas sensibilidad ofrece a cambios de temperatura. Sus limitaciones son similares a las mencionadas para los sensores RTD. Con los termistores, se puede obtener alta resolución en la medida de temperatura, a causa de su sensibilidad y una velocidad de respuesta máxima por su alta resistividad y pequeña masa. Pueden ser usados para medición externa de temperatura, o para la medición del autocalentamiento del propio circuito de medida. Esto los hace ideales para muchas aplicaciones prácticas.

La no linealidad de los termistores ya no es impedimento para usarlo en aplicaciones, ya que junto con el tipo de termistor se ofrecen los parámetros propios del material, las curvas o tablas de comportamiento R Vs T, o existen varias técnicas de linealización por medio de resistencias de precisión (aunque en este caso se pierde sensibilidad). Por ejemplo, la tabla de resistencia Vs temperatura de los termistores usados en el proyecto se muestra en la tabla 2.3.

TEMP (°C)	RESIS (Ω)												
-55	963,730	-22	109,710	11	18,970	44	4,543	77	1,385	104	804.6	130	301.0
-54	895,230	-21	102,900	12	18,089	45	4,368	78	1,340	105	587.6	131	293.6
-53	832,040	-20	97,072	13	17,254	46	4,201	79	1,297	106	571.2	132	286.3
-52	773,710	-19	91,613	14	16,462	47	4,042	80	1,256	107	555.3	133	279.3
-51	719,880	-18	86,494	15	15,711	48	3,889	81	1,215	108	539.9	134	272.4
-50	670,090	-17	81,689	16	14,998	49	3,742	82	1,177	109	525.0	135	265.8
-49	624,090	-16	77,183	17	14,322	50	3,602	83	1,140	110	510.6	136	259.4
-48	581,540	-15	72,951	18	13,680	51	3,468	84	1,104	111	496.7	137	253.1
-47	542,170	-14	68,977	19	13,071	52	3,340	85	1,070	112	483.2	138	247.1
-46	505,710	-13	65,242	20	12,492	53	3,217	86	1,037	113	470.2	139	241.1
-45	471,940	-12	61,732	21	11,942	54	3,099	87	1,005	114	457.5	140	235.4
-44	440,630	-11	58,431	22	11,419	55	2,986	88	973.8	115	445.2	141	229.8
-43	411,600	-10	55,326	23	10,922	56	2,878	89	944.1	116	433.4	142	224.4
-42	384,670	-9	52,404	24	10,450	57	2,774	90	915.4	117	421.9	143	219.1
-41	359,670	-8	49,654	25	10,000	58	2,675	91	887.8	118	410.8	144	214.0
-40	336,450	-7	47,084	26	9,572	59	2,579	92	861.1	119	399.9	145	209.0
-39	314,880	-6	44,625	27	9,165	60	2,488	93	835.4	120	389.6	146	204.2
-38	294,820	-5	42,326	28	8,777	61	2,400	94	810.6	121	379.4	147	199.4
-37	276,170	-4	40,158	29	8,408	62	2,316	95	786.6	122	369.6	148	194.9
-36	258,820	-3	38,115	30	8,057	63	2,235	96	763.5	123	360.1	149	190.4
-35	242,680	-2	36,187	31	7,722	64	2,157	97	741.2	124	350.9	150	186.1
-34	227,610	-1	34,368	32	7,403	65	2,083	98	719.6	125	341.9		
-33	213,590	0	32,650	33	7,098	66	2,011	99	698.7	126	333.2		
-32	200,520	1	31,029	34	6,808	67	1,941	100	678.6	127	324.8		
-31	188,330	2	29,498	35	6,531	68	1,876	101	659.1	128	316.7		
-30	176,960	3	28,051	36	6,268	69	1,813	102	640.3	129	308.7		
-29	166,340	4	26,684	37	6,016	70	1,752	103	622.1				
-28	156,430	5	25,391	38	5,775	71	1,693						
-27	147,160	6	24,169	39	5,546	72	1,636						
-26	138,500	7	23,012	40	5,326	73	1,582						
-25	130,410	8	21,917	41	5,117	74	1,530						
-24	122,840	9	20,880	42	4,917	75	1,479						
-23	115,750	10	19,899	43	4,726	76	1,431						

SCALE	NONE	U.S. SENSOR CORP.
BY	T. SONICVILLE	
DATE	11/14/90	RESISTANCE-TEMPERATURE TABLE
REV.	NONE	10,000 Ω "J"
LAYER	D OF 1	

Tabla 2.3. Relación Temperatura Vs Resistencia de un termistor.
(Fuente: Ussensor, Internet)

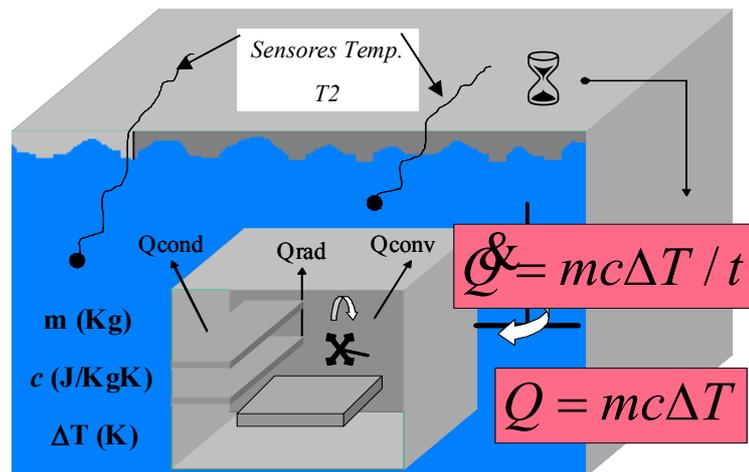
2.5 CALORIMETRIA DIRECTA

El objetivo de esta técnica es medir directamente el calor liberado por un sistema en un cierto tiempo. Las técnicas más usadas para medir el calor son las indirectas, como por ejemplo en aplicaciones médicas, donde se mide la energía química del ser vivo y con ese dato se calcula indirectamente el calor (usando la primera ley de la termodinámica). La ventaja de estas técnicas es que son más sencillas de implementar, pero no ofrecen la exactitud y confiabilidad que ofrecen las técnicas directas, y por lo tanto no sirven como referencia; de hecho, si se quiere comprobar la efectividad de una técnica indirecta, se comparan sus resultados con los obtenidos por las técnicas directas. [3]

En la calorimetría directa, el proceso básicamente consiste en colocar el objeto a ser medido en una cámara. Sus requerimientos son algo exigentes, ya que debe estar bien aislada térmicamente del resto de fuentes de calor y además su geometría interna debe estar diseñada de tal manera que mejore la transferencia de calor a través de ella. Hay un circuito por fuera de la cámara que contiene un fluido, y un sensor que mide su temperatura, la cual se incrementará por causa del calor producido por radiación del objeto dentro de la cámara, por convección del aire dentro de ella y por conducción a través de sus paredes. Se sabe la masa del fluido, su calor específico, cuántos gramos del fluido se han calentado y el gradiente de temperatura entre su estado inicial y su estado final después de cierto tiempo, así se puede valorar las calorías producidas por radiación convección y conducción (en J) con la ecuación 2.1 (ver figura 2.4). Para asegurar que el calor producido es un reflejo del comportamiento energético del objeto, se debe garantizar que no se ha realizado ningún trabajo externo previo.

Si además del cambio de temperatura del fluido se mide el tiempo de este cambio, se podrá determinar también el flujo de calor (en W). Esto es muy importante, ya que la rapidez de cambio de temperatura medida, es el reflejo de la capacidad que tiene el objeto de disipar el calor, aspecto indispensable en el funcionamiento de circuitos electrónicos.

En muchas áreas de aplicación, como la medicina y la química, se ha demostrado que los resultados de esta técnica ofrecen un porcentaje de error inferior al 2%, por lo que es una técnica muy exacta.



**Figura 2.4 Ejemplo de calorimetría directa
(Fuente: Autor)**

En el caso de este trabajo, el objeto a ser medido será un circuito electrónico, al cual se le aplicará esta técnica de calorimetría directa por medio de un “calorímetro para circuitos electrónicos”, que tendrá las especificaciones mencionadas adaptadas a este tipo de objeto: una cámara en la que se pondrá el circuito, y un fluido circundante, en este caso agua, al cual se le medirá la temperatura con termistores. Este tipo de sensor fue escogido por su sensibilidad a cambios de temperatura. Las especificaciones técnicas de este equipo se explicarán detalladamente en el Capítulo 3.

2.6 ENERGIA Y POTENCIA ELECTRICA

La potencia eléctrica es la cantidad de energía entregada o absorbida por un circuito en cierto tiempo. La potencia es simplemente el producto del voltaje a través de un elemento por la corriente que fluye por el elemento. Las unidades de potencia son los watts.

2.6.1 potencia en elementos circuitales

En un resistor, la potencia entregada a el es equivalente a:

$$p = i^2 R = \frac{v^2}{R} \quad (2.19)$$

Donde R es la resistencia en ohms (Ω), v el voltaje en sus terminales (volts) y "i" la corriente que pasa a través de él. El resistor es un elemento pasivo del circuito, lo que significa que solo absorbe energía y no entrega (al circuito). Esta energía que absorbe se convierte en calor que disipa, puesto que el resistor no es capaz de almacenar energía.

Otros elementos pasivos del circuito eléctrico son los capacitores e inductores. Estos elementos tienen la característica de que son de almacenamiento de energía eléctrica. Un capacitor almacena carga eléctrica en dos placas conductoras separadas por un material no conductor (dieléctrico). Esta propiedad de almacenamiento de cargas se denomina capacitancia (C), cuyo valor es proporcional al área superficial del material dieléctrico y su constante dieléctrica, e inversamente proporcional a su espesor. La unidad de capacitancia es el coulomb por volt y se llama farad (F) en honor al físico Michael Faraday. La energía almacenada en un capacitor (W_C) esta dada por:

$$W_C(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) \quad J \quad (2.20)$$

Un capacitor almacena energía, pero no la disipa; si la energía consumida por el capacitor sobrepasa su capacidad de almacenamiento, sencillamente el capacitor se daña. En tanto que un capacitor permanezca desconectado de cualquier otro elemento, la energía se mantiene almacenada; hasta que se conecte el capacitor a las terminales de un resistor y la corriente fluya hasta que toda la energía se disipe como calor en el resistor.

Un inductor es otro elemento pasivo, de dos terminales, que consta de un embobinado de N vueltas. Posee la propiedad de que el paso de una corriente variable con el tiempo a través de él, le produce un voltaje en sus terminales; esta propiedad se denomina inductancia (L) y se mide en henrys (H). Una corriente constante i en la bobina no produce voltaje en sus terminales, y una corriente variable produce un voltaje autoinducido. Por lo tanto, la energía almacenada en un inductor se encuentra en un campo magnético y es equivalente a:

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \text{ J} \quad (2.21)$$

El inductor no genera ni disipa energía, solo la almacena.

Otros elementos del circuito son los elementos no lineales, como los diodos, transistores y circuitos integrados. Estos elementos si deben disipar como calor la potencia que consumen en sus terminales. Si el dispositivo es de varios puertos, la entrada total de energía eléctrica está dada por la suma de la energía de entrada en cada puerto. Si se tiene una entrada de potencia eléctrica continua, *la temperatura del dispositivo se eleva hasta que esta es mayor que la temperatura ambiente y se genere un flujo de calor hacia fuera*. Este flujo de calor es aproximadamente proporcional (con constante de proporcionalidad k) al ΔT entre el ambiente y el dispositivo; la constante de proporcionalidad k , medida en watts por grado celsius, esta determinada por los materiales del dispositivo, el área total de la superficie y otros parámetros termodinámicos, relacionados con la convección y radiación de calor. Entonces:

$$P_{\text{calor hacia afuera}} = k\Delta T \quad (2.22)$$

Por lo tanto, cada dispositivo tiene un límite máximo de potencia eléctrica, el cual determina la región de la característica $v-i$ en la cual un dispositivo puede operarse con seguridad. Por ejemplo, en un MOSFET:

$$i_{CVCE} \langle P_{\text{max}} = 300mW \quad (2.23)$$

Donde i_C es la corriente del colector y v_{CE} es el voltaje colector-emisor.

En un circuito integrado, la potencia que tiene que disipar en forma de calor es proporcional a la densidad de transistores que tenga incorporados. A medida que avanza la tecnología electrónica, se van desarrollando dispositivos con más escala de integración interna de transistores, lo que aumenta su requerimientos de disipación de calor.

2.6.2 Potencia En CA

Hasta ahora los conceptos de potencia mostrados, han supuesto la intervención de voltajes y corrientes en forma continua. Cuando se involucran fuentes sinusoidales (y en general dependientes del tiempo: $-v(t)$ e $i(t)$ -) de voltaje o corriente, aparecen otras definiciones de potencia.

2.6.2.1 Potencia Instantánea

Es el producto directo del voltaje $v(t)$ por la corriente $i(t)$.

2.6.2.2 Potencia promedio

Esta es conocida también como la potencia entregada por la fuente. Esta potencia es la que realmente ve el circuito como si se estuviera alimentando con voltajes y corrientes continuas, y por lo tanto, es la potencia real que absorben los elementos del circuito y que posteriormente se convertirá en calor.

La potencia promedio absorbida por una impedancia Z en un circuito excitado por una fuente sinusoidal es:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta \quad (2.24)$$

Donde I_m y V_m son los valores máximos de voltaje y corriente, y θ es el ángulo de la impedancia. Por ejemplo, para un resistor puro, $\theta=0$, es decir, $P= I_m V_m/2$.

2.6.2.3 Valores eficaces de una onda sinusoidal.

Se vio que la potencia promedio es como un equivalente “continuo” de potencia, es decir, es la que el circuito ve como si la fuente fuera continua. Esta definición se aplica particularmente al voltaje y a la corriente por medio de su valor eficaz. El valor eficaz de un voltaje en corriente alterna, es el valor del voltaje en cd que este está entregando. Por lo tanto, este valor eficaz es el que se tiene en cuenta en el momento de hacer cálculos de energía real consumida y por lo tanto calor disipado.

El valor eficaz de una onda sinusoidal es su valor máximo dividido en $\sqrt{2}$, por lo tanto:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad y \quad I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.25)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.24, la potencia promedio es entonces:

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \theta \quad (2.26)$$

El termino $\cos(\theta)$ es llamado factor de potencia, y $V_{ef} I_{ef} = VI$ se llama potencia aparente y tiene unidades de volt-ampere (VA).

2.6.2.4 Potencia compleja y reactiva.

Se define el termino potencia compleja (**S**) a la suma de la potencia promedio mas la potencia reactiva (Q):

$$S = P + jQ \quad (2.27)$$

Donde la potencia reactiva, dada en voltamperes reactivos (VAR) es igual a:

$$Q = V_{ef} I_{ef} \text{sen} \theta \quad (2.28)$$

En conclusión, la energía total consumida por una tarjeta electrónica debe disiparse en forma de calor a través de los mismos dispositivos electrónicos; parte de esta energía se disipa y otra parte se almacena en algunos componentes almacenadores. Cuando un componente no tiene la capacidad de almacenar energía, su temperatura aumenta hasta que comienza a disipar calor, por lo que si el dispositivo no tiene un diseño apto para esta disipación, la temperatura excesiva lo dañará.

En los cálculos de energía y potencia entregada y absorbida por una tarjeta electrónica, se debe tener en cuenta los valores eficaces de voltaje y corriente para determinar realmente que es lo que finalmente se convierte en calor.

Referencias

[1] Van Wylen Gordon J., Sonntag Richard E. *Fundamentos de Termodinámica*. Segunda Edición. Capítulos 1-5. Editorial Limusa Wiley. 1999.

[2] J. P. Holman. *Transferencia de calor*. 8° edición. Capítulos 1 y 2. Editorial Mc Graw Hill. 1998.

[3] Isaias Martinez Sisternes. *La monitorización del metabolismo*. Publicación de Dantex-Ohmeda. <http://www.dantex-ohmeda.es/default.htm>.

[4] Pallás Areny Ramon. *Sensores y acondicionadores de Señal*. 3° edición. Pp. 72-83. Editorial Alfaomega marcombo. 2001.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CALORIMETRO

En el capítulo anterior, se vio cómo un circuito electrónico tomado como sistema, debe cumplir con la primera ley de la termodinámica. También se presentó la calorimetría directa como una alternativa viable de medir el calor disipado por el circuito. Con base en estos conceptos, se diseñó un equipo de calorimetría directa ajustado a las necesidades propias de los circuitos electrónicos. Este capítulo presenta las características de este diseño, los pasos para su construcción y el resultado final. El equipo se denominó **CALPAC** (Calorímetro para circuitos electrónicos).

3.1 DISEÑO PRELIMINAR

En la figura 2.4 se presenta un bosquejo general de lo que debía ser el equipo. La idea fundamental es colocar el circuito electrónico dentro de una caja, que se nombrará como “caja portacircuitos”, construida de un material con alta conductividad térmica, y rodearla de un fluido con masa y calor específico conocidos, para calcular la energía absorbida por este fluido debida a la disipación de calor del circuito, con la ecuación 2.9, y calcular la potencia calorífica dividiendo este resultado entre el tiempo transcurrido durante el incremento de temperatura del fluido. El fluido usado en el CALPAC es agua.

