

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
PARA LÍQUIDOS Y GASES CON BASE EN
UN MICROCONTROLADOR”**

TESIS QUE PRESENTA:

JUAN SALAS MIER

PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

ASESOR:

ING. IGNACIO FRANCO TORRES

MORELIA MICHOACÁN, Diciembre de 2009

AGRADECIMIENTO

A todos aquellos que de alguna u otra manera prestaron sus recursos, conocimientos, equipo, apoyo, instalaciones, orientación y lo máspreciado e invaluable: SU TIEMPO en el desarrollo de esta tesis.

A mis padres Alma Rosa y Juan Francisco por ser mi ejemplo a seguir, por brindarme el calor de un HOGAR, el apoyo de una familia y sobretodo por darme la mejor herencia q pude recibir: una profesión.

Mi agradecimiento total para ti Cas por tantos momentos felices, por todo el apoyo que me has dado durante mi carrera, por ser el hombro en que me recargo el oído que me escucha y la mano que siempre está ahí para ayudarme a levantarme. Las palabras nunca serán suficientes para darte las gracias por todo lo que has hecho por mi y todo lo que ayudaste para que esta tesis fuera concluida.

A mi asesor el profesor Franco por todo lo que aportaste para esta tesis, por toda tu ayuda, tus recursos, tus conocimientos, tu tiempo y tu paciencia. Gracias por darme ánimos a continuar y gracias también por tu amistad pero más que ninguna otra cosa te agradezco tu gusto desmedido por la electrónica y tu vocación de compartir tus conocimientos.

Gracias a mis hermanos Carlos y Daniel. A Carlos por los recursos técnicos, material, equipo y por ayudar en esta tesis en todo lo que estuvo a tu alcance. A Daniel y mi cuñada Bety por la revisión y el apoyo económico.

A los ingenieros: Ignacio Franco, Carlos Salas, Carlos Perea, Arturo García, Gabriel Morelos y Saúl Calderón, mil gracias, sus conocimientos fueron trascendentales para el desarrollo de éste trabajo.

A mis sinodales por haberse tomado el tiempo que esta tesis les haya requerido. Y gracias también a todos los buenos maestros de la Facultad q me formaron como ingeniero.

Por último gracias a la UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO “Cuna de Héroe, crisol de pensadores” y a la Facultad de Ingeniería Eléctrica por ser como un segundo hogar por varios años y por darme la oportunidad de cumplir un sueño en una institución de la que me siento completamente orgulloso.

DEDICATORIA

Dedicado en memoria de mi gran amigo Huitzi.

Muy en especial para ti Flaqui por lo que hemos vivido juntos. Por tu paciencia y tu apoyo que han sido sustanciales. Por mostrarme otro lado de la vida, por ser un ejemplo para mí. Por estos años de felicidad por tus virtudes y tus defectos, por tu sinceridad, tu honestidad, tu cariño y por lo que el futuro que nos tiene preparado. Todo esto va dedicado para ti.

A toda mi familia: a mis hermanos por que tenemos una vida llena de recuerdos alegres y a sus esposas por hacerlos felices, a mis abuelos y toda su familia, a Darky, mi compañero fiel por ya 8 años que también es de la familia, pero muy en especial a mis padres.

A mi papá por inculcarme siempre el valor del trabajo y del esfuerzo, por enseñarme a luchar por lo que uno quiere, por superar siempre todas las adversidades que la vida te ha puesto, por instruirme a terminar lo que empiezo y por todos los consejos que me has dado.

A mi madre por mantener a la familia unida en un entorno de amor y de valores, por que gracias a ti conocemos lo que es la confianza y el apoyo total en incondicional, por tu buen humor, por la sonrisa que siempre hay en tu cara y por impulsarme cada día a estudiar, a prepararme y creer en mí siempre.

Tambien a mis amigos, a los de la banda y a todos los que conforman LdC: Checo, Gabo, Fofó, Dulce, Gordo, Nateras, Randy, Cabro y Heri.

A todos ustedes más que dedicarles un trabajo se les dedica una carrera, un esfuerzo que hoy llega a su fin.

RESUMEN

El proyecto de tesis que a continuación se presenta consiste en un trabajo conjunto con un alumno tesista de la Facultad de Ingeniería Mecánica que consta de desarrollar un equipo experimental para la medición del coeficiente de conductividad térmica para líquidos y gases. Se nos entrega un prototipo mecánico basado en geometría cilíndrica que por medio de la Ley de Fourier en su formulación diferencial permite determinar el coeficiente de conductividad térmica del medio que se requiera en forma indirecta por medio de mediciones de temperatura.

El desarrollo electrónico se basa en el microcontrolador PIC16F877A como cerebro del medidor, y se usaron los conocimientos adquiridos principalmente en electrónica de potencia, instrumentación, control analógico y digital así como microcontroladores.