Todo este sistema de la figura 2.4, debe estar entonces aislado de fuentes de temperaturas externas, para que no se afecte, ni la temperatura del fluido (dado que se necesita que su incremento de temperatura se deba únicamente al calor del circuito), ni la temperatura del circuito (dado que se necesita analizar únicamente el calor producido por autocalentamiento); es decir, lo ideal es que todo el sistema (fluido/caja portacircuitos) sea adiabático. En gran medida, un sistema adiabático es un sistema ideal, y es muy poco factible en la práctica, menos si se tiene en cuenta que para tomar las señales de temperatura y alimentar eléctricamente el circuito se necesita cruzar las fronteras del sistema de la figura 2.4 con cables. Sin embargo en el diseño del calorímetro se debe

procurar que su comportamiento térmico sea lo más cercano a estas características descritas.

El diseño preliminar del CALPAC se muestra en la figura 3.1. La figura 3.2 muestra la capa aislante para que el sistema cumpla con las características adiabáticas buscadas.

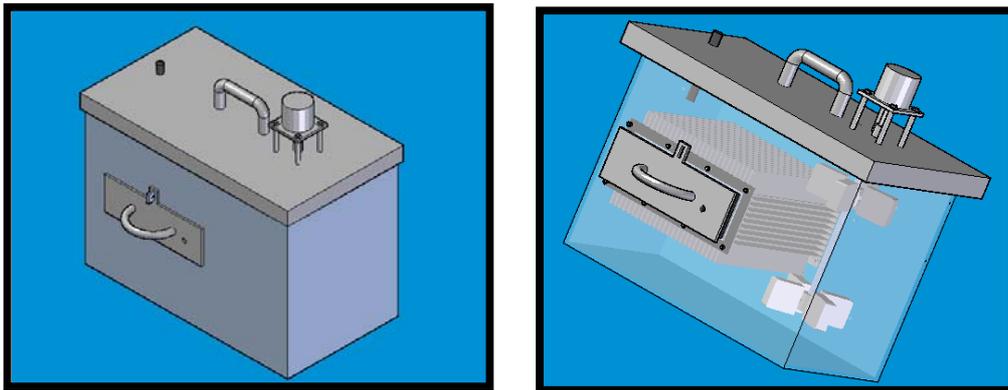


Figura 3.1 Vista General del Diseño Preliminar del CALPAC.
(Fuente: Ing. Rolando Stiwar, con permiso del autor)

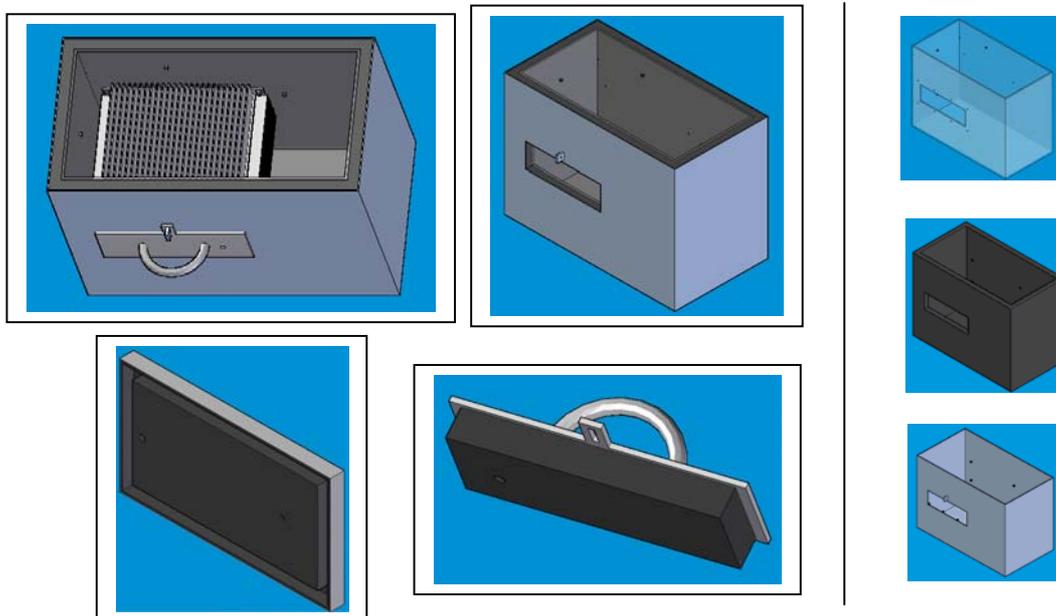


Figura 3.2 Vista del diseño de la capa aislante del CALPAC.
(Fuente: Ing. Rolando Stiwar, con permiso del autor)

De las figuras 3.1 y 3.2, ya se pueden identificar las partes fundamentales del CALPAC. Como se muestra, la caja portacircuitos fue diseñada inicialmente con un conjunto de aletas disipadoras de calor a su alrededor, con el objetivo de transferir el calor desde la caja portacircuitos, que hace las veces de base de las aletas, hasta la punta de cada aleta, que es el uso común de las aletas. Sin embargo, ese diseño luego fue cambiado durante la construcción, ya que la prioridad era garantizar una alta transferencia de calor desde el circuito electrónico en el interior de la caja portacircuitos hasta la caja, mas que de la caja al agua, por lo que se pusieron las aletas en el interior de la caja. Además, la convección del agua alrededor de la superficie externa de la caja es suficiente para que el agua se caliente en virtud de la transferencia de calor a través de la caja.

En la figura 3.1, la gráfica de la derecha muestra el recipiente donde se almacena el agua que absorberá la energía; más adelante se darán sus especificaciones. Alrededor se encuentra una capa de aislante, que está en negro en la figura 3.2. Igualmente hay aislante en las tapas, tanto superior como frontal. También se puede observar unos agitadores conectados a un motor, los cuales tienen como función agitar el agua para que tenga una temperatura uniforme en toda su masa, y se pueda usar la ecuación 2.1 para hallar la energía.

Una vez hecho el diseño preliminar se hicieron los planos de construcción. En la figura 3.3 se muestra un plano general..

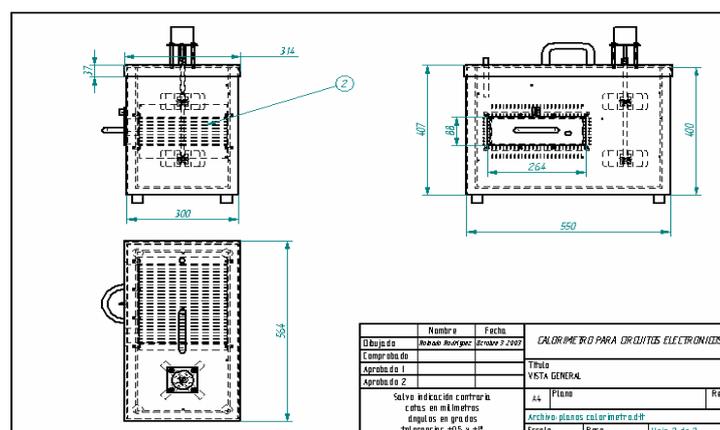


Figura 3.3 Plano General del diseño preliminar del CALPAC.
 (Fuente: Ing. Rolando Stiwar, con permiso del autor)

3.2 CONSTRUCCION

3.2.1 Caja Portacircuitos



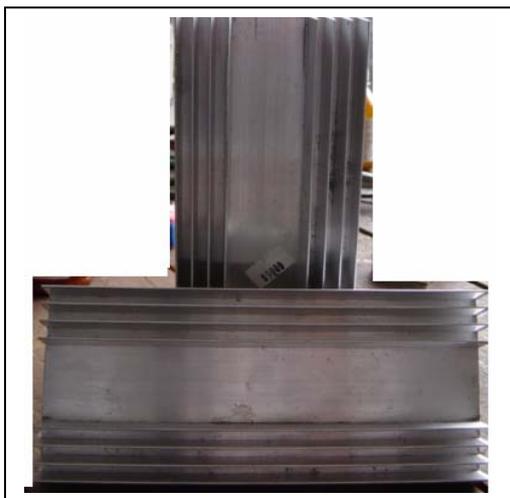
Figura 3.4 Caja Portacircuitos.
(Fuente: Autor)

Esta caja está hecha completamente de aluminio, material altamente conductor de calor, con una conductividad de 237 W/m K a 240 W/m K entre 0 y 100°C.

Externamente es de 0.107 metros de alto por 0.25 metros de ancho por 0.262 metros de profundidad y tiene 1 cm de grosor, que garantiza una muy alta resistencia al peso interno.

Como se mencionó, en su interior fueron adecuadas aletas disipadoras de calor también de aluminio, cuya función es aumentar la transferencia de calor aumentando el área superficial interna y disminuyendo la resistencia térmica por convección dentro de la caja. Estas aletas por ser de aluminio tienen una muy alta efectividad y por lo tanto disminuyen notablemente la resistencia térmica en el interior de la caja.

Las aletas no fueron mandadas a hacer sobre medidas ya que esto involucraba un muy alto costo, por lo que fueron adaptadas al equipo aletas disponibles en el mercado; la figura 3.5 muestra un ejemplo de una aletas que fueron luego adaptadas.



**Figura 3.5 Aletas del mercado adaptadas al equipo.
(Fuente: Autor)**

En la interfaz aluminio – aluminio entre las aletas disipadoras y la caja, existe una resistencia por contacto con una conductancia interfacial del orden de 2200 a 12000 W/m^2K , la cual podría afectar las características de transferencia. Para mejorar la transferencia de calor en esta interfaz, en el momento de ajustar las aletas a la caja se aplicó una grasa de silicona especial conductora de calor. Los disipadores se ajustaron a la caja de aluminio con remaches, y en los orificios de los remaches se puso silicona roja para evitar filtraciones de agua.

Más de 60 aletas garantizan una mayor transferencia de calor hasta la caja portacircuitos. La longitud de cada aleta no es muy grande debido a que se hubiera quitado espacio para el circuito.

El volumen efectivo dentro de la caja de aluminio para circuitos electrónicos es de $0,074 m^3$, lo que garantiza el análisis de circuitos de tamaño mediano, comúnmente usados en aplicaciones convencionales, sin embargo es factible en el futuro la construcción de otro equipo para el análisis de circuitos de mayor tamaño y potencia disipadora. A continuación se presenta como se adecuó esta caja a un recipiente de vidrio.

3.2.2 Recipiente De Vidrio



Figura 3.6 Recipiente de Vidrio.

Las dimensiones de este recipiente son $0.32 * 0.44 * 0.264 = 0,03717120 \text{ m}^3$. Se construyó con vidrio templado de grosor 4 mm, que le da alta resistencia y protege contra vibraciones, figura 3.6. El vidrio frontal tiene 4 orificios y el de atrás tiene 8, para el ajuste de los tornillos que sostienen la caja de aluminio. Los vidrios se pegaron con silicona roja, que soporta altas temperaturas (aunque se sacrifique un poco la estética).

Los tornillos que ajustan la caja de aluminio a la de vidrio, llevan empaques para su protección. En la parte de adelante, la caja de aluminio va directamente unida a la de vidrio, como se muestra en la figura 5a. Aquí también se puede observar que para evitar filtraciones de agua se cubrió todo el borde con silicona roja.

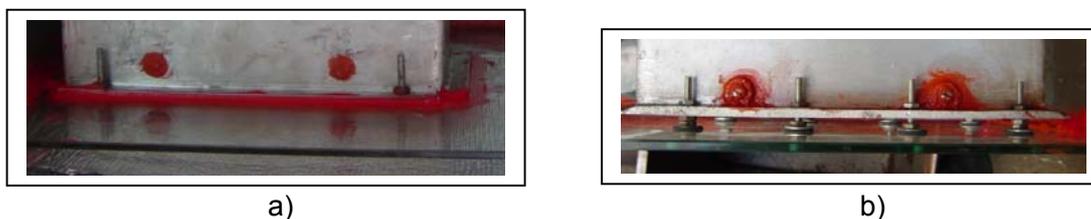


Figura 3.7 Ajuste de la caja de aluminio a la de vidrio
a) parte frontal. b) parte de atrás.
(Fuente: Autor)

En la parte de atrás la caja portacircuitos esta ajustada con 8 tornillos y se dejó un pequeño espacio entre esta y la de vidrio para que pase agua y reciba el calor conducido por la caja de aluminio (ver figura 5b).

El volumen total efectivo para el agua es de $0,02788811 \text{ m}^3$, lo que equivale a 27,9 litros, aunque las pruebas se realizarán con 23.5 litros, con masa de $996.5833 \text{ Kg/m}^3 * 0,023 \text{ m}^3 = 23,419 \text{ Kg}$.

La conductividad térmica del vidrio es de 0.88 W/mK , (pudiéndose clasificar como mal conductor de calor), aunque no lo suficiente para las características del equipo, por lo que fue necesaria una capa aislante extra posterior al vidrio.

3.2.3 Capa Aislante

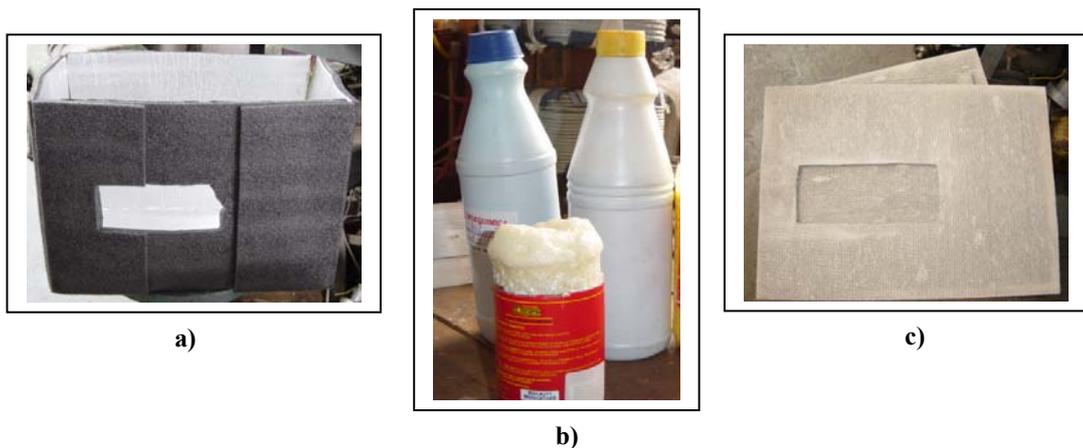


Figura 3.8 Aislantes usados.
(Fuente: Autor)

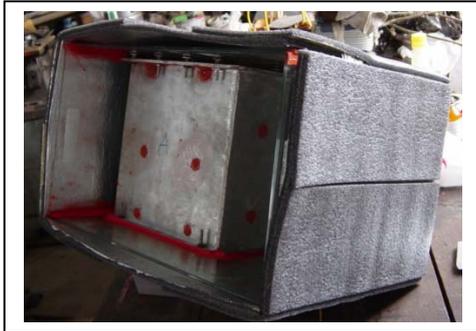
Para garantizar que el cambio de temperatura del agua sea realmente el reflejo del flujo de calor del circuito a través de la caja de aluminio, era necesario aislar tanto el agua, como el interior de la caja de aluminio, de cualquier otra fuente de calor. Para este propósito se construyó una capa espesa de aislante alrededor del equipo, compuesta por los 3 materiales mostrados en la figura 3.8.

El material de la Figura 3.8a, es una funda de espuma de polietileno expandido de 5mm con capa de laminado de polietileno con adición de componente aislante, conocido en el mercado de tapicería como yumbolon. Es un aislante común muy usado en aplicaciones de aislamiento en vehículos, para que la alta temperatura del motor no se transfiera a la silla del conductor o a otra parte externa del carro, y también como espumado regular de alta densidad o como aislante térmico para montañistas. Este material tiene una conductividad de 0.33 W/mK

El poliuretano expandido (figura 3.8b) es un espumado polimérico de celda abierta usada en la construcción de neveras portátiles y tiene una conductividad de 0.026 W/mK. En el mercado se venden dos componentes en estado líquido, A y B, que al ser mezclados en pequeña cantidad en proporción 1 a 1, producen esta espuma expandiéndose la mezcla y llenando un volumen 30 veces mayor que el inicial y amoldándose a la forma del lugar donde se expande; esto permitió llenar los posibles espacios vacíos que podrían quedar entre el vidrio y la caja exterior.

Las placas de fibrocemento, basado en asbesto (figura 3.8c) son de 4 mm de espesor. El asbesto tiene una conductividad de 0.09 W/mK, y es comúnmente usado en aplicaciones industriales o en fabricación de tejas para aislar las casas del calor ambiente. Se escogió hecho en cemento para que sostuviera el recipiente de vidrio por la parte de abajo; puesto que los otros aislantes son relativamente blandos.

El orden en que se pusieron los aislantes desde el vidrio hasta el exterior fue: polietileno espumado – espuma de poliuretano – asbesto cemento. El recipiente de vidrio inicialmente se cubrió con el polietileno, como se muestra en la figura 3.9a. A la caja exterior se le acomodaron las placas de asbesto cemento en cada cara por la parte interior (Figura 3.9b). Una vez se introdujo la caja de vidrio con el polietileno en la caja exterior con las placas de asbesto, se procedió a rellenar el espacio libre con la espuma de poliuretano, ejerciendo presión suficiente para llenar los espacios vacíos.