Contenido

Agradecimiento	i
Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	viii
Lista de Símbolos y Abreviaturas	ix

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Justificación.....	4
1.5. Metodología.....	4
1.6. Descripción de los capítulos.....	5

Capítulo 2. Medición de la conductividad térmica

2.1. Calor y temperatura.....	7
2.2. Transferencia de calor.....	7
2.3. Formas de transferencia de calor.....	8
2.3.1. Transferencia de calor por conducción.....	8
2.3.2. Transferencia de calor por radiación.....	8
2.3.3. Transferencia de calor por convección.....	8
2.4. Conducción de calor.....	9
2.5. Conductividad térmica.....	9
2.6. Medición de la conductividad térmica.....	11
2.6.1. Medición empleando geometría esférica.....	11
2.6.2. Medición empleando geometría cilíndrica.....	13
2.6.3. Medición empleando geometría plana.....	15

Capítulo 3. Descripción del equipo desarrollado

3.1. Prototipo mecánico.....	18
------------------------------	----

3.1.1. Desarrollo del modelo mecánico experimental.....	18
3.1.2. Diseño y fabricación del equipo.....	19
3.2. Integración del equipo experimental.....	22
3.3. Diseño del hardware.....	23
3.3.1. El microcontrolador.....	23
3.3.2. Control de potencia.....	24
3.3.3. Los sensores de temperatura.....	26
3.3.4. El display LCD.....	27
3.4 Diseño del Software.....	28
3.4.1. El entorno de desarrollo.....	28
3.4.2. Descripción general del software.....	30

Capítulo 4. Pruebas y validación

4.1. Introducción.....	33
4.2. Pruebas mecánicas.....	33
4.2.1. Prueba a una muestra de agua aplicándole una potencia de 80 Watts.....	34
4.2.2. Prueba a una muestra de agua aplicándole una potencia de 120 watts.....	38
4.2.3. Resultados comparativos.....	43
4.3. Pruebas eléctricas del medidor.....	44
4.3.1. Conceptos de precisión y exactitud.....	48
4.3.2. Precisión y exactitud del medidor.....	49

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones.....	51
5.2. Recomendaciones y trabajos futuros.....	53

Apéndice “Hojas de datos”.....	55
---------------------------------------	-----------

Bibliografía.....	68
--------------------------	-----------

Lista de Figuras

1.1 Diagrama a bloques del sistema electrónico.....	3
1.2 Diagrama a bloques del sistema mecánico.....	3
2.1 Esquema de la geometría esférica empleada para la medición de la conductividad térmica.....	12
2.2 Esquema de la geometría cilíndrica empleada para la medición de la conductividad térmica.....	13
2.3. Dispositivo de placa plana para la medición de la conductividad térmica.....	14
3.1 Plano del cilindro interior.....	19
3.2 Plano del cilindro exterior.....	19
3.3 Plano del cilindro contenedor.....	20
3.4 Plano de la tapa adiabática superior.....	20
3.5 Plano de la tapa adiabática inferior.....	20
3.6 Fotografía del cilindro contenedor con los conectores insertados.....	21
3.7 Fotografía de los dos cilindros concéntricos ensamblados en la tapa inferior.....	21
3.8 Prototipo con sus 9 piezas ensambladas.....	22
3.9 Diagrama a bloques del modelo experimental.....	22
3.10 Microcontrolador PIC16F877A.....	23
3.11 Conexión básica del microcontrolador.....	24
3.12 Diagrama esquemático del control de potencia.....	25
3.13 Sensor de temperatura LM35.....	27
3.14 Diagrama de conexión de la pantalla LCD.....	28
3.15 MPLAB IDE.....	29
3.16 Entorno de desarrollo del software.....	29
3.17 Estructura general del programa.....	30
4.1 Componentes del prototipo completo.....	33
4.2 Grafica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 80W.....	34
4.3 Detalle de la grafica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 80W en estado estable.....	37

4.4 Grafica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 120W.....	38
4.5 Detalle de la grafica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 120W en estado estable.....	42
4.6 Primera medición de temperatura a 80W.....	45
4.7 Primera medición de temperatura a 120W.....	45
4.8 Graficas Temperatura contra tiempo a una muestra de agua a 80 y 120 watts después de filtrar los datos por software.....	47

Lista de Tablas

4.1 Mediciones de T1 y T2 para P=80W.....	35
4.2 Mediciones de T1 y T2 para P=120W.....	39
4.3 Conductividad Térmica obtenida de la experimentación a una muestra de Agua.....	44
4.4 Exactitud de los sensores 1 y 2.....	49
4.5 Precisión de los sensores 1 y 2.....	50
4.6 Repetición de pruebas al equipo integrado.....	50

Lista de Símbolos y Abreviaturas

\dot{Q}	Flujo de calor.
°C	Grados centígrados.
°F	Grados Fahrenheit.
°K	Grados Kelvin.
A	Área.
A.	Ampere.
A/D	Analógico-digital.
BTU	<i>British Thermal Unit</i> (unidad térmica británica)
CA	Corriente alterna.
CD	Corriente directa.
<i>ft.</i>	Pie.
H	Hora.
Hz	Hertz
J	Joule.
K	Kilo.
L	Longitud.
m	Mili.
<i>m.</i>	Metro.
P	Potencia disipada.
PIC	<i>Peripheral Interface Controller</i> (controlador de interface periférico).
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (modulación por ancho de pulsos).
Q	Calor suministrado.

r	Radio.
s	Segundo.
T	Temperatura.
t	Tiempo.
V	Volt.
W	Watt.
λ	Conductividad térmica.
μ	Micro.
Σ	Sumatoria.
Ω	Ohm.

*Sorprendernos por algo es el primer paso
de la mente hacia el descubrimiento*

Louis Pasteur

CAPÍTULO 1

“INTRODUCCIÓN”

1.1 INTRODUCCIÓN.

La conductividad térmica es una propiedad que poseen todos los materiales que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos. Para entender la conductividad térmica se puede hacer una comparación con términos de la carrera de ingeniería electrónica con que se está más familiarizado. Por ejemplo, se puede hacer la analogía de la termodinámica con la electricidad, estos son conceptos que al parecer no tienen mucho que ver pero en realidad son equivalentes, por ejemplo en este caso se habla de conductividad térmica como un término mecánico, que se convierte en conductividad eléctrica cuando usando términos eléctricos.

De igual manera como los fenómenos eléctricos, los térmicos también es necesario medirlos. Es por eso que la medición de la conductividad es de gran importancia para conocer las propiedades térmicas de los medios y basa su interés en poder realizar estudios satisfactorios y dar soluciones confiables a problemas de transferencia de calor. Sin embargo no es tan sencillo conseguir un medidor, ya que en este caso no es como con la electricidad que por un bajo costo se pueden adquirir medidores múltiples y de distintos tipos, en este caso lo único que se consigue son termómetros y éstos solamente miden temperatura para obtener otros parámetros o propiedades no es suficiente con este instrumento.

El calor puede ser transferido de un punto a otro de tres maneras: conducción, convección y radiación. En la conducción el calor se transmite a través de un medio material y no hay transporte de materia. Así pues usando la conducción como mecanismo de transferencia de calor y sistemas electrónicos de potencia, instrumentación y electrónica

digital se presenta en el siguiente trabajo un medidor de conductividad térmica para líquidos y gases con base en un microcontrolador.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Lo primero que surge en este caso es la necesidad por parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica, particularmente del Laboratorio de Termodinámica de contar con un equipo que sea capaz de medir de manera directa e independiente la conductividad térmica en líquidos y gases. La inquietud fue planteada y a partir de ahí se comienzan pláticas sobre cómo debería ser el equipo.

Entre las características del medidor deben estar principalmente movilidad, funcionalidad, practicidad y autosuficiencia en todo sentido, es decir, que venga en él incluido todo lo necesario para hacer las mediciones sin necesidad de computadoras, monitores o cualquier tipo de equipo externo.

1.3 OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es en primer lugar diseñar y en segundo construir un sistema electrónico que mida la conductividad térmica en líquidos y gases. El medidor debe tener las características requeridas por quienes lo van a utilizar, entre las cuales están:

- Ser móvil, ya que es un equipo de laboratorio.
- Sencillo de utilizar.
- Ser práctico y funcional.
- Ser lo más independiente que sea posible.

La figura 1.1 presenta un diagrama a bloques que muestra las partes que componen el medidor. Cabe mencionar que en este diagrama sólo se muestra el sistema electrónico y que el medidor en forma global consta no nada más de eso sino también de todo un sistema mecánico que fue diseñado de forma específica para que se puedan realizar las mediciones con los sensores de temperatura y de manera indirecta el microcontrolador haga los cálculos del coeficiente de conductividad térmica.

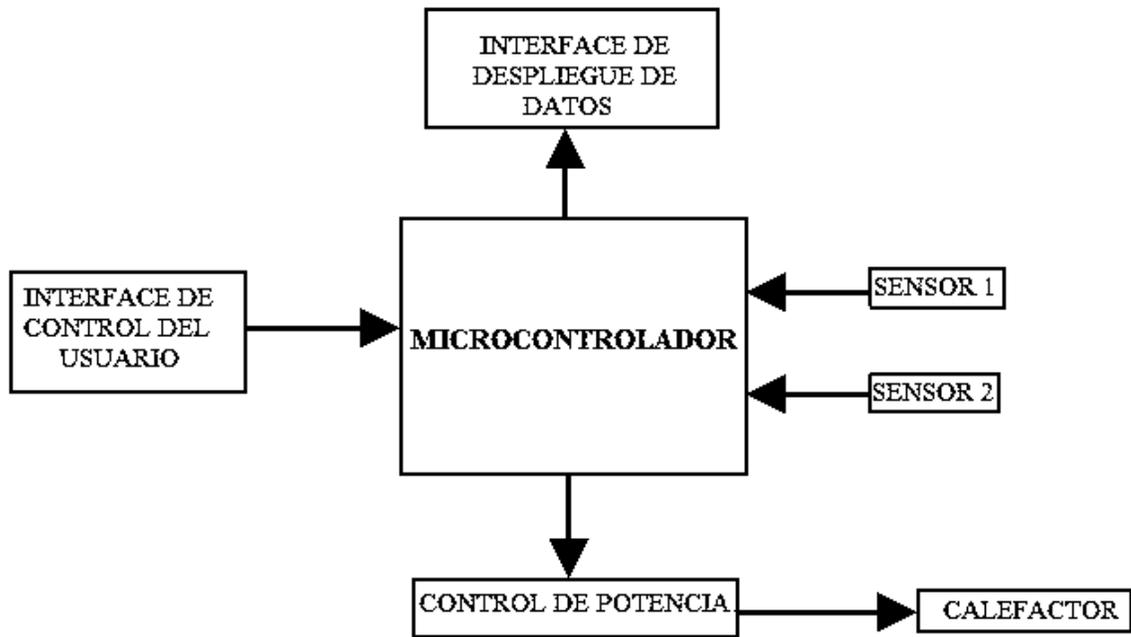


Figura 1.1 Diagrama a bloques del sistema electrónico

Por otra parte, en la figura 1.2 se muestra un diagrama a bloques del sistema mecánico desarrollado en el cual se observa la interacción mutua entre los cilindros y el lugar donde se colocan los sensores y el refrigerante