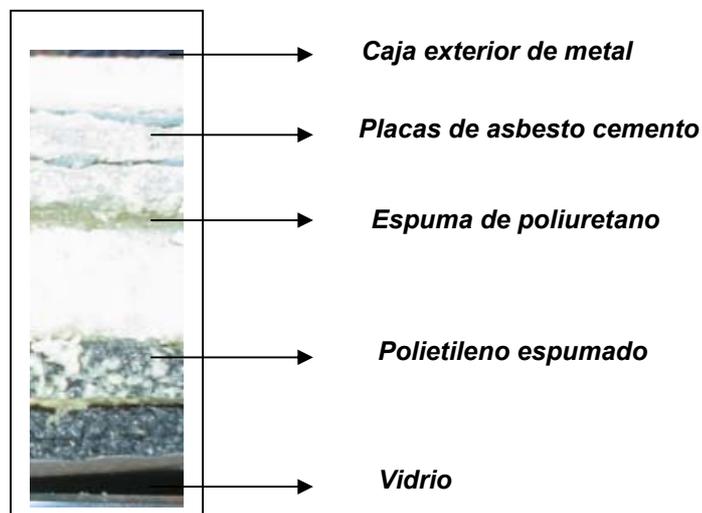
a)



b)

**Figura 3.9. a) Recipiente de vidrio cubierto con polietileno en espuma.
b) Caja exterior con placas de asbesto
(Fuente: Autor)**

En la figura 3.10 se muestra un corte lateral de la capa aislante. El grosor de la capa aislante mirando el equipo de frente es 5 cm por la izquierda, 3,5 cm por la derecha, 3,8 cm por atrás y 3 cm en frente. La parte de debajo del recipiente de vidrio se sostiene con 5 placas de asbesto, que sumado el grosor de la espuma de polietileno da 2,5 cm de aislamiento.



**Figura 3.10. Corte lateral de la capa aislante.
(Fuente: Autor)**

Las paredes laterales se pueden modelar como una pared con tres resistencias térmicas en serie, donde $R=L/kA$, siendo L el grosor de la capa en metros, k la conductividad térmica del material en W/mK y A el área lateral de conducción de calor.

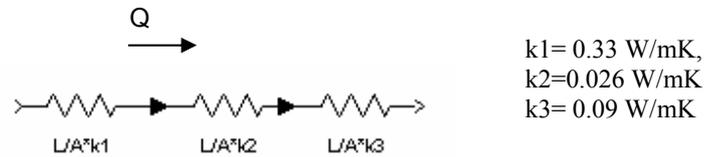


Figura 3.11. Modelo de la capa aislante como 3 resistencias térmicas.
(Fuente: Autor)

La tapa frontal y la tapa de arriba fueron aisladas con espuma de polietileno y espuma de poliuretano respectivamente (ver figura 3.12).



a)



b)

Figura 3.12. Aislamiento de: a) La tapa frontal. b) La tapa superior.
(Fuente: Autor)

Además, en las tapas se le colocó icopor de alta densidad para engrosar más la capa aislante, ya que los escapes de calor son muy factibles a través de ellas (ver figura 3.13).



Figura 3.13. Aislante de icopor en las tapas.
(Fuente: Autor)

3.2.4 Caja Exterior Y Motor.



a)



b)

Figura 3.14. Caja exterior.
(Fuente: Autor)

La caja exterior es hecha de metal, con pintura electrostática blanca. El color blanco se escogió porque es el que menos radiación térmica absorbe y disminuye la posibilidad de que la temperatura exterior afecte la del agua en el interior, figura 3.14.

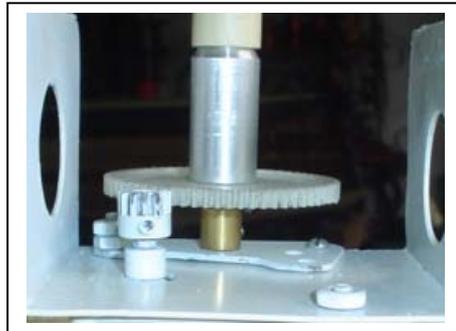
La tapa frontal tiene empaques de caucho alrededor para que sea mayor el sellado y evite escapes de calor. El orificio de la tapa frontal es para los cables de alimentación del circuito a analizar y aunque tiene un diámetro de 1 cm, en el interior el hueco abierto a través del aislante es de diámetro menor.

Las medidas de esta caja son 0.4 x 0.53 x 0.34 m. Tiene 2 agarraderas en sus caras laterales de 8,5 cm de ancho.

El espacio de entrada para un circuito en la tapa frontal es de 10 cm de alto por 24 cm de ancho. Esta entrada no quedó en el frente del equipo centrada, ya que se necesitaba un espacio extra en el lado derecho para los agitadores de agua en el interior.

En la figura 3.15 se muestra la conexión del motor al agitador; las paletas del agitador son de baquelita y el eje de plástico, para que no conduzca calor hacia fuera. Las paletas del agitador son de 14 cm de ancho por 6 cm de alto. El motor gira a 100 rpm, por

lo que se le hizo un ajuste mecánico para disminuir la velocidad. En la figura 3.16 se muestra el motor y el agitador.



**Figura 3.15. Ajuste mecánico para cambiar de 100 RPM a 20 RPM.
(Fuente: Autor)**



**Figura 3.16. Motor y Agitador
(Fuente: Autor)**

3.2.5 Base y cerrado de la caja superior

Se implemento una base de ruedas, debido al elevado peso del equipo, para poderlo transportar más fácilmente, figura 3.17.



Figura 3.17. Base de ruedas
(Fuente: Autor)

Para garantizar que el cierre de la caja de arriba quede más hermético, se adecuaron en las cuatro esquinas, tornillos roscados para poder apretar con unas tuercas, la tapa superior, figura 3.18.



Figura 3.18. Cierre de la tapa superior
(Fuente: Autor)

3.3 CONSIDERACIONES FINALES

Se ha mostrado todo el proceso de construcción del calorímetro. En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las especificaciones técnicas del equipo. Para la comunicación con el exterior los cables de alimentación del circuito a analizar salen por un orificio de la tapa frontal, y los cables de los sensores por un orificio en la tapa superior. Internamente el orificio es muy delgado, y son pocas las pérdidas de calor a través de ellos. En la figura 3.19 se muestra una visión final del calorímetro con sus respectivas conexiones. En el capítulo 5 se describirán las pruebas realizadas con el equipo.

Nombre: Calorímetro Para Circuitos Electrónicos (CALPAC).

Tamaño: 0.4 x 0.53 x 0.34 m.

Volumen Total: 0.07208 m³.

Capacidad de almacenamiento de Agua: 27,9 Litros.

Tamaño máximo del circuito a analizar: 0.5 x 0.18 x 0.18 m.

Temperatura máxima del agua: 90°C.

Máxima capacidad de absorción de energía: 8100 K J

Motor: 115 AC. 8.5 Watts.

Velocidad de los agitadores: 20 RPM.

Color exterior: Blanco, pintura metalizada.

Materiales:

Aislantes: Placas de asbesto cemento.
Poliuretano espumado (super-lon).
Espuma de poliuretano.

Caja portacircuitos: Aluminio.

Recipiente porta-fluido: Vidrio templado.

Caja Exterior: Metal.

Agitador: Baquelita.

Orificios para entrada de cables y/o sensores: 2

Máximo diámetro para entrada de cables: 0.01m

Tabla 3.1
Especificaciones técnicas CALPAC
(Fuente: Autor)



Figura 3.19. Calorímetro Para Circuitos Electrónicos, CALPAC
(Fuente: Autor)

4. INTERFAZ ELECTRÓNICA



**Figura 4.1. Interfaz Electrónica CALPAC
(Fuente: Autor)**

Sería infructuosa la construcción de un equipo como el CALPAC si no hay un módulo electrónico que lo optimice y haga aprovechar al máximo sus potencialidades. En los capítulos anteriores se vio como la medición de la energía que absorbe el agua es proporcional su gradiente de temperatura, por lo que se necesita sensarla y hallar su cambio con respecto al tiempo. Además la información se debe almacenar, transmitir y analizar, y así llegar a conclusiones válidas sobre el comportamiento térmico del circuito. También se debe dar la posibilidad de analizar esta información en el mismo momento de la medición, para que sea un análisis en tiempo real, y posterior a la medición. La visualización de datos podrá realizarse en la misma interfaz si no se dispone de un PC, o de lo contrario, por medio de Labview o Hiperterminal.

Las consideraciones de diseño se ajustaron tanto a las necesidades técnicas del equipo, como al presupuesto disponible. En este capítulo se muestran estas consideraciones, y algunas recomendaciones para futuros prototipos.

4.1 FUNCIONES GENERALES

Las funciones que cumple este módulo electrónico son las siguientes.

- Configuración del CALPAC.
- Monitoreo de temperatura.
- Almacenamiento de datos.
- Análisis de datos.
- Visualización de datos.
- Transmisión de datos.

4.2 HARDWARE DE LA INTERFAZ

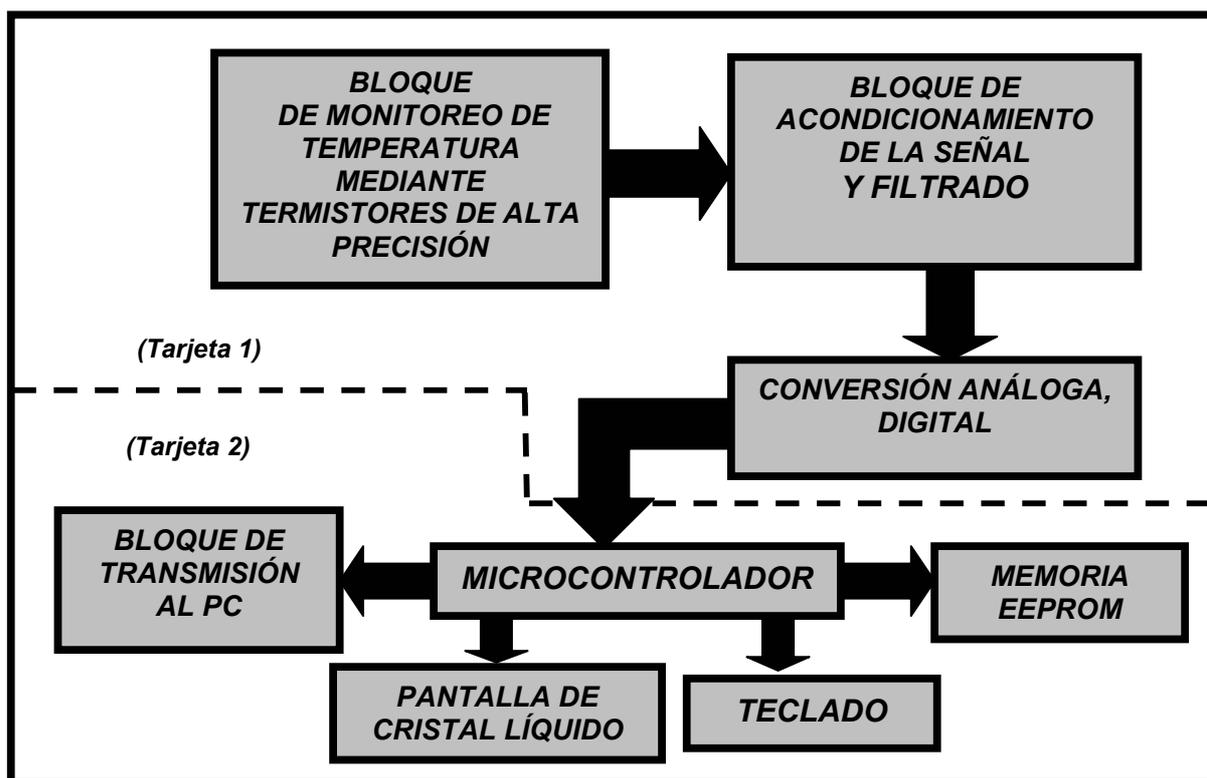
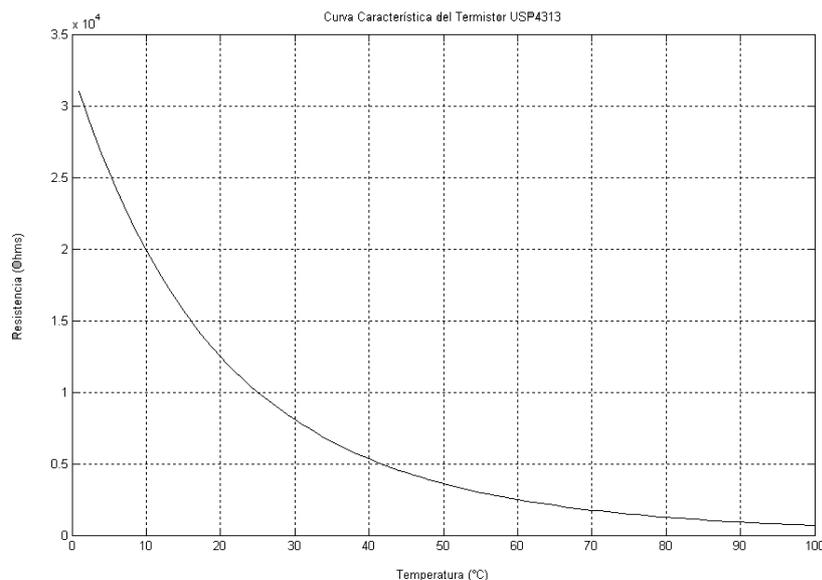


Figura 4.2. Diagrama de Bloques del Hardware de la Interfaz Electrónica CALPAC (Fuente: Autor)

4.2.1 Bloque de Monitoreo de temperatura.

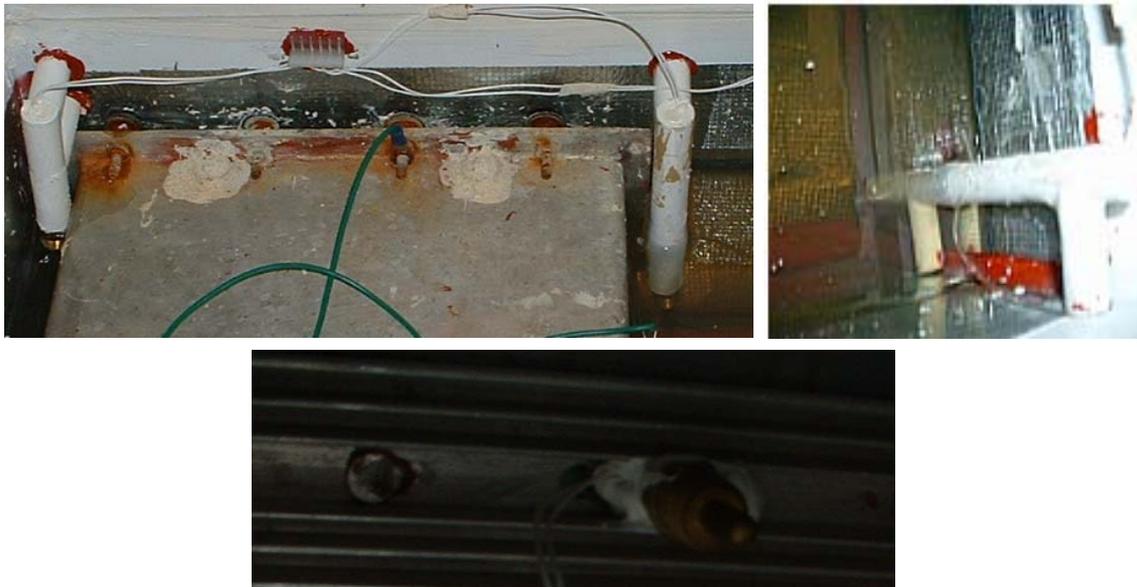
Los sensores usados son termistores, referencia USP4313 de la empresa extranjera USSENSOR. La figura 4.3 muestra su curva de comportamiento Temperatura Vs Resistencia, como resultado de graficar los datos de la tabla 2.3. en la página 26.



**Figura 4.3. Curva característica del termistor USP4313
(Fuente: Autor)**

Se colocaron tres termistores dentro del agua y uno dentro de la caja portacircuitos, como se muestra en la figura 4.4. De los tres que están en el agua, uno se colocó en la superficie, otro en el fondo y otro en un punto intermedio. El del fondo está alejado de la caja portacircuitos, y el de la superficie está más cerca. Por el efecto de la convección natural, donde sucede un fenómeno en el que el agua caliente tiende a ascender a la superficie del agua por causa de su cambio de densidad como resultado de su calentamiento, se espera que en medio de las pruebas del calorímetro que el sensor que esta en la superficie del agua registre mayores incrementos de temperatura. Sin embargo por causa del agitador en el agua (que resulto ser indispensable), este efecto disminuye. El módulo electrónico tiene la opción de visualizar cada sensor activado por separado, o el promedio de los que estén activados (ver sección 4.3). La referencia USP4313 tiene un recubrimiento especial para medir dentro del agua, sin embargo en la junta del sensor con el cable podrían haber filtraciones de agua, por lo que se hicieron unos tubos

especiales que recubren el cable, con silicona blanca; esto también se puede observar en la figura 4.4.



**Figura 4.4. Ubicación de los sensores
(Fuente: Autor)**

4.2.2 Bloque de acondicionamiento de la señal y filtrado.

Cada sensor se colocó en un puente resistivo de Wheatstone, cuya salida es una diferencia de voltaje entre dos nodos, proporcional a la resistencia, según la ecuación 4.1, donde $R1=330\Omega$, $R2$ se ajusta con un trimer de $100K\Omega$ y $R3=43K\Omega$. $R4$ es la señal del termistor.

$$v1 - v2 = V_{in} \left(\frac{R2}{R1 + R2} - \frac{R4}{R3 + R4} \right) \quad 4.1$$

El puente está diseñado para que la diferencia de voltaje varíe en un rango de aproximadamente 0 a 5V, para un rango de temperatura entre 0 y 100°C , por lo que la

señal no necesita de una posterior amplificación. El trimer de 100K Ω permite calibrar el sensor en el módulo electrónico.