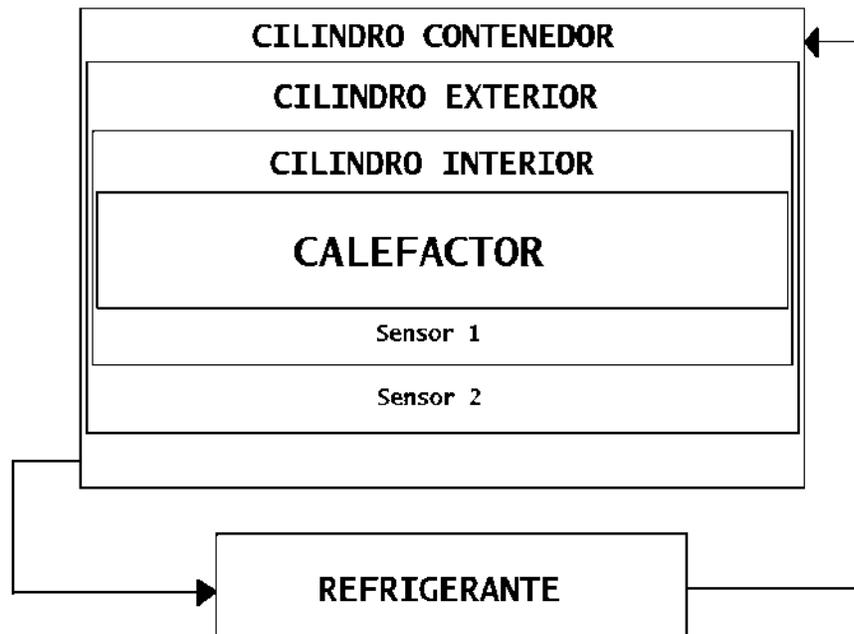


Figura 1.2 Diagrama a bloques del sistema mecánico

1.4 JUSTIFICACIÓN

La realización de esta tesis se basa principalmente en el hecho de que tiene una aplicación directa dentro de las necesidades actuales de un sector, en este caso un laboratorio, ya que es una herramienta útil y necesaria para los profesores y alumnos que impartan o tomen cursos de termodinámica. Lo anterior es requerido por el Laboratorio de Termodinámica que da servicio no sólo a la Facultad de Ingeniería Mecánica sino a todas las facultades de ingeniería de la Universidad Michoacana que toman materias en dicho laboratorio con lo cual se podrá beneficiar a parte de la comunidad académica y estudiantil de la Universidad.

Existen algunos modelos comerciales en el mercado, pero son varias sus desventajas. En primer lugar el costo que es excesivamente alto cuando construir el prototipo nos costaría sólo una fracción de ese precio. En segundo lugar hay muy pocas empresas que lo construyan y por ende no es tan fácil conseguirlo y no hay variedad de modelos de donde escoger.

Además de esto resulta de gran interés el hecho de que al construir un prototipo práctico no sólo se puede dar solución a un problema real sino que se obtienen resultados tangibles y validados ya que la ingeniería va mucho más allá de teoría y cálculo, también se trata de usar éstos conocimientos para hacer cosas prácticas.

1.5 METODOLOGÍA

Dado que se trató de un trabajo multidisciplinario en conjunto con un alumno tesista de la Facultad de Ingeniería Mecánica, no todo dependió de los diseños propios.

En primer lugar se recibió un prototipo mecánico diseñado y realizado de manera particular para que pudiera cumplir con los fines que el medidor necesitaría en cuestiones de geometría, medidas y funcionalidad. A partir de esto, se comenzó a recabar la mayor cantidad de información posible sobre termodinámica y del sistema en sí para saber de qué manera se realizarían las mediciones.

En cuanto a lo electrónico, lo primero que se hizo fue un control de potencia para un calefactor resistivo gobernado por el usuario a través del microcontrolador. Después se procedió a elegir los sensores de temperatura, caracterizarlos e instrumentarlos para que pudieran ser leídos por un convertidor A/D. Finalmente se realizó el programa para que el microcontrolador interpretara las señales, hiciera los cálculos y desplegara los resultados.

El programa se realizó en lenguaje C y se utilizaron los kits y entornos de desarrollo que distribuye el fabricante del PIC (en este caso MICROCHIP) y se utilizaron componentes activos y pasivos de uso común.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS

Capítulo 1: “Introducción”. Se habla en general de en qué consiste la tesis, por qué se eligió el tema, qué se espera obtener y cómo se piensa hacer.

Capítulo 2: “Medición de la Conductividad Térmica”. En este se tratan los conceptos básicos sobre conductividad térmica: qué es, cómo se realizan las mediciones, qué parámetros se requieren, cómo se llega a los resultados, desarrollo de fórmulas. Asimismo se habla del prototipo mecánico diseñado, tipo de geometría, medidas, ecuaciones y componentes.

Capítulo 3: “Descripción del Equipo Desarrollado”. Este capítulo es la parte más interesante de la tesis, puesto que es en el que se desarrolla en sí el instrumento de medición. En el se describe a detalle el equipo desarrollado, el diseño e implementación del mismo, los pasos que llevan a la realización, construcción física, etc. Se divide en 2 partes: la primera es el diseño del hardware donde se especifica qué componentes se usan, sensores, amplificadores, etc. La segunda es el diseño del software donde se explicará lo relacionado a la programación del microcontrolador, cómo es el tipo de control a utilizar, el convertidor A/D, tratamiento de los datos y cálculos realizados y desplegado de los datos.

Capítulo 4: “Pruebas y Validaciones”. Con el equipo ya hecho físicamente se procede a validarlo es decir realizar las pruebas necesarias para saber si lo realizado en el capítulo anterior es correcto o hay que corregirlo. Esto se hace con materiales cuyo coeficiente de conductividad térmica es conocido, y así corroborar los resultados del instrumento tanto mecánica como eléctricamente.

Capitulo 5: “Conclusiones y recomendaciones”. En este último capítulo se reportan los resultados del equipo desarrollado, cómo funciona y de qué manera se opera, dando conclusiones generales y particulares así como recomendaciones para trabajos futuros.

Finalmente en el apéndice se agregan las hojas de datos de los componentes activos que se usaron. Por último se adjunta la bibliografía.

*La sabiduría consiste en tener presente
cuál es el siguiente paso; la virtud,
en llevarlo a cabo.*

David Starr Jordan

CAPÍTULO 2

“MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA”

2.1 CALOR Y TEMPERATURA.

En la actualidad se conoce al calor como una forma de energía, ya que el calor satisface el potencial de trabajo o la capacidad de producir trabajo. Éste puede ser generado por: reacciones químicas, reacciones nucleares, disipación electromagnética o disipación mecánica.

Calor es la interacción de energía entre un sistema y sus alrededores, a través de los límites de un sistema en que no hay transferencia de masa, como consecuencia de la diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores. El calor se transfiere de mayor a menor temperatura, y esta transferencia de energía se realiza en función de la diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno.

Por su parte la temperatura es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema, es decir, la temperatura es una propiedad que tienen los sistemas y que se puede medir.

2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

Cuando se tienen dos sistemas a diferentes temperaturas y se encuentran en contacto se produce un intercambio de energía de un sistema a otro, es decir el flujo de energía ocurre del sistema de mayor temperatura al de baja temperatura.

El proceso mediante el cual se produce este intercambio de calor se denomina “transferencia de calor”. Este es un mecanismo mediante el cual se transfiere energía a través de la frontera de un sistema debido a una diferencia de temperatura.

2.3 FORMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor puede producirse mediante tres mecanismos distintos: conducción radiación y convección; aunque también existen casos donde se pueden combinar las tres formas de transferencia de calor de una región a otra.

2.3.1 Transferencia de calor por conducción

Es la transferencia de energía debida a las interacciones entre las partículas del interior de un material. La transferencia de calor está directamente relacionada con los gradientes de temperatura. Dentro del cuerpo hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la región de baja temperatura. Se observa que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de la transferencia de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

2.3.2 Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación no requiere de ningún medio físico para transmitirse. El intercambio de energía radiante puede ocurrir entre dos superficies, entre una superficie y un gas, también esta transferencia de calor puede involucrar una interacción entre varias superficies y fluidos que participen en el proceso.

La radiación es el único mecanismo de transferencia de calor que puede producirse en vacío.

2.3.3 Transferencia de calor por convección

Este tipo de transferencia de energía involucra la superficie de un sólido y un líquido o un gas debido al movimiento del fluido. El mecanismo real es una combinación de conducción en la entre fase sólido-fluido y el movimiento del fluido que se lleva la energía.

Existen dos clases de procesos convectivos que son:

- a) la convección forzada, en la cual se fuerza el movimiento de un fluido por una superficie debido a la acción de un proceso externo. tal como una bomba o ventilador y
- b) la convección libre en la cual la densidad en el fluido como efecto del intercambio de energía provoca un movimiento natural del fluido.

2.4 CONDUCCIÓN DE CALOR

La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo y entre diferentes cuerpos en contacto.

La conducción térmica está determinada por la Ley de Fourier (2.1). Establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\frac{Q_x}{t} = -\lambda A \frac{T}{x} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_x	Tasa de flujo de calor que atraviesa el área en J ó BTU .
A	El área en m^2 ó ft^2 .
x	La dirección del flujo en t ó ft .
λ	La conductividad térmica (constante de proporcionalidad)
T	La temperatura en $^{\circ}F$ ó K
t	El tiempo en s .

2.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad térmica es la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes

La ecuación (2.1) es la igualdad que define la conductividad térmica. Estudiando tal igualdad se pueden realizar mediciones experimentales para calcular la conductividad térmica de distintos materiales. Para realizar mediciones de gases a temperaturas bajas, se pueden utilizar métodos analíticos en la teoría cinética de los gases para predecir de manera exacta los valores observados experimentalmente.

Para el mecanismo de conducción de energía térmica en gases, se identifica la energía cinética de una molécula con su temperatura; así en la región de alta temperatura, las moléculas tienen velocidades mayores que en una región de temperatura baja. Las moléculas se encuentran en continuo movimiento aleatorio, chocando entre sí, e intercambiando energía. Es decir, una molécula se mueve de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura, transporta energía cinética a la parte del sistema de baja temperatura y se transfiere esa energía a través de colisiones con moléculas de temperaturas bajas.

Así, en el mecanismo de conducción de energía térmica en líquidos, las moléculas se encuentran más cercanas entre sí que en los gases y se tienen campos de fuerza molecular los cuales ejercen una fuerte influencia sobre el intercambio de energía en el proceso de colisión.