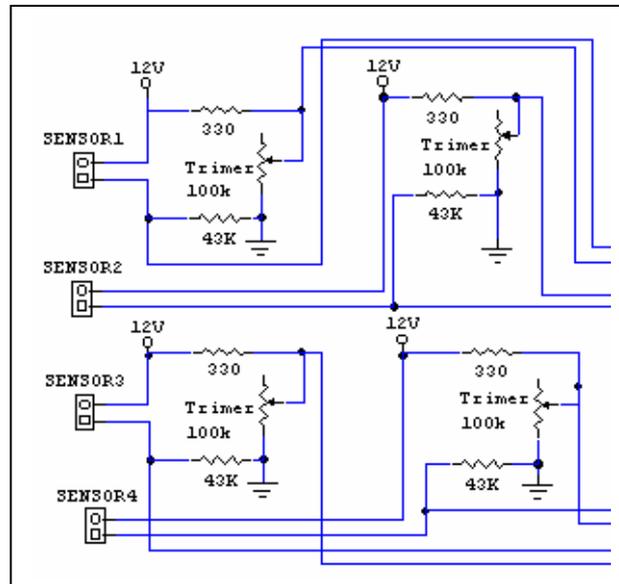


Figura 4.5. Puente de Wheatstone para acondicionamiento de la señal.
(Fuente: Autor)

La diferencia de potencial generada se conecta a un amplificador de instrumentación de Analog Device, AD622, cuyas características impedancia de entrada y ajuste de ganancia se ajustan a las necesidades del equipo. El diagrama de pines de este integrado se muestra en la figura 4.6.

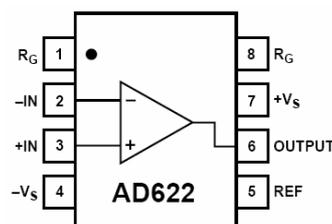
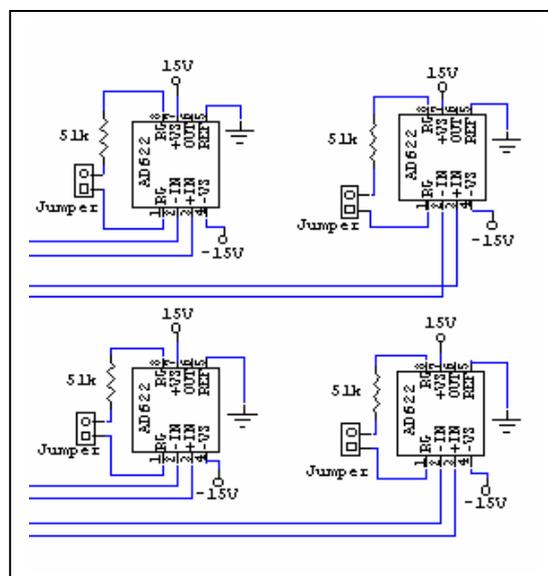


Figura 4.6. Amplificador de instrumentación usado en el módulo electrónico.
(Fuente: Autor)

En los pines R_g (1 y 8) se colocó una resistencia de 51K y un jumper, para ajustar una ganancia al amplificador de 2 en caso de que se necesite una señal de 0 a 10V en el

rango de temperatura descrito, figura 4.7. Esto no tiene utilidad en el equipo de control hecho, por lo que el jumper siempre permanece abierto; sin embargo se dejó la opción porque como se verá más adelante, se dejaron habilitadas salidas de voltaje proporcionales a la temperatura antes de que se realice la conversión analoga/digital, por si en un futuro se desea usar una tarjeta de adquisición de datos para el análisis de las señales, y tal vez se necesite una señal amplificada. La salida del amplificador a través del pin 6 con respecto a tierra, esta entonces en el rango de 0 a 5V con el jumper abierto, y de 0 a 10V con el jumper cerrado, para temperaturas de 0 a 100°C.



**Figura 4.7. Amplificador de instrumentación usado en el módulo electrónico.
(Fuente: Autor)**

Posteriormente cada señal es filtrada para eliminar el ruido mayor a 5 Hz, mediante un filtro pasabajas de segundo orden, cuya frecuencia de corte es 4.8 Hz, figura 4.8. Para implementar los filtros se usan amplificadores de propósito general LM741, ya que en esta etapa no se requiere de una mejor tecnología dado que se trata de señales a muy baja frecuencia, provenientes de un amplificador de instrumentación que ya previamente ajusto la impedancia. Las señales de salidas del filtro van al bloque de conversión análoga-digital (ADC) por medio de unos *jumpers*, ya que estas salidas también están conectadas a unas borneras para permitir su conexión a una tarjeta de adquisición de datos en el caso de

que no se quiera hacer uso de la parte de control del equipo. Con los jumpers abiertos, las señales no llegan al ADC, por lo que deben permanecer normalmente cerrados.

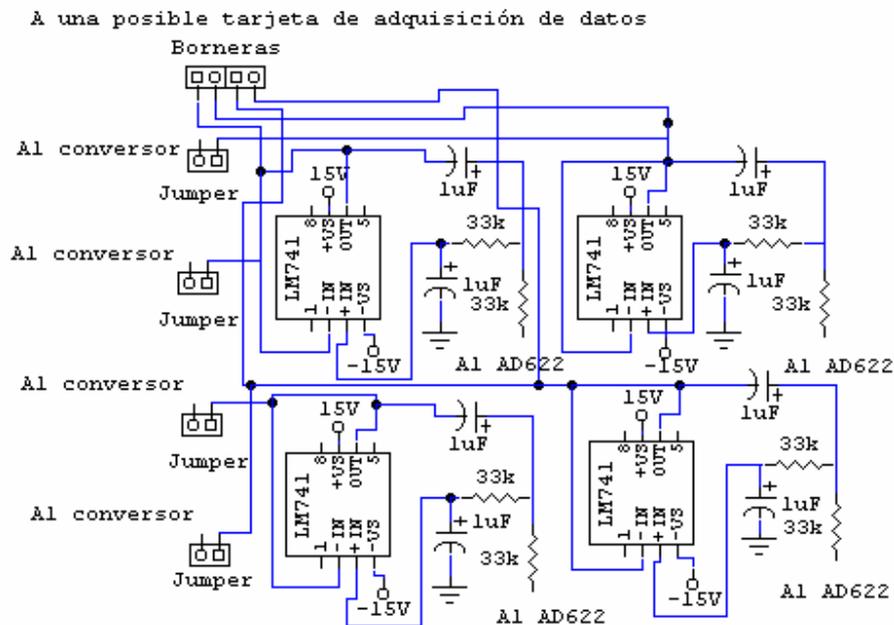
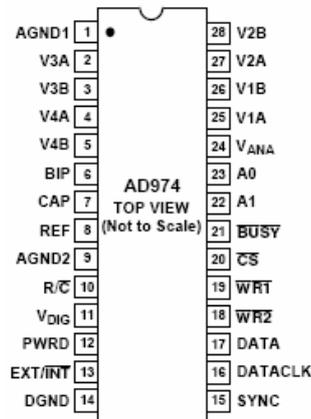


Figura 4.8. Etapa de filtrado.
(Fuente: Autor)

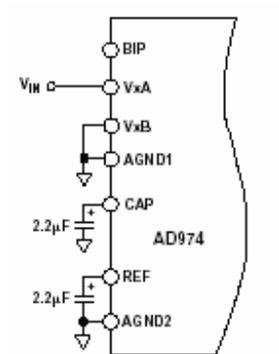
4.2.3 Bloque de conversión análogo-digital.

Para que el sistema tuviera una alta resolución, se usó un conversor análogo-digital de 16 bits, con cuatro canales analógicos de entrada que pueden ser multiplexados por el microcontrolador. El conversor permite trabajar señales analógicas de 0V a 5V, de 0V a 4V y de -10V a 10V. En este trabajo se escogió la opción de 0V a 5V, puesto que la señal de entrada al conversor varía de 0 a 5V.

Se usó el conversor AD974 de Analog Device. En la figura 4.9 se observa su diagrama de pines. Las conexiones circuitales para el modo de trabajo de 0V a 5V se muestran en la figura 4.10.



**Figura 4.9. Conversor Análogo Digital
(Fuente: Autor)**



**Figura 4.10. Configuración del conversor para modo de trabajo de 0V a 5V
(Fuente: Autor)**

Todas las señales provenientes de los filtros de segundo orden entran al conversor por los pines VXA, y las señales salen de forma digital y se transmiten de forma serial al microcontrolador por el pin DATA del conversor. La transmisión serial es controlada por el microcontrolador a través de los pines DATA, DATACLK, CS, BUSY, A0 y A1 del conversor. Estos dos últimos seleccionan cual de los cuatro canales análogos del conversor usar. Los primeros tres canales se conectaron a los sensores en el agua, y el otro al sensor en la caja portacircuitos.

Todos los circuitos descritos hasta el momento, se condensaron en una sola tarjeta electrónica, nombrada como tarjeta de la parte análoga del módulo, figura 4.11.

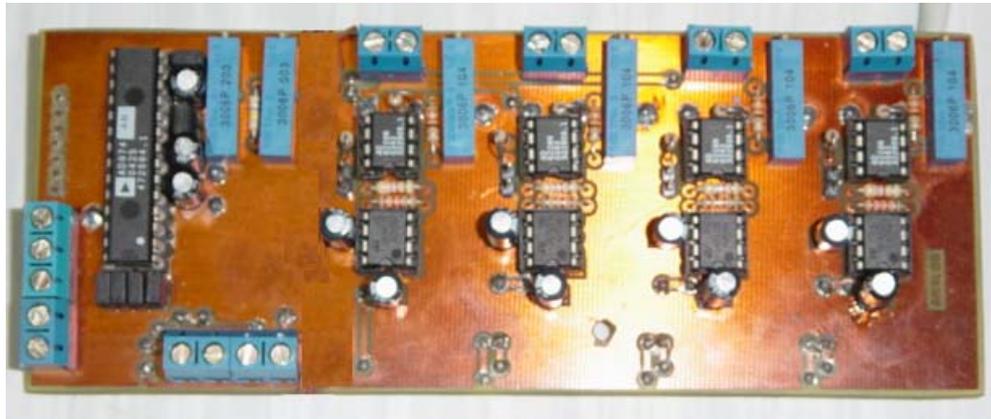


Figura 4.11. Tarjeta de la parte análoga del módulo electrónico.
(Fuente: Autor)

4.2.4 Módulo del microcontrolador y periféricos.

Debido a sus características altamente adecuadas a los propósitos de este equipo, se usó el microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola, cuya configuración de pines se muestra en la figura 4.12.

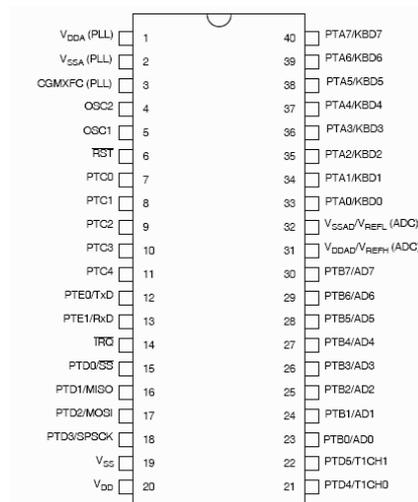


Figura 4.12. Microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola.
(Fuente: Hoja de datos, en www.motorola.com)

Las tareas que el microcontrolador desempeña son las siguientes:

- Manejo del convertor análogo digital para captura de las señales.
- Manejo del Software general, para realizar las funciones descritas en el numeral 4.1
- Manejo de Memoria EEPROM
- Manejo de pantalla de cristal líquido
- Manejo del teclado.
- Manejo de la transmisión vía puerto serie a un PC

Debido a lo extenso que sería explicar detalladamente la forma en que el microcontrolador realiza cada tarea y dado que este no es el objetivo de este proyecto, en este texto se omitirán las rutinas de programación y sus respectivos diagramas de bloques. Sin embargo el programa está disponible en el CD de este proyecto en la escuela de Ingeniería Eléctrica de la UIS, o se puede pedir al correo electrónico jeisonmarin@hotmail.com.

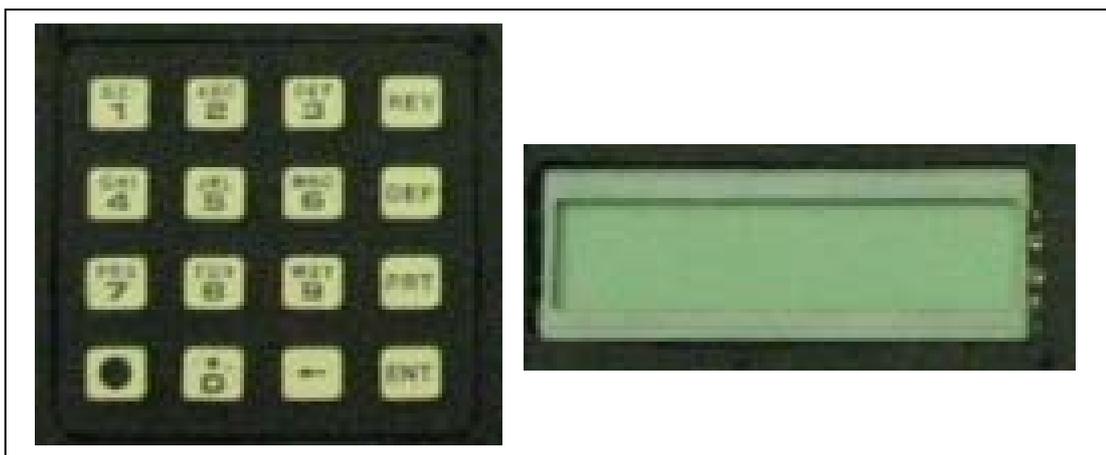
Del microcontrolador se usó su periférico interno de transmisión SCI para la comunicación con el PC por medio de puerto serial. Para manejar tiempos, se usó su módulo interno de *timer* el cual se configuró para que causara una interrupción cada segundo para un cristal de 6MHz conectado. Para el manejo del ADC, el microcontrolador produce los pulsos de reloj para comunicación serial y captura los datos. El manejo del teclado es por encuesta, y el de la pantalla de cristal líquido, en forma paralela a 4 bits. El manejo de la memoria EEPROM se hace con el protocolo de transmisión serial I²C.

Para la visualización de la información se usó una pantalla de cristal líquido de 2x16 caracteres. Dentro de las ventajas que presenta este módulo, se encuentran las siguientes:

- Bajo consumo de Corriente. Esto es indispensable cuando se trabaja con microcontroladores, ya que estos, siempre presentan una corriente máxima de trabajo que no excede los miliamperios.

- Fácil conexión a los microprocesadores y microcontroladores.
- A diferencia de los Displays de siete segmentos, no requiere de multiplexaje para visualizar varios caracteres.
- Muestra caracteres alfanuméricos y ASCII, lo que permite una óptima presentación y funcionalidad.

El teclado usado en el equipo es un teclado matricial de cuatro filas por cuatro columnas. Este teclado tiene una conexión por fila y una por columna, para dar un total de 8 conexiones. Cuando se oprime una tecla, se cortocircuitan las conexiones de la fila y la columna correspondiente a la tecla. En la figura 4.13 aparece su configuración general.



**Figura 4.13. Teclado matricial y módulo LCD
(Fuente: Autor)**

La memoria EEPROM usada es la referencia 24LC16 de Microchip. Se comunica serialmente con el microcontrolador con protocolo I²C y guarda hasta 4Kbytes de memoria. Su descripción de pines se muestra en la figura 4.14. En su interior se organiza en 8 bloques de 256 posiciones de memoria. Para almacenar los datos de temperatura, se usan 2 bloques por cada sensor, aunque en realidad, del tercero no se almacenan datos, sino en su lugar, se almacena el promedio de los tres. Un bloque de cada paquete guarda la parte entera y otro la parte decimal del dato. Por ejemplo, si el dato que da el sensor 1 es 27,08 °C, en la posición *n* del primer bloque se guarda el numero 28, y en la

posición n del segundo bloque el 08. En todos los bloques se reservan las primeras 200 posiciones de memoria para datos de temperatura. Por lo tanto, la capacidad del equipo es guardar 200 datos de temperatura por análisis. Para traducir esto a tiempo de análisis, toca saber el tiempo de muestreo de cada dato, lo cual se puede configurar, como se verá en la sección 4.3. las otras 55 posiciones de cada bloque se reservan para uso de propósito general.

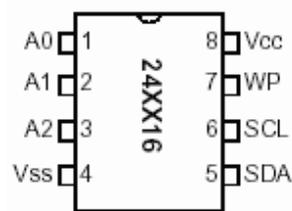


Figura 4.14. Memoria EEPROM
(Fuente: Hoja de datos en www.microchip.com)

Finalmente, el bloque de transmisión de datos al PC se hace por medio del chip MAX232, usado generalmente para este propósito.

Todos estos circuitos integrados coordinados la mayoría por el microcontrolador, permiten que el módulo electrónico de CALPAC sea un sistema de monitoreo de temperatura muy exacto y con muy buenas características de desempeño. El objetivo de este informe no era tanto explicar el funcionamiento particular de cada chip, sino dar una visión general de la estructura interna del módulo electrónico.