La energía térmica puede ser conducida en sólidos de dos modos: vibración de red y por medio de electrones libres; en los conductores eléctricos los electrones libres se mueven en la estructura de la red del material. De la misma manera que los electrones pueden transportar carga eléctrica, también pueden llevar energía térmica de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura como ocurre en los gases. La energía también se puede transmitir como energía vibratoria en la estructura de la red del material. Es decir la transferencia de energía no es tan grande como el transporte por electrones y por tal razón los buenos conductores eléctricos son casi siempre buenos conductores térmicos, tal como aluminio, plata, cobre. Las unidades que se emplean en la medición de la conductividad térmica son:

a) Sistema Internacional:

$$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K/m} \quad \text{Ó} \quad \frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$$

b) Sistema Inglés:

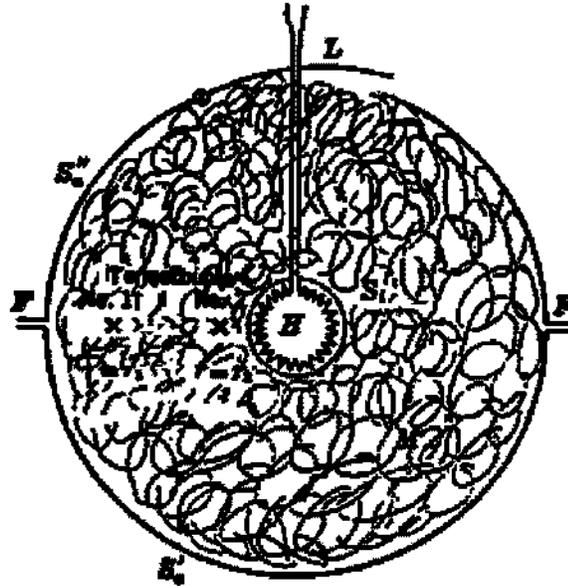
$$\frac{Btu/H}{ft^2(^\circ F/ft)} \quad \text{Ó} \quad \frac{Btu}{H ft \text{ } ^\circ F}$$

2.6 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Las soluciones de la Ley de Fourier en su formulación diferencial, empleando las condiciones de borde adecuadas, permiten resolver el problema de conducción de calor unidimensional y estacionario para geometrías planas, cilíndricas y esféricas. Conocidas estas soluciones, podrán usarse dispositivos basados en las mencionadas geometrías para determinar el coeficiente de conductividad térmica del medio que se requiera. Para ello, deberá tenerse la precaución de estar bajo un régimen de conducción estacionaria y unidimensional, lo cual en algunos casos constituye una aproximación.

2.6.1 Medición empleando geometría esférica

El dispositivo experimental (Figura 2.1), consta de dos esferas metálicas concéntricas, de espesor muy pequeño a fin de minimizar la capacidad calorífica del sistema. La esfera exterior está formada por casquetes semiesféricos que facilitan el montaje y desmontaje de las mismas y del medio a testear. Uno de los casquetes dispone de una tapa rebatible que posibilita la finalización del llenado de material. Dentro de la esfera más pequeña se encuentra una resistencia calefactora, que puede ser de Níquel–Cromo para temperaturas superiores a los 500°C, o de Platino para temperaturas menores. El espacio entre las esferas aloja el material a testear, que debe ser homogéneo.



F = Brida
B = Calefactor eléctrico
L = Tapa
M = Muestra de material
S = Interior esférico de metal
S' = Exterior esférico de metal

Figura 2.1 Esquema de la geometría esférica empleada para la medición de la conductividad térmica

La ecuación (2.2) gobierna esta geometría

$$\frac{Q}{t} = P = V \cdot I = \lambda \cdot 4\pi \cdot \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (2.2)$$

Donde:

Q	Calor en J.
t	El tiempo en s.
P	Potencia eléctrica en W
V	Voltaje aplicado al calefactor en V
I	Corriente en el calefactor en A.
λ	La conductividad térmica en $\frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$

T_1 y T_2	Temperaturas en los sensores en °K.
r_1 y r_2	Radios de las esferas m .

Las ventajas del método son:

- El calor aportado por la resistencia atraviesa el material en la dirección requerida (radial), sin ningún tipo de pérdidas.
- La conductividad térmica a diferentes temperaturas puede ser hallada colocando varios sensores a diferentes distancias radiales.

La mayor dificultad se tiene en llenar el espacio comprendido entre las dos esferas en forma homogénea, sobre todo cuando se requiere precisión en la densidad del material. Esto es válido para materiales “suelos”, como por ejemplo fibras de vidrio empleadas para aislamientos. En el caso de sólidos, el problema es el maquinado y el conformado por moldeo de las piezas, tanto en su forma exterior como en los alojamientos de los sensores de temperatura. Esta circunstancia hace que el método no sea empleado en sólidos. Tampoco el método es empleado en gases y líquidos, ya que aparece otro más ventajoso como se verá.

2.6.2 Medición empleando geometría cilíndrica

El método es similar al anterior, y fue usado por primera vez en el año 1905. Se emplean dos cilindros concéntricos como se muestra en la figura 2.2, alojando el material a medir entre ellos. En el interior del cilindro de menor diámetro se coloca la resistencia calefactora, la cual está cubierta con otro cilindro para uniformar la temperatura superficial. La medición de temperatura se efectúa sobre los cilindros exterior e interior, empleando sensores para ello.

El método se emplea para medir conductividad en materiales tales como sólidos, aislantes, refractarios y materiales para la construcción, así como también para líquidos, gases y metales a altas temperaturas.

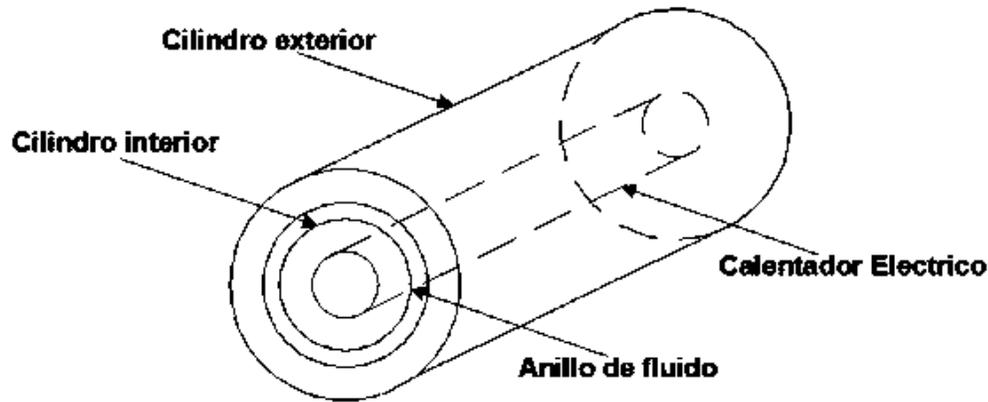


Figura 2.2 Esquema de la geometría cilíndrica empleada para la medición de la conductividad térmica

A diferencia del método anterior, en este caso se tienen pérdidas de calor por los extremos de los cilindros. Una forma de solucionar esto es construyendo cilindros tan largos como sea posible, calentarlos en toda su longitud y efectuar la medición en la zona central. Si la longitud de cilindro a emplear es relativamente pequeña, se disponen sensores en el sentido del eje axial del cilindro, de modo de determinar las pérdidas en los extremos, conocida la conductividad térmica del material del tubo.

Para medir la conductividad térmica en gases y líquidos, el dispositivo a emplear es un tubo capilar, en el cual se introduce un elemento calefactor, formado por un muy buen conductor eléctrico (generalmente se emplea un alambre de platino). La resistencia debe ser ubicada según el eje axial del tubo capilar. El tubo capilar (abierto en sus dos extremos) es introducido en una batea conteniendo el líquido a testear. Si consideramos que el capilar está hecho de un material muy conductor podremos asumir que la temperatura del líquido por fuera del capilar (la cual se puede medir fácilmente con un termopar) es igual a la temperatura del capilar. La temperatura del calefactor se conoce indirectamente midiendo la resistencia eléctrica del mismo y conociendo su coeficiente de variación con la temperatura. Para todos los casos, el valor de la conductividad térmica se calcula con:

$$\frac{Q}{t} = P = V \cdot I = \lambda \cdot L \cdot 2\pi \cdot \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (2.3)$$

Donde

Q	Calor en J.
t	El tiempo en s.
P	Potencia eléctrica en W
V	Voltaje aplicado al calefactor en V .
I	Corriente en el calefactor en A .
λ	La conductividad térmica en $\frac{W}{m \text{ } ^\circ K$
L	Longitud del cilindro en m .
T_1 y T_2	Temperaturas en los sensores en $^\circ K$.
r_1 y r_2	Radios de las esferas en m .

2.6.3 Medición empleando geometría plana

Es método data del año 1885, y es el más simple y comúnmente usado para la medición de la conductividad térmica en sólidos metálicos y no metálicos.

Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 2.3. Dentro de una caja metálica convenientemente aislada y de tamaño adecuado, se coloca una resistencia calefactora, que va cubierta por arriba y por debajo, con dos placas del material a medir, que son del mismo espesor. La placas van cubiertas por la otra superficie con dos placas huecas, por el interior de las cuales se hace circular un fluido frío a fin de evacuar el calor generado en el calefactor. Con este arreglo se consigue dividir el calor aportado en dos mitades.

El conjunto formado por las placas, la resistencia calefactora y las placas enfriadoras se abullona, empleando separadores construidos de material aislante para la correcta fijación entre ellos, y luego el conjunto es sujetado a la caja metálica que sirve de envuelta.