En la figura 4.15 se muestra el esquema eléctrico del circuito de control. Este fue hecho en una tarjeta aparte, nombrada como tarjeta de la parte digital del módulo electrónico, que se muestra en la figura 4.16.

Todos los circuitos son alimentados por una fuente regulada de +15, -15, 12 y 5 voltios, la cual se muestra en la figura 4.17, diseñada específicamente para el equipo, y aislada de la parte electrónica para evitar ruido eléctrico. Excepto por el conversor análogo digital, los amplificadores de instrumentación y los termistores, todos los elementos se consiguen en el mercado de la ciudad, incluyendo el chasis del equipo.

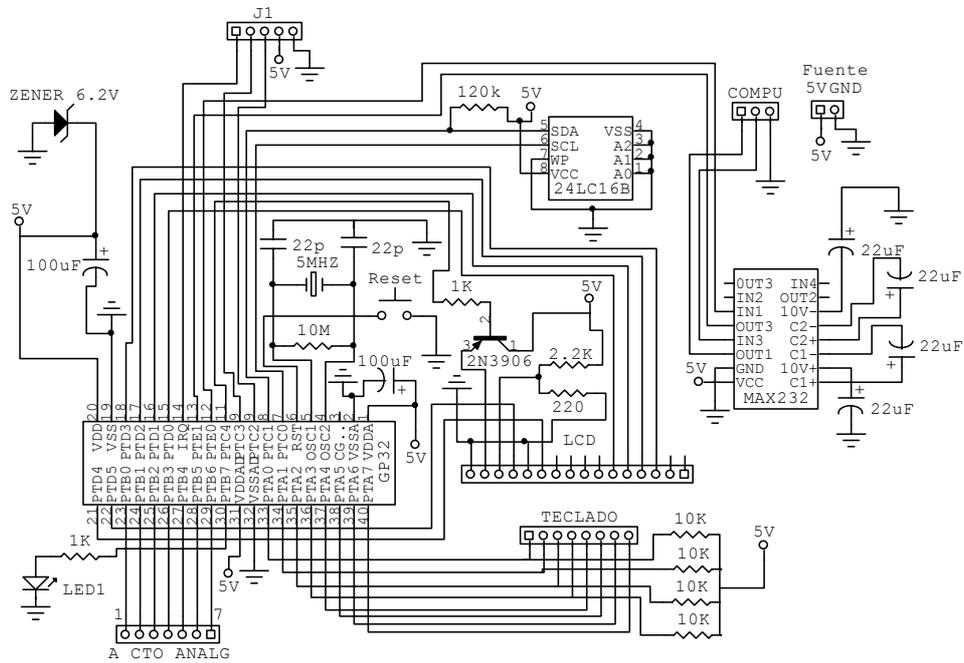


Figura 4.15. Diagrama electrónico de la tarjeta digital (Fuente: Autor)

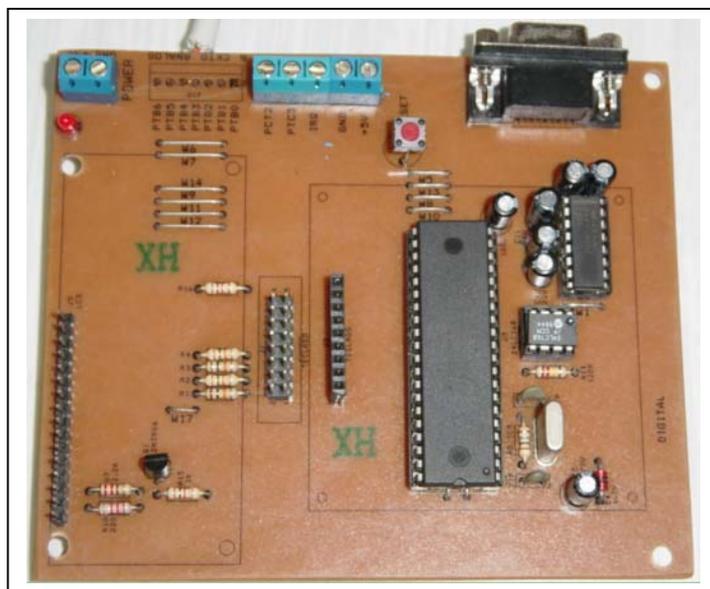


Figura 4.16. Tarjeta digital del módulo electrónico (Fuente: Autor)



**Figura 4.17. Fuente regulada del equipo
(Fuente: Autor)**

4.3 SOFTWARE DE LA INTERFAZ

Para realizar todas sus funciones, el módulo tiene 3 modos de funcionamiento:

- Modo Normal.
- Modo Monitoreo.
- Modo Lectura.

4.3.1 Modo Normal.

Es en el que está por defecto. En la tabla 4.1 aparecen las opciones disponibles en este modo. A ellas se accede oprimiendo el número correspondiente.

Menú disponible durante el modo de operación Normal
<ol style="list-style-type: none">1. Monitorear.2. Lectura de Datos.3. Enviar Datos.4. Sensores.

**Tabla 4.1. Menú disponible durante el modo de operación normal
(Fuente: Autor)**

4.3.1.1 Opción Monitorear.

Con esta opción, pasa a modo monitoreo (Ver numeral 4.3.2).

4.3.1.2 Opción Lectura de datos.

Con esta opción, pasa a modo lectura (Ver numeral 4.3.3).

4.3.1.3 Opción Enviar Datos.

Luego cada monitoreo, en la memoria EEPROM quedan registrados los 200 datos de temperatura y tiempo de muestreo. Esta opción le permite al usuario enviar estos datos al computador. Al escogerla aparece la opción de enviarla al hiperterminal, o a LabVIEW, figura 4,18.



Figura 4.18. Opción enviar datos.
(Fuente: Autor)

Se elige la opción y aparece un mensaje de envío, figura 4.19 y figura 4.20

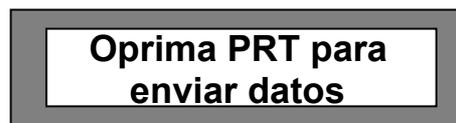


Figura 4.19. Mensaje para enviar datos.
(Fuente: Autor)

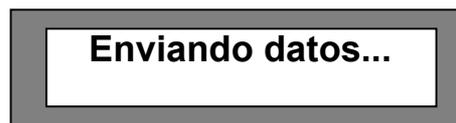


Figura 4.20. Mensaje mientras envía datos.
(Fuente: Autor)

4.3.1.4 Opción Sensores.

Aquí se habilitan o deshabilitan los sensores, y se visualiza la temperatura que está registrando cada sensor. Al escoger la opción, sale el menú de la figura 4.21.

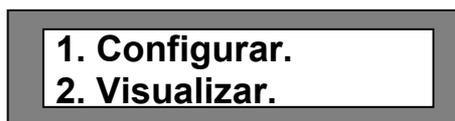


Figura 4.21. Opción Sensores.
(Fuente: Autor)

Si se escoge configurar, se debe elegir el sensor (de 1 a 4), y se da la opción de habilitarlos o deshabilitarlos, figura 4.22

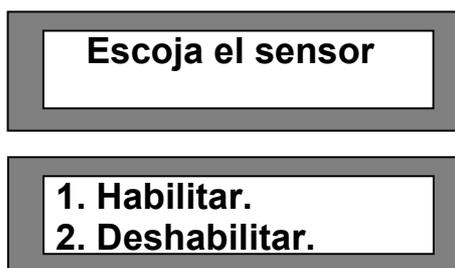


Figura 4.22. Opción Configurar.
(Fuente: Autor)

Si se escoge visualizar, se debe elegir el sensor (de 1 a 4), y se , figura 2.22

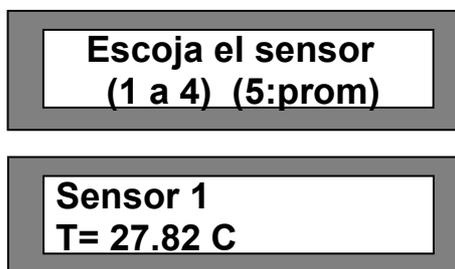
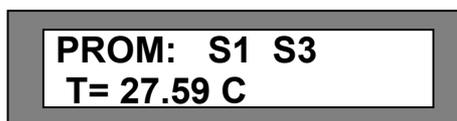


Figura 4.23. Opción Visualizar.
(Fuente: Autor)

Si se escoge visualizar el promedio se visualiza solo el promedio de los sensores habilitados. En la figura 4.24 aparece como si solo estuvieran habilitados los sensores 1 y 3. El promedio solo se puede sacar entre los 3 sensores que están en el agua, el sensor 4 nunca entra en el promedio,



PROM: S1 S3
T= 27.59 C

Figura 4.24. Opción promedio.
(Fuente: Autor)

Si uno de los sensores esta deshabilitado y se quiere visualizar aparece el siguiente aviso:



**SENSOR NO
HABILITADO**

Figura 4.25. Mensaje si no está habilitado un sensor.
(Fuente: Autor)

Si uno está habilitado, pero la medida no corresponde al rango entre 0 y 100°C, aparece:



**SENSOR
fuera de rango**

Figura 4.26. Mensaje si un sensor está fuera de rango.
(Fuente: Autor)

4.3.2 Modo Monitoreo.

A el se accede por la opción 1 desde el modo normal. En este modo se analiza el flujo de calor en un circuito electrónico, es decir, el sistema comienza a tomar los datos de temperatura del agua y a registrarlos según el tiempo de muestreo configurado. Es importante aclarar que este tiempo de muestreo es solo para determinar cada cuanto se

guarda un dato sensado en la memoria EEPROM, pero no influye en el análisis en “tiempo real” hecho por LabView, ya que el muestrea datos indefinidamente con un tiempo de aproximadamente de 0.6 segundos por muestra. Además, después de terminar la prueba, LabView genera una tabla en EXCEL con todos los datos muestreados. Este tiempo de muestra que se configura en el módulo electrónico es con el propósito de guardar los datos en la memoria EEPROM si no se dispone de PC, y es proporcional a la potencia que se espera el circuito disipe. Por ejemplo, si el circuito disipa muy poca potencia, el tiempo de muestreo debe ser muy grande, ya que los cambios de temperatura del circuito serán mínimos a través del tiempo. Sin embargo es importante tener cuidado con el tiempo que se elija, ya que hay que tener en cuenta que cuando el modulo termina de tomar 200 muestras, acaba automáticamente la aplicación de monitoreo y deja de enviar datos al computador, así que el tiempo que se configure no debe ser muy pequeño.

Lo primero que aparece al escoger la opción de monitoreo, es la configuración del tiempo de muestreo. La figura 4.27, muestra los mensajes que aparecen en la pantalla para este propósito. El tiempo de muestreo se puede configurar desde 1 segundo hasta 59 minutos y 59 segundos. Si es cero, el sistema no permite iniciar modo de monitoreo. Por defecto el tiempo de muestreo es de 1 minuto, y así quedará si se oprime ENTER sin configurar ningún tiempo.

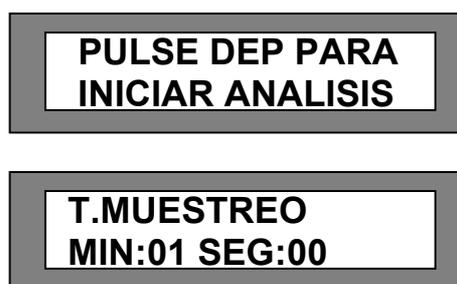


Figura 4.27. Mensajes para iniciar monitoreo.
(Fuente: Autor)

Una vez configurado el tiempo de muestreo, el sistema procede a adquirir los datos de temperatura, guardarlos en la EEPROM y enviarlos continuamente al PC, para que por medio de LabView se haga el análisis. Si no se dispone de PC, 200 datos quedarán

registrados en la memoria EEPROM y posteriormente se podrán transmitir al computador. Cada vez que se inicia un nuevo monitoreo todos los datos de un monitoreo previo se borran.

Mientras el sistema está monitoreando, aparece en la pantalla la información de la temperatura actual (el promedio de los sensores habilitados), el gradiente de temperatura entre la temperatura actual y la inicial, el tiempo transcurrido y el número de muestras que ha guardado en la memoria, figura 4.28. Con esos datos ya se puede hacer un estimativo de la potencia disipada por el circuito electrónico, si no se cuenta con un PC; sin embargo el programa en LabView hace estos cálculos de potencia durante el tiempo de monitoreo.

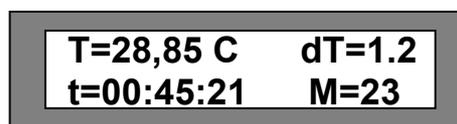


Figura 4.28. Mensajes en modo monitoreo.
(Fuente: Autor)

Existen dos maneras de salir de este modo, la primera es esperando a que se tomen 200 muestras, y la segunda, oprimiendo la tecla con la flecha apuntando a la izquierda. Al oprimir esta tecla, en cualquier momento, el sistema le pregunta si desea abandonar monitoreo y oprimiendo ENTER abandona; si vuelve a oprimir la tecla de la flecha, retorna a monitoreo. No se debe perder de vista que si se abandona el monitoreo, se dejan de mandar datos al PC.

4.3.3 Modo Lectura de Datos.

Si estando en el modo normal, se oprime 2, el sistema queda en modo lectura de datos. Este modo es exclusivamente para leer desde el módulo electrónico los datos de temperatura de la última prueba realizada. Estando en este modo no se puede iniciar monitoreo ni enviar datos al PC. El mensaje que aparece en la pantalla al entrar a este modo aparece en la figura 4.29. La opción 1 muestra los datos de temperatura comenzando desde el primer dato tomado y moviéndose a través de la pila de datos con la tecla PRT para ver el siguiente dato, y DEP para volver al anterior.



Figura 4.29. Opciones en modo lectura de datos.
(Fuente: Autor)

En la figura 4.29b aparece la forma en que se muestra cada dato. En ese ejemplo, dice que la muestra numero 51 fue de 28.56°C. Para saber cuanto tiempo había transcurrido, basta con multiplicar el tiempo de muestreo por el numero de muestras.

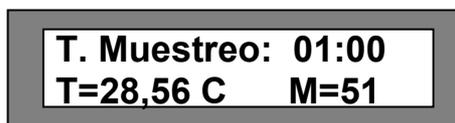


Figura 4.29b. Lectura de un dato.
(Fuente: Autor)

4.4 PROGRAMA EN LABVIEW

A continuación se describe de una manera general el programa en LabVIEW para la adquisición, visualización y análisis de los datos arrojados por el módulo electrónico.

Se comienza con un *frame* que inicializa las variables y los vectores referentes al tiempo y temperatura, figura 4.30.

En el segundo *frame* general se adquieren los datos de temperatura, por medio de un ciclo *WHILE* que contiene 1 *sequence* de 3 *frames*, cuyo criterio de parada es un botón de control por parte del usuario que se nombra como "FINAL PRUEBA". En el primer *frame* se configura el puerto serial, se adquieren los datos y se cierra el puerto serie, figura 4.31.

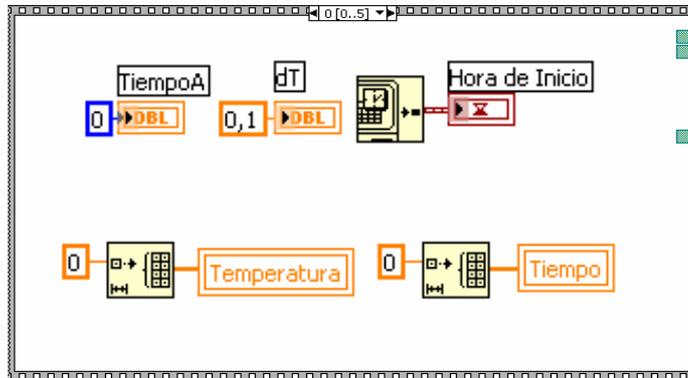


Figura 4.30 *Frame* de inicialización de variables.
(Fuente: Autor)

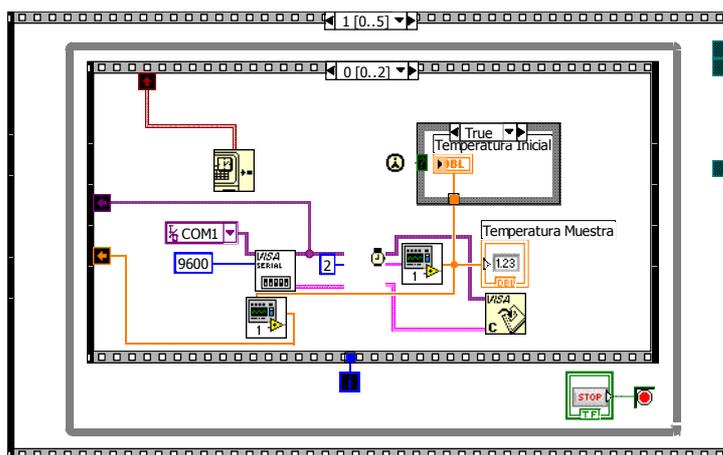


Figura 4.31 *Frame* de Adquisición de Temperatura
(Fuente: Autor)

En el segundo frame dentro del ciclo While, se grafican los datos, y se almacenan en un vector, figura 4.32

Los cálculos de calor absorbido por el agua y potencia instantánea del circuito, se hacen en un tercer *frame*, figura 4.33 Por estar dentro del ciclo *WHILE* estos cálculos se hacen permanentemente y se puede visualizar en cualquier momento la potencia calorífica disipada por el circuito en el instante. Lo ideal es que este dato permanezca constante a través del tiempo, lo que va cambiando es la energía absorbida por el agua.

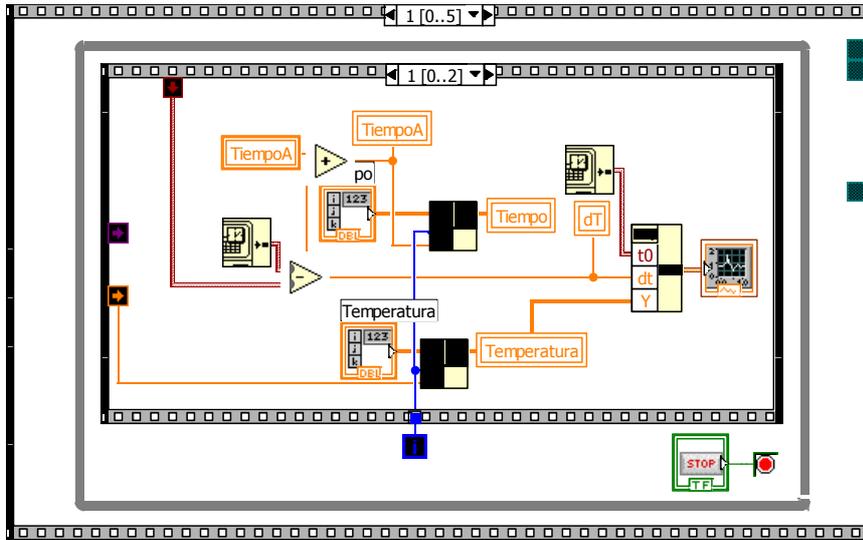


Figura 4.32. *Frame* de visualización de datos
(Fuente: Autor)

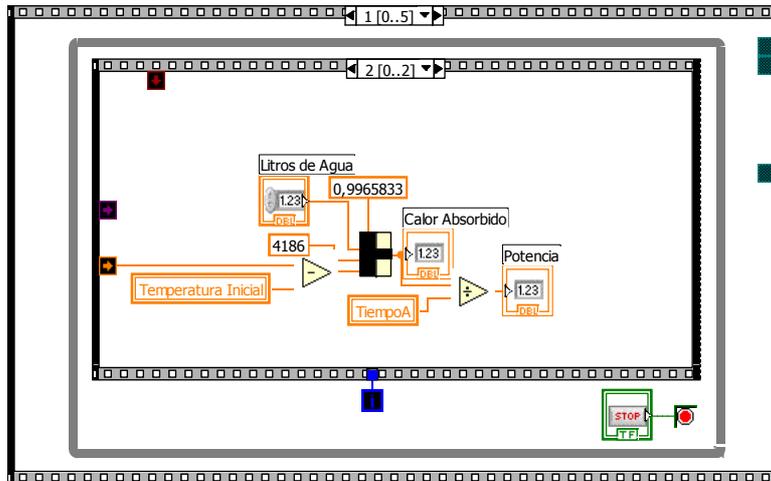


Figura 4.33 *Frame* de análisis de datos
(Fuente: Autor)

Cuando el usuario da orden de parada, pasa a un tercer *frame* general, que abre Excel, crea un documento y adiciona una hoja de cálculo, figura 4.34.

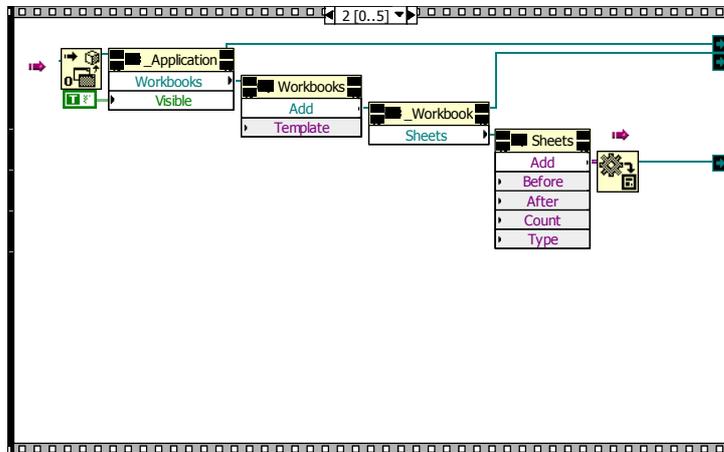


Figura 4.34. *Frame para abrir Excel.*
(Fuente: Autor)

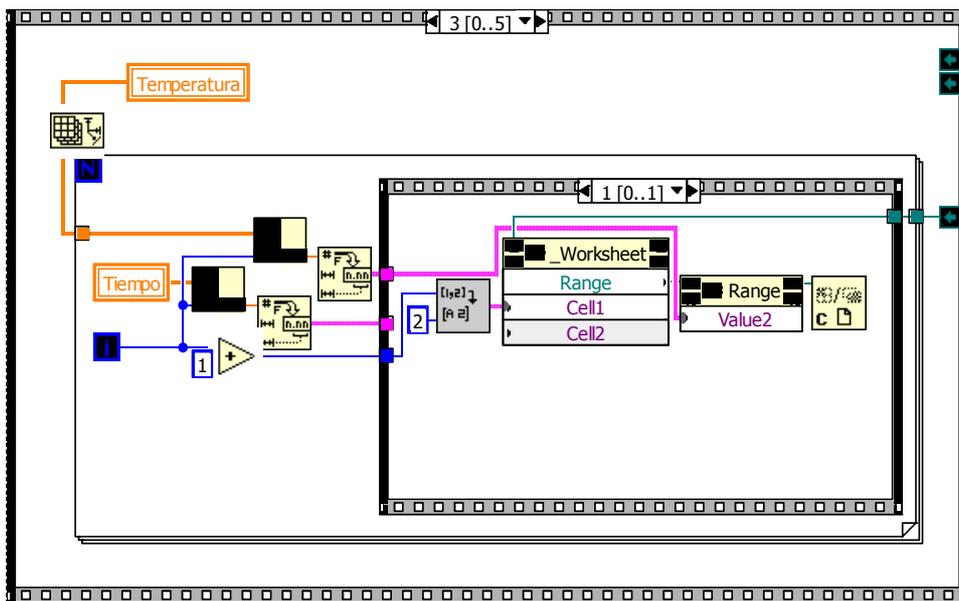


Figura 4.35. *Frame para exportar datos a Excel.*
(Fuente: Autor)

En los 2 últimos *frames* que quedan, se cierra el libro en EXCEL, y la aplicación general, figura 4.36.

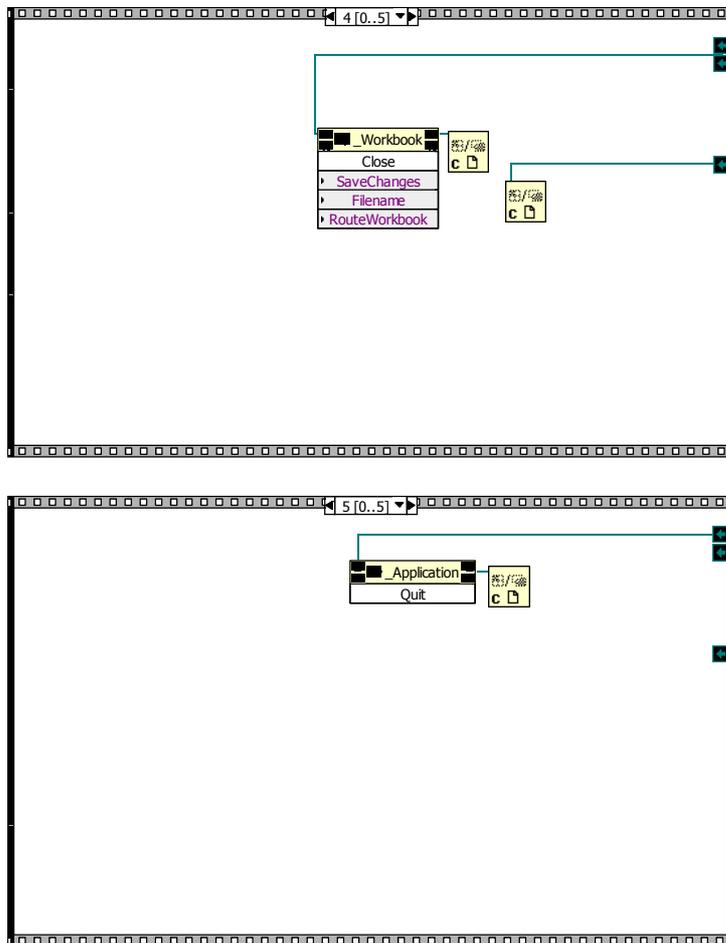


Figura 4.36. Frames de finalización.
(Fuente: Autor)

En la figura 4.37 se muestra el entorno de trabajo del usuario. Allí se muestra la gráfica de la temperatura en grados centígrados con respecto al tiempo en segundos. Más abajo aparece un tiempo en minutos, para comodidad de visualización en medio de la prueba. El total de datos disponibles se encuentran descritos en la figura 4.38. El sistema tiene por defecto, litros de agua:23.5, pero se puede cambiar. La resolución de temperatura en LabView es de 0.03 °C, a partir de la temperatura inicial. En el *frame* de la figura 4.31, se implementaron unos pequeños filtros, que eliminan picos de señal y ruido. Por lo tanto, el análisis hecho por LabView será con menos resolución que el del módulo electrónico, pero con mejores condiciones de la señal.

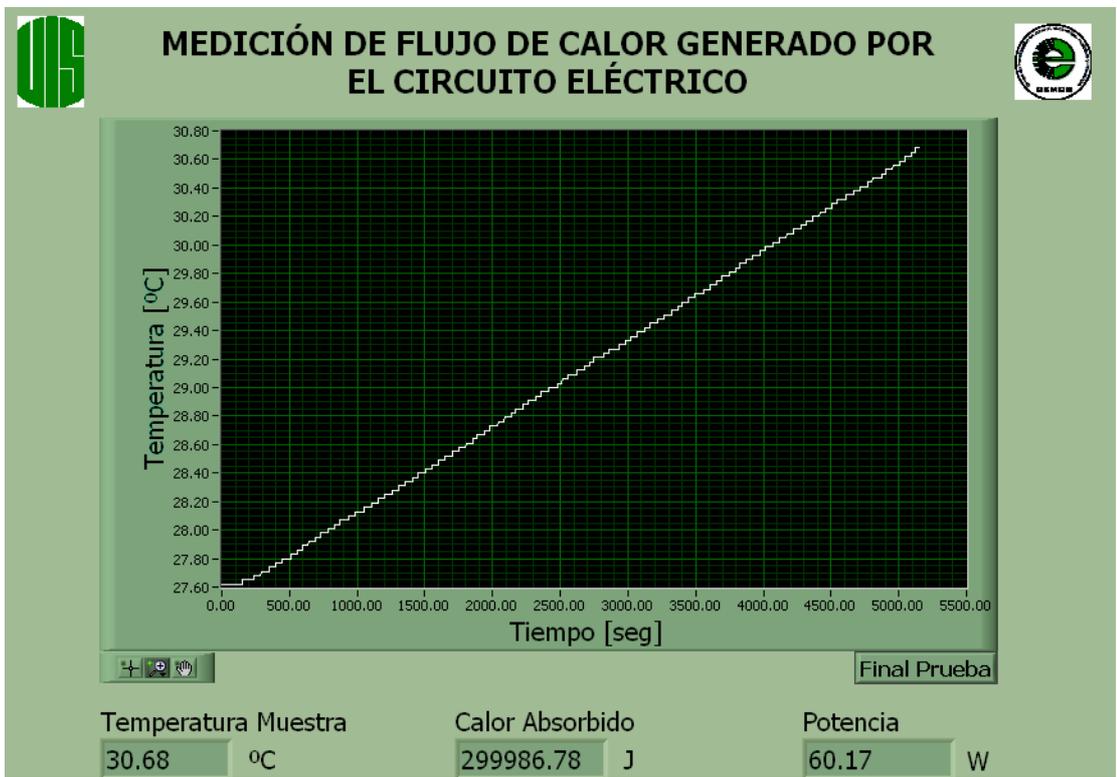


Figura 4.37. Panel de monitoreo en LabView.
(Fuente: Autor)

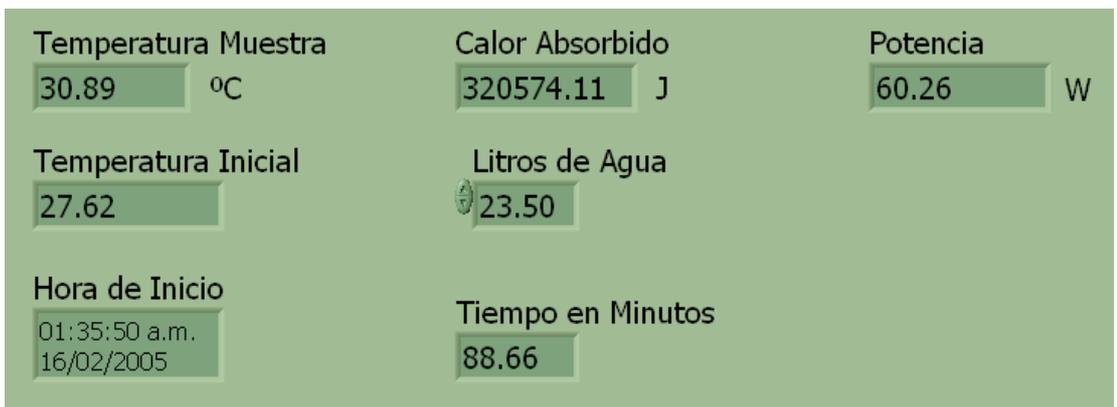


Figura 4.38. Datos disponibles durante monitoreo.
(Fuente: Autor)

5. CALIBRACION DEL EQUIPO

Para poder determinar con certeza que la medida que el calorímetro hace del flujo de calor generado es correcta, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Se necesita un circuito eléctrico que consuma un valor conocido de potencia y convierta esta energía a calor en su totalidad, y que la medida del calorímetro en potencia calorífica concuerde con la medida en potencia eléctrica que el circuito consume.
- Es necesario que dicho circuito disipe eficazmente el calor, ya que si tiene restricciones al respecto, la medida en potencia del calorímetro no va a coincidir con la potencia consumida; se debe recordar que es precisamente esta diferencia entre la potencia eléctrica consumida y el flujo calorífico disipado, la que se busca determinar para saber si un circuito electrónico está disipando bien el calor.
- Para que la primera ley de la termodinámica se cumpla y el calor disipado sea equivalente al trabajo eléctrico, se debe demostrar que el circuito de prueba no guarde energía interna en ninguna de sus formas, y que la energía cinética y potencial se puedan estimar nulas. También se debe recordar que es precisamente el valor de esta energía interna la que se busca determinar con el calorímetro, para generar un modelo termodinámico del circuito.

Por lo tanto, con un circuito electrónico común, con elementos almacenadores de energía como los condensadores o bobinas, no es factible realizar las pruebas. Un elemento circuital simple que no almacena energía es una resistencia eléctrica, por lo tanto toda la potencia consumida la convierte en calor. Sin embargo todavía sigue el inconveniente de la disipación, pues si bien, se puede garantizar que en una resistencia el calor generado es equivalente a la potencia consumida, no se puede garantizar que este calor se disipe en su totalidad. Debido a los materiales de construcción de las resistencias usadas en circuitos electrónicos, la transferencia de calor por conducción y radiación son despreciables y su eficacia en transferir calor se limita a la convección (aunque la

conducción es de suma importancia, ya que el tamaño de las resistencias es proporcional a la potencia que disipan, bajo el principio de que a mayor área, mayor conducción de calor), por lo que la mayoría de circuitos electrónicos usan ventiladores para que por medio de la convección forzada disipen el calor. Sin embargo hay un tipo de resistencia eléctrica que tiene condiciones ideales de disipación y son los bombillos de tungsteno. Además de que se sabe con facilidad la potencia que consumen, más del 80% del calor generado es disipado por la radiación que producen (eso depende de su eficiencia). Por esta razón se eligieron bombillos de diferente consumo de potencia para calibrar el calorímetro. Una vez probado que la medida del calorímetro es correcta, se puede entonces pensar en medir y modelar termodinámicamente cualquier otro circuito.

Las pruebas se hicieron con 3 bombillos, de 25W, 40W y 60W respectivamente.

- **Prueba con el bombillo de 25W**

Se realizó durante 43 minutos, y se generó una tabla en Excel con 7190 muestras. La temperatura inicial del agua era de 25,52 °C, y se incremento durante la prueba a 26,18°C. La prueba fue hecha con 23.5 litros de agua. La figura 5.1 muestra un conjunto de datos en un instante de la prueba, la figura 5.2 la gráfica generada por LabView. La tabla 5.1 muestra los puntos de la tabla donde se incremento la temperatura (con una resolución de 0.03°C) y la potencia equivalente en ese momento.

Temperatura Muestra	Calor Absorbido	Potencia
26.15 °C	61761.98 J	25.48 W
Temperatura Inicial	Litros de Agua	
25.52	23.50	
Hora de Inicio	Tiempo en Minutos	
09:58:27 p.m. 15/02/2005	40.39	

Figura 5.1 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 25W.
(Fuente: Autor)

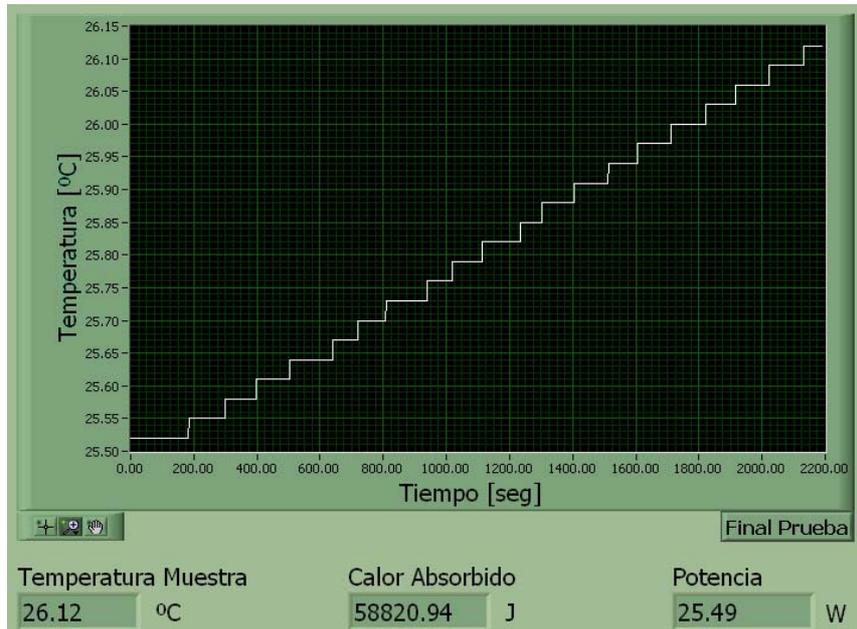


Figura 5.2 Gráfica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 25W (Fuente: Autor)

Tiempo (seg)	Temperatura (°C)	Potencia Equivalente
0	25.52	0
191,109	25.55	15,38936876
313,906	25.58	18,73839222
417,312	25.61	21,14279154
528,953	25.64	22,24051569
673,125	25.67	21,84621634
758,516	25.7	23,26421756
854,734	25.73	24,08623983
994,984	25.76	23,64698829
1081,031	25.79	24,48534951
1185,187	25.82	24,815045
1316,812	25.85	24,56805954
1391,641	25.88	25,36039287
1504,875	25.91	25,40650178
1626,062	25.94	25,32170129
1725	25.97	25,57432064
1837,187	26	25,61347864
1949,547	26.03	25,64585355
2042,406	26.06	25,91984343
2146,297	26.09	26,03548838
2249,375	26.12	26,14990274
2381,844	26.15	25,93032304
2477,797	26.18	26,11312841

Tabla 5.1 Tabla de valores para los puntos donde incrementó la temperatura. (Fuente: Autor)

La potencia se halla multiplicando el gradiente de temperatura por el calor específico del agua (4186 J/KgK), y la masa de agua equivalente a 23.5 litros de agua.

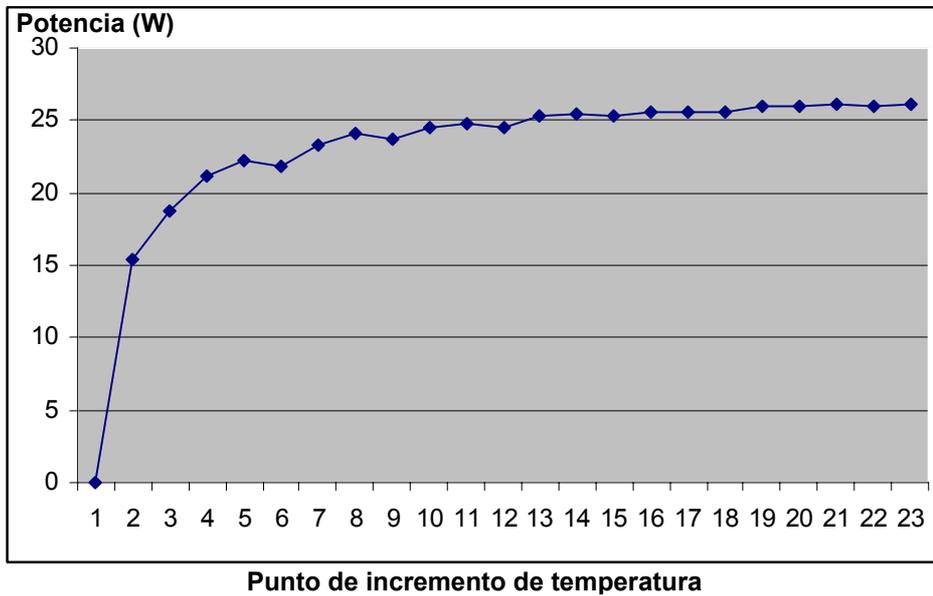


Figura 5.3 Gráfica de la potencia registrada por el calorímetro con bombillo de 25W (Fuente: Autor)

- **Prueba con el bombillo de 40W**

Durante algo más de 47 minutos, a una temperatura inicial de 26,3°C en el agua se colocó un bombillo de 40W en el calorímetro; Excel recibió 7878 datos y los resultados fueron los siguientes.

Temperatura Muestra	Calor Absorbido	Potencia
27.14 °C	82349.31 J	40.52 W
Temperatura Inicial	Litros de Agua	
26.30	23.50	
Hora de Inicio	Tiempo en Minutos	
11:13:20 p.m. 15/02/2005	33.87	

Figura 5.4 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 40W. (Fuente: Autor)

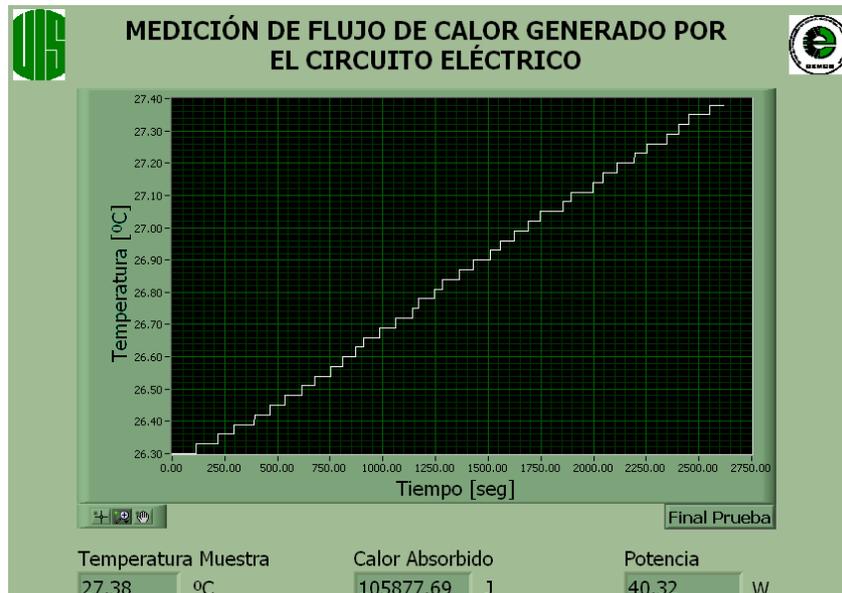


Figura 5.5 Grafica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 40W (Fuente: Autor)

Tiempo (seg)	Temperatura (°C)	Potencia Equivalente
0	26,3	0
111,406	26,33	26,39935797
212,219	26,36	27,71709295
289,75	26,39	30,45087359
384,922	26,42	30,56252305
461,016	26,45	31,89744905
530,625	26,48	33,2556537
608,719	26,51	33,82074179
738,172	26,54	31,87383834
751,094	26,57	35,24115739
809,406	26,6	36,33586697
870,813	26,63	37,15093323
912,703	26,66	38,66817847
991,844	26,69	38,54800691
1155,797	26,72	35,62447059
1156,953	26,75	38,130938
1191,328	26,78	39,49940737
1270,656	26,81	39,34801934
1309,641	26,84	40,42240869
1395,328	26,87	40,04785298
1465,969	26,9	40,12427103
1551,25	26,93	39,81433319
1600,109	26,96	40,43663977
1665,656	26,99	40,61107342
1733,281	27,02	40,72341702
1886,766	27,05	38,96941743
1887,094	27,08	40,52114984
1922,172	27,11	41,31173776
2020,266	27,14	40,76161875
2065,953	27,17	41,28378494
2126,703	27,2	41,48741325
2207,922	27,23	41,29333061
2267,031	27,26	41,51398899
2355,609	27,29	41,20146716
2414,703	27,32	41,41113575
2461,313	27,35	41,82184086
2557,203	27,38	41,40370845
2640,406	27,41	41,21287951
2674,828	27,44	41,78204401
2759,063	27,47	41,57238457
2818,797	27,5	41,73478082

Tabla 5.2 Tabla de valores para los puntos donde incrementó la temperatura. (Fuente: Autor)

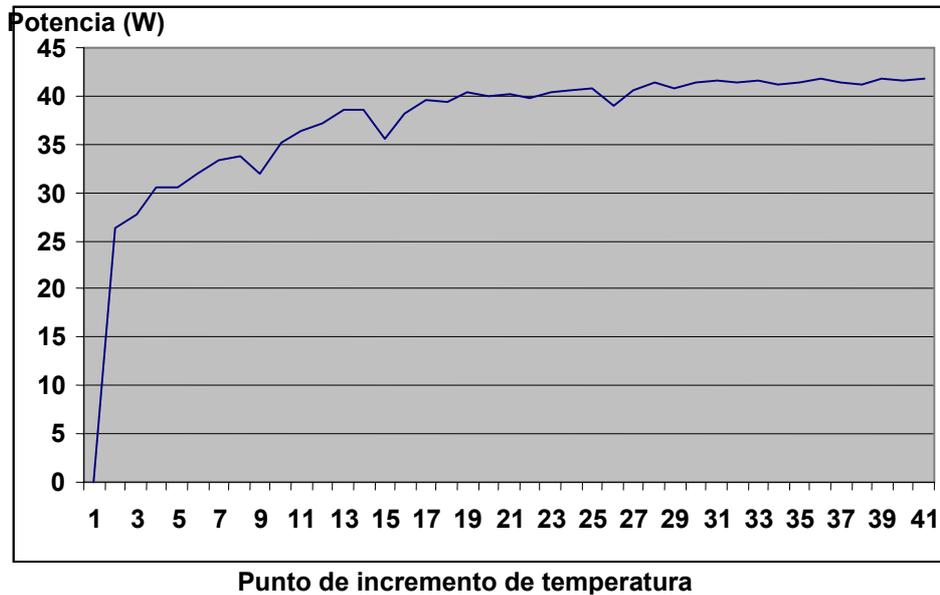


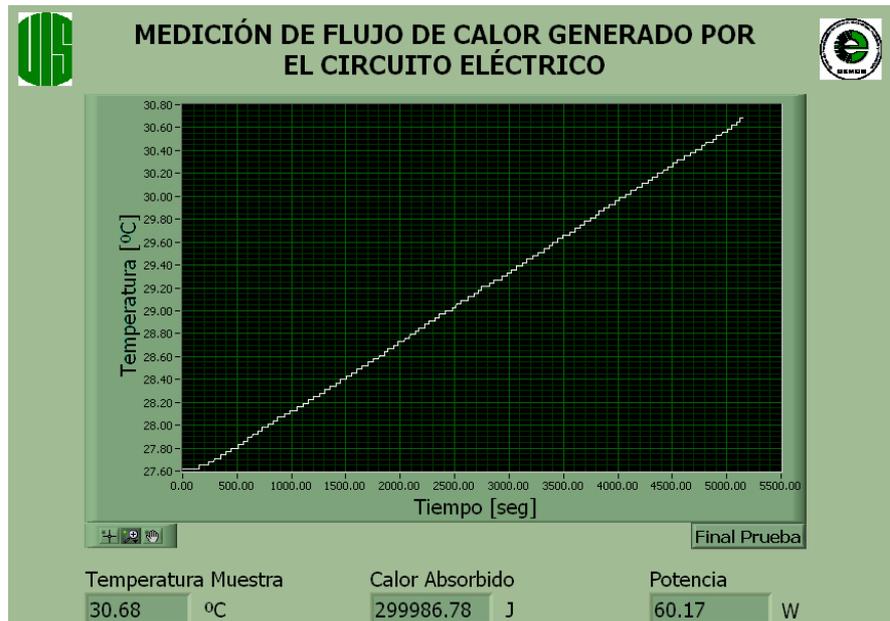
Figura 5.6 Gráfica de la potencia registrada por el calorímetro con bombillo de 40W (Fuente: Autor)

- Prueba con el bombillo de 60W

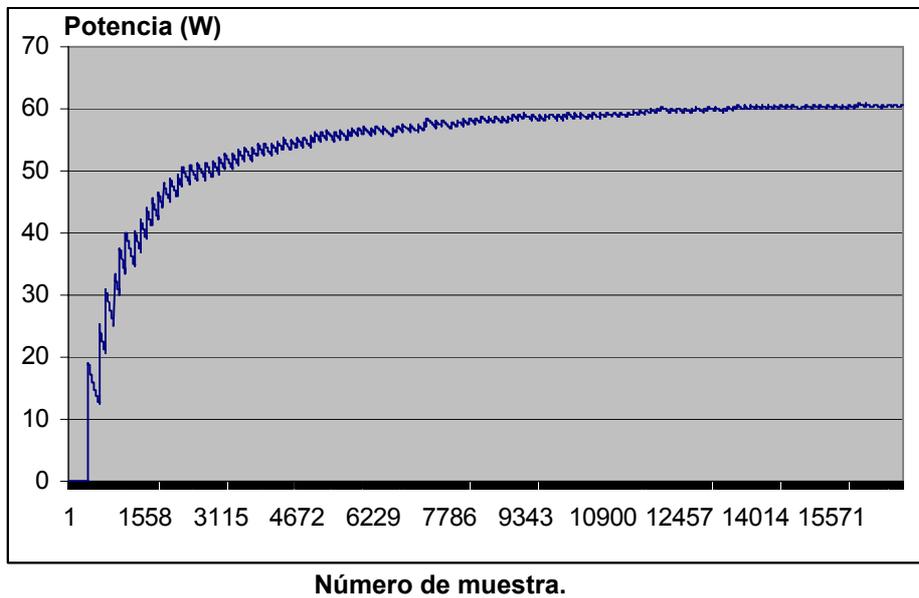
Se realizo una última prueba con un bombillo de 60W, con duración de 1 hora y 42 segundos. La temperatura inicial fue de 27,62°C, y se incremento hasta 31,43°C.

Temperatura Muestra	Calor Absorbido	Potencia
30.41 °C	273517.36 J	60.05 W
Temperatura Inicial	Litros de Agua	
27.62	23.50	
Hora de Inicio	Tiempo en Minutos	
01:35:50 a.m. 16/02/2005	75.92	

Figura 5.7 Datos durante el monitoreo de un bombillo de 60W. (Fuente: Autor)



**Figura 5.8 Grafica Temperatura Vs Tiempo para bombillo de 60W
(Fuente: Autor)**

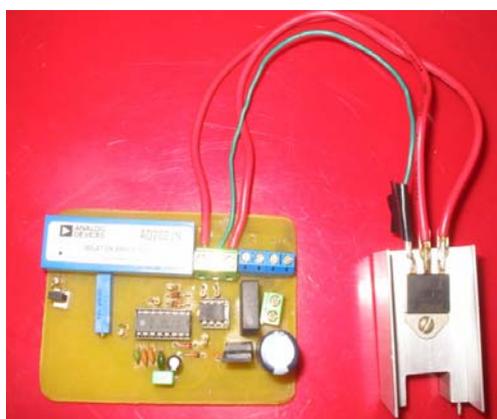


**Figura 5.9 Potencia registrada por el calorímetro para un bombillo de 60W
(Fuente: Autor)**

La tabla de datos para el bombillo de 60W se omitió porque es muy extensa.

6. PRUEBA CON UN CIRCUITO ELECTRONICO

Una vez calibrado el equipo, el paso siguiente es probarlo con un circuito electrónico. En la figura 6.1 aparece la foto del circuito de prueba. Este es usado en un equipo llamado: “dilatómetro de carbón” en el laboratorio de carbones de la escuela de metalúrgica, para controlar la potencia entregada a unas resistencias calefactoras.



**Figura 6.1 Circuito de prueba
(Fuente: Autor)**

El elemento que más disipa potencia dentro del circuito, es el TRIAC Q8040J7, responsable de controlar el ángulo de disparo en el control AC de línea realizado sobre la carga. Las resistencias en su operación normal, consumen entre 5 y 7 amperios, que junto con una caída de voltaje de 1.5 Volts a través del TRIAC, este debe consumir una potencia entre 7.5 y 10,5 Watts (a plena carga).

Para la prueba, debido a la imposibilidad de trasladar el dilatómetro al laboratorio donde se encontraba el calorímetro (y viceversa), se le colocó al circuito una carga de prueba constituida por 3 bombillos de 110Volts en paralelo, dos de 200W de consumo, y uno de 100W, para un total de 500W de consumo, aportando una corriente aproximada de 4,5 Amperios. Para esta corriente en la carga, el TRIAC consume alrededor de 6,75 Watts.

El propósito de la prueba era analizar la transferencia de calor a través del circuito con el TRIAC con disipador, y posteriormente, sin disipador de calor. En la figura 6.1 aparece el disipador usado (que es el que usa en la práctica).

En la figura 6.2 aparece el calorímetro en el momento de la prueba. Obviamente la carga se colocó por fuera del equipo, ya que no es el objetivo de análisis (y está disipando 500 Watts de calor).



**Figura 6.2 Prueba con el circuito electrónico
(Fuente: Autor)**

La prueba no se realizó directamente con computador, sino los datos se almacenaron en el módulo electrónico. Se muestrearon 200 datos con una tasa de muestreo de 80 segundos, por lo que la prueba duró aproximadamente 4 horas y 25 minutos.

6.1 PRUEBA CON DISPADOR

Una vez realizada esta prueba, se descargaron los datos por el puerto serie del computador al hyperterminal de Windows, esto se hizo ya que el equipo de cómputo no tenía instalado el programa de Labview en ese instante. La figura 6.3 muestra la visualización de algunos datos.

Tiempo(seg)	T(°C)
0	28,9
80	28,9
160	28,9
240	28,9
320	28,9
400	28,9
480	28,9
560	28,9
640	28,9
720	28,9
800	28,91
880	28,91
960	28,91
1040	28,91
1120	28,92
1200	28,92
1280	28,92
1360	28,92
1440	28,93
1520	28,93
1600	28,94

**Figura 6.3 Datos de la prueba con disipador
(Fuente: Autor)**

Las gráficas de comportamiento térmico y de potencia se muestran en las figuras 6.4 y 6.5, respectivamente.

En las figuras se puede observar que el incremento casi lineal de la temperatura, y como el calor disipado se tiende a estabilizar entre 6 y 6.5 Watts. El resultado es acorde con la potencia que el TRIAC consume.

El transitorio inicial en la figura 6.5 corresponde al periodo en el que el circuito cambia de 0W de potencia calorífica disipada (apagado) a su valor nominal. Si bien, el circuito consume potencia desde el mismo momento en que se enciende, la disipación de calor llega a su máximo valor después de un tiempo. En las gráficas de calibración con bombillo se puede observar el mismo fenómeno. Sin embargo, siempre las graficas de potencia convergen a un valor estable.

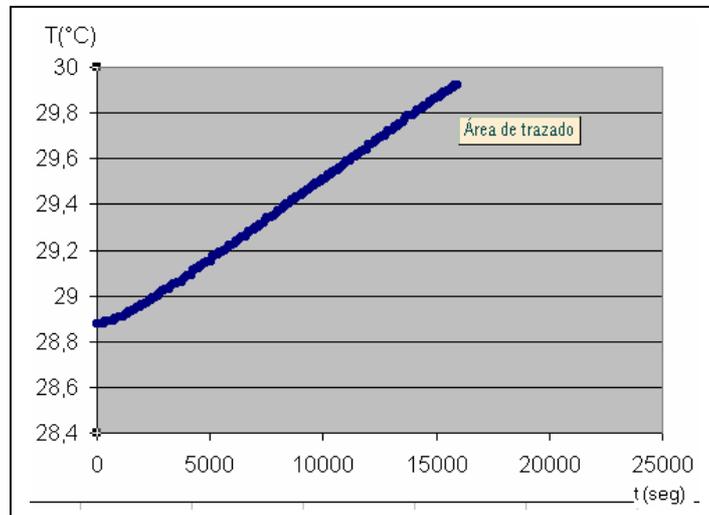


Figura 6.4 Gráfica de Temperatura Vs Tiempo en el calorímetro para circuito con disipador.
(Fuente: Autor)

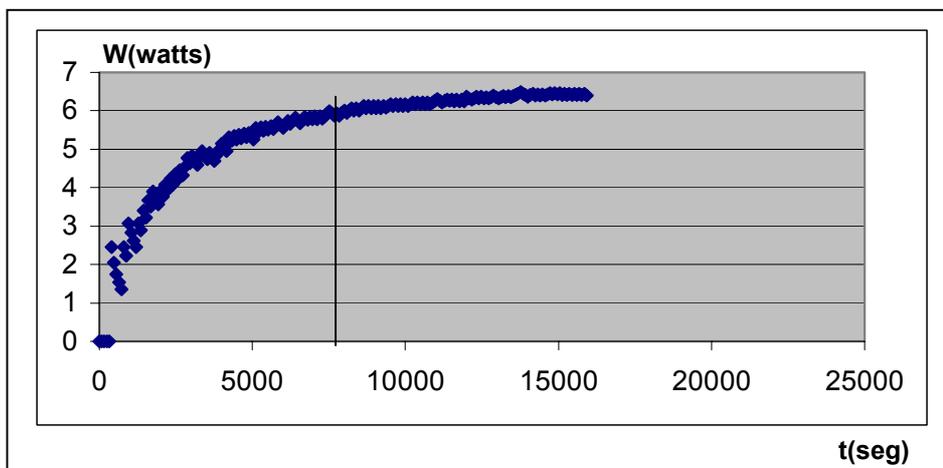
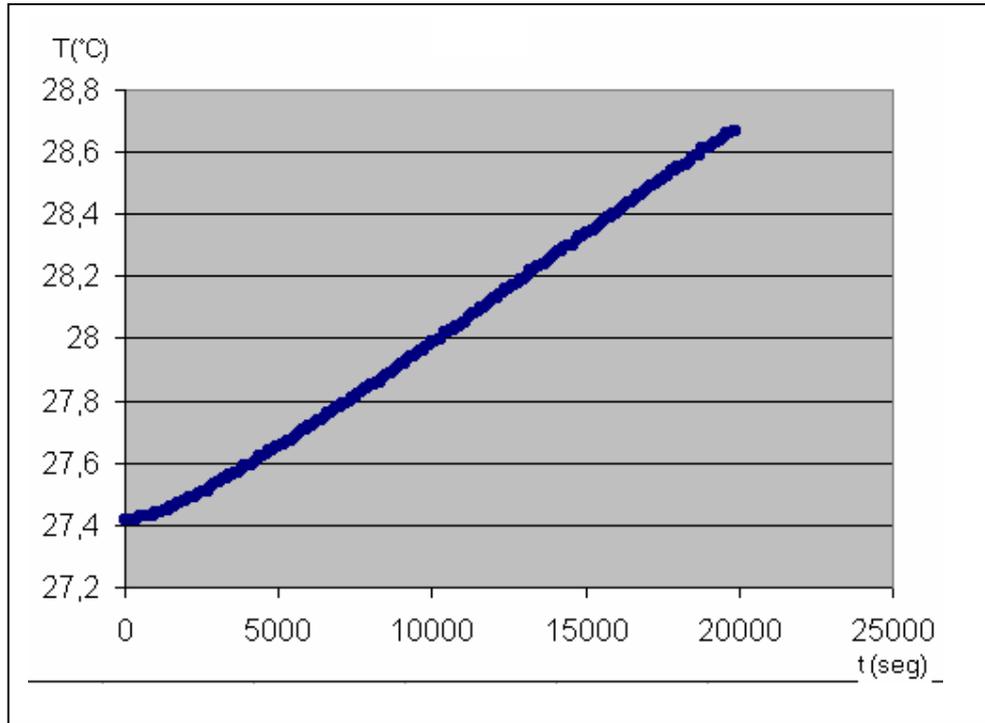


Figura 6.5 Gráfica de Potencia Vs Tiempo para circuito con disipador.
(Fuente: Autor)

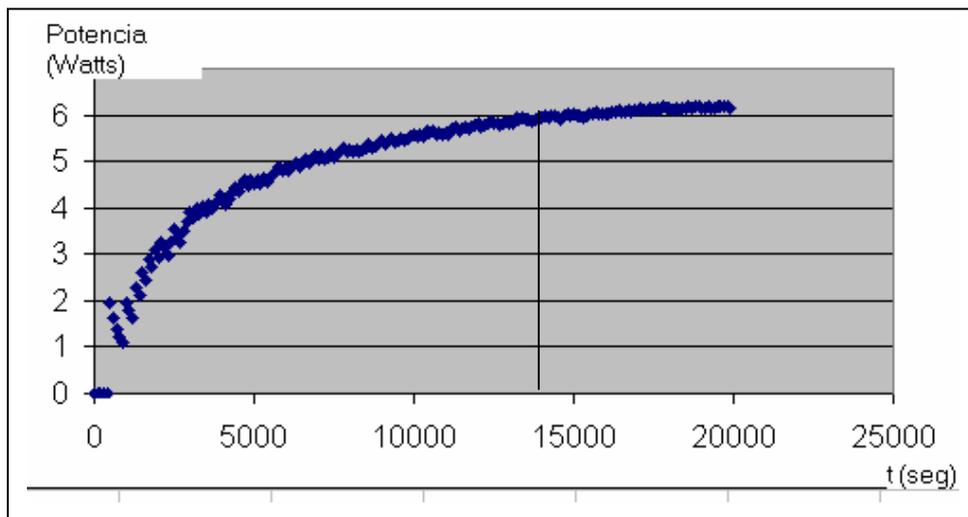
6.2 PRUEBA SIN DISPADOR

Las mismas gráficas, pero para el análisis sin disipador de calor, aparecen en las figuras 6.6 y 6.7

$t(\text{seg})$



**Figura 6.6 Gráfica de Temperatura Vs Tiempo en el calorímetro para circuito sin disipador.
(Fuente: Autor)**



**Figura 6.7 Gráfica de Potencia Vs Tiempo para circuito sin disipador.
(Fuente: Autor)**

Para el circuito sin disipador, las gráficas muestran 2 características importantes en comparación con las curvas de comportamiento cuando el circuito tenía disipador:

- Comparando la figura 6.5 con la 6.7, se puede notar que el valor de potencia al que converge la gráfica 6.5 (con disipador) es mayor. Mientras la primera converge a 6.5W, la segunda apenas alcanza a llegar a 6.1W. Esto significa que el flujo de calor a través del circuito con disipador (mostrado en la figura 6.1) es mayor que sin disipador. El disipador ayuda a disipar por lo menos 0.4W de calor. Toca tener en cuenta que la carga de 4,5 amperios es relativamente baja, comparada con la carga que el TRIAC soporta (40A).
- También se puede notar una diferencia considerable en el tiempo en que la curva alcanza su estado estable. Por ejemplo, en la gráfica 6.5 (con disipador) el circuito ya está disipando una potencia de 6W después de aproximadamente 7500 segundos (un poco más de 2 horas); mientras que el circuito sin disipador comienza a disipar 6W después de aproximadamente 14000 segundos (casi 4 horas). Esto significa que el disipador de calor aumentó la rapidez de transferencia.

Este fue un ejemplo del uso del Calorímetro para Circuitos Electrónicos (CALPAC) en la medición de flujo de calor en un circuito usado en la práctica. Con los datos obtenidos, se puede mirar la efectividad del disipador en el efecto sobre el TRIAC.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Gracias al apoyo del grupo de investigación CEMOS y de la dirección de investigaciones DIF de la facultad, se pudo culminar con éxito este proyecto cuyas principales conclusiones, además de los logros presentados en la sección 1.3, son:

7.1 CONCLUSIONES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO.

1. Se pudo demostrar como la interdisciplinariedad en la investigación, genera la consecución de ideas innovadoras y prácticas. Áreas como la termodinámica y la transferencia de calor, no son solo un soporte, sino son en algunos casos indispensables en el desarrollo integral de un ingeniero electrónico. El sistema desarrollado no hubiera sido posible sin un entendimiento claro tanto de los principios termodinámicos, como de las posibilidades tecnológicas en electrónica. Para el resultado final, fue necesaria la colaboración de ingenieros mecánicos, diseñadores industriales y obviamente eléctricos y electrónicos.
2. El principio de funcionamiento del calorímetro es sencillo, pero las variables tanto térmicas como electrónicas involucradas en su funcionamiento son muy exigentes. A pesar de que en la construcción del calorímetro se usaron tres clases de aislantes de temperatura y el grosor de sus paredes fue considerable, los escapes de calor en algunas pruebas preliminares sobrepasaban el requerimiento y hubo que reconsiderar el diseño varias veces en medio de la construcción. También el sensado de temperatura debía tener una muy alta resolución; inicialmente se planteó de 0.1°C , pero al hacer pruebas preliminares se noto que no era suficiente y fue necesario aumentarla a 0.03°C . La señal se acondicionó y filtró tanto en hardware como en software para eliminar ruido y hacer posible esta resolución que no es común en los sensores de temperatura digitales. Desde un comienzo se propuso para la conversión análoga/digital un conversor de 16 bits, previendo la pérdida de 2 o 3 bits debido al ruido de orden de microvoltios a milivoltios, que persiste aun después del filtrado de la señal. Aun así, debido a sus características de diseño, -especialmente por su gran tamaño y capacidad de almacenamiento de agua- el

sistema tiene restricciones al cuantificar el flujo de calor de circuitos con consumo de potencia menores a 2W, cuyas medidas son afectadas por el ruido eléctrico de la interfaz electrónica, y por la transferencia de calor del agua al exterior, que aunque es mínima, en condiciones de poca absorción de energía es significativa. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, el equipo podría medir flujo de calor en circuitos de baja potencia; estas se verán en las recomendaciones.

3. Al interior del equipo en el agua se colocaron tres sensores de temperatura, los cuales al revisarlos individualmente durante una prueba, registraron temperaturas muy diferentes, lo que prueba la importancia del agitador del agua. Se pudo observar, mediante la comparación de los sensores que están al fondo y en la superficie del agua, la acción que tiene la convección natural del agua, que hace que el agua de mayor temperatura ascienda a la superficie y la otra descienda.
4. Se comprobó la gran utilidad de los termistores en la medida de temperatura cuando se requiere alto grado de sensibilidad a cambios térmicos. Sin embargo también se comprobó su alta histéresis, característica que no afecta al equipo, ya que solo se necesitan medir incrementos de temperatura; tal vez lo afecten en el sentido del tiempo de espera para realizar una segunda prueba, pero por las condiciones térmicas del calorímetro, una vez se termina una prueba, la temperatura no desciende fácilmente, y se puede comenzar una nueva prueba tomando esa como temperatura inicial, aunque no es recomendable hacerlo si esta temperatura sobrepasa los 40 °C.
5. Debido a que el calorímetro para circuitos electrónicos es un prototipo, y al buen resultado de las pruebas realizadas, se están haciendo trámites para patentarlo.

7.2 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS.

1. Se pudo demostrar como el calorímetro da una medida correcta del flujo de calor. Sin embargo en las gráficas de potencia se pudo observar como hay que esperar un tiempo hasta que la medida se estabiliza en el valor correcto. Entre más alta era la

potencia y la temperatura inicial, este tiempo aumentaba. Sin embargo al final el valor siempre converge al deseado.

2. Las pruebas realizadas, donde la temperatura inicial del agua está a temperatura ambiente, tienen una probabilidad mínima de transferencia de calor al exterior del equipo, por lo que la medida es más exacta.
3. Entre menos potencia disipe un circuito, mas es el tiempo necesario para realizar la prueba.
4. El módulo electrónico permite análisis de circuitos con el calorímetro, sin necesidad de un PC. Esto demostró ser de gran utilidad cuando las pruebas eran demasiado prolongadas y no se podía disponer de un computador exclusivo para la prueba durante tanto tiempo. Por ejemplo, para medir el flujo de calor de un transistor de potencia, se requiere mínimo de 6 a 7 horas de pruebas, para que el incremento de la temperatura del agua sea notable (más de un grado centígrado) y se pueda afirmar con seguridad que la medida es confiable. Configurando el tiempo de muestreo de 10 a 20 minutos, el módulo electrónico toma 200 muestras durante el tiempo necesario para las pruebas. Otra desventaja de tener conectado el calorímetro al PC para pruebas muy prolongadas, es que el programa LabView esta adquiriendo datos cada 0.6 segundos aproximadamente, por lo que un prueba de mas de 7 horas generaría una tabla de datos de mas de 42000 muestras, la mayoría de ellas sin información valiosa, ya que en una prueba tan prolongada el cambio de temperatura del agua es mínima.

7.3 RECOMENDACIONES

1. El calorímetro es la plataforma ideal para realizar caracterizaciones reales de disipadores de calor usados comúnmente en circuitos electrónicos. Se recomienda desarrollar proyectos orientados a su diseño y análisis de efectividad; es decir, comparar diferentes tipos de aletas disipadoras de calor, con formas diferentes y longitudes diferentes, y contrastar los resultados de disipación de cada una para seleccionar la más eficiente.

2. Ya como se demostró el funcionamiento rápido del equipo con valores relativamente grandes de potencia disipada (mayores a 10W), se puede pensar en la construcción de otro prototipo que involucre menos masa de agua, para analizar circuitos de menos potencia más rápidamente.
3. Se propone realizar la transmisión de las señales térmicas en forma inalámbrica, para que el calorímetro quede completamente sellado, ya que los orificios por donde salen los cables le introducen al equipo significativas pérdidas de calor.
4. Sería factible hacer una simulación del comportamiento térmico del equipo y establecer las ecuaciones de transferencia de calor que lo gobiernan, para contrastar modelos teóricos con resultados experimentales.
5. Dado que como se menciona en la sección 1.3, uno de los logros de este proyecto fue el apoyo a un proyecto de pregrado enfocado a la medición de potencia en forma digital, se recomienda contrastar las medidas de este equipo con las que arroje el calorímetro al analizar los mismos circuitos.
6. Para realizar mediciones de circuitos de muy baja potencia de consumo, se recomienda iniciar el análisis cuando la temperatura del agua sea igual a la temperatura ambiente. Si es factible, sería de utilidad cambiar el agua por un fluido con menor capacidad calorífica para que se incremente su temperatura más rápidamente, pero dado que tanto el software en el módulo electrónico, como en LabView hacen los cálculos de potencia con el calor específico del agua, si se cambia el fluido, se debe multiplicar el resultado por la razón entre el calor específico del nuevo fluido, y el del agua.