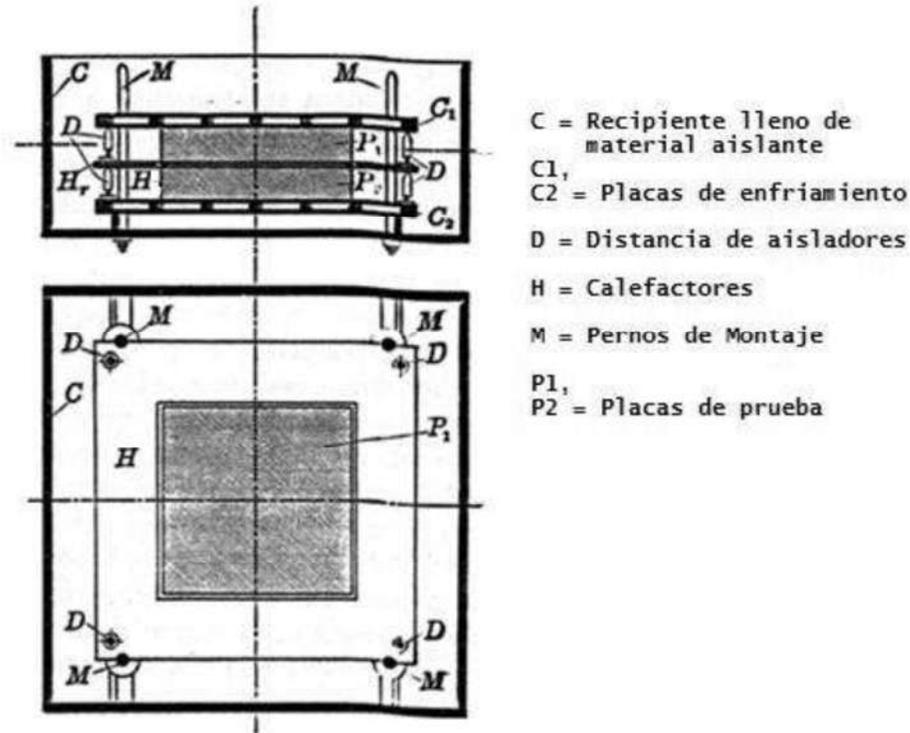


Figura 2.3. Dispositivo de placa plana para la medición de la conductividad térmica

Los inconvenientes que surgen son:

- Se tienen pérdidas de calor por los bordes de las placas. Esto se soluciona empleando un “anillo” de aislante de espesor adecuado.
- Debe controlarse la resistencia de contacto entre las diversas partes, actuando sobre la presión de sujeción y utilizando placas de superficies pulidas lo más posible.
- Puede haber una mala distribución de temperaturas en la resistencia calefactora, para lo cual deberá disponerse dentro de las placas de un buen conductor del calor.

La conductividad térmica se obtiene de:

$$\frac{Q}{2t} = \frac{P}{2} = \frac{V \cdot I}{2} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (2.4)$$

Donde:

Q	Calor en J.
t	El tiempo en s .
P	Potencia eléctrica en W.
V	Voltaje aplicado al calefactor en V .
I	Corriente en el calefactor en A .
λ	La conductividad térmica en $\frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$
A	Área de la placa en m .
T_1 y T_2	Temperaturas en los sensores en $^\circ K$.
e	Espesor de la placa en m .

*No basta con alcanzar la sabiduría,
es necesario saber utilizarla.*

Marco Tulio Cicerón

CAPÍTULO 3

“DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO”

3.1 PROTOTIPO MECÁNICO

Como se ha mencionado ya en el capítulo 1, se recibió un prototipo mecánico basado en geometría cilíndrica el cual fue desarrollado por el Ing. Carlos Perea Díaz en su trabajo de tesis titulado “Desarrollo de un método experimental para la determinación de la conductividad térmica en líquidos y gases” de la Facultad de Ingeniería Mecánica, trabajo en el cual se basó el desarrollo del prototipo electrónico y al cual se hacen varias referencias en adelante como son ecuaciones específicas, medidas, constantes entre otras.

3.1.1 Desarrollo del modelo mecánico experimental

El modelo experimental consta de dos partes: el diseño y fabricación del equipo experimental y el diseño del sistema de medición. El diseño y fabricación del modelo experimental, así como la integración del sistema de medición, se conforman de los resultados obtenidos en el modelo matemático y la teoría de medición.

Las bases del método indican que el sistema experimental debe realizar 3 funciones básicas:

- Aplicar un cambio de estado térmico a los cilindros concéntricos y a la muestra contenida en ellos, que consiste en la generación de calor con intensidad constante en la perforación del cilindro interior.
- Medir y registrar los cambios de temperatura en las paredes del cilindro interior y exterior aplicado a la muestra.
- Mantener a temperatura constante el agua de refrigeración a lo largo del proceso de medición.

3.1.2 Diseño y fabricación del equipo

La etapa de diseño y fabricación del equipo experimental mecánico consta de 2 partes:

1. Elaboración de los planos de diseño
2. Maquinado y montaje

En la fabricación del equipo experimental fue necesario realizar los planos de diseño y tener una referencia detallada para poder maquinar las piezas que constituyen el equipo.

Los planos diseñados de los cilindros se muestran en las figuras 3.1 a la 3.5 con sus respectivas cotas en milímetros.

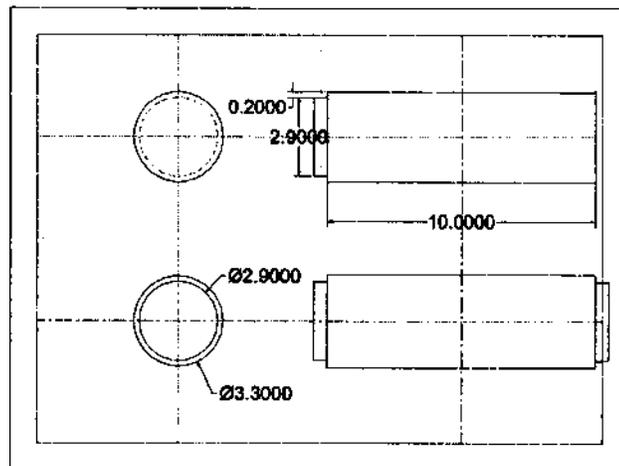


Figura 3.1 Plano del cilindro interior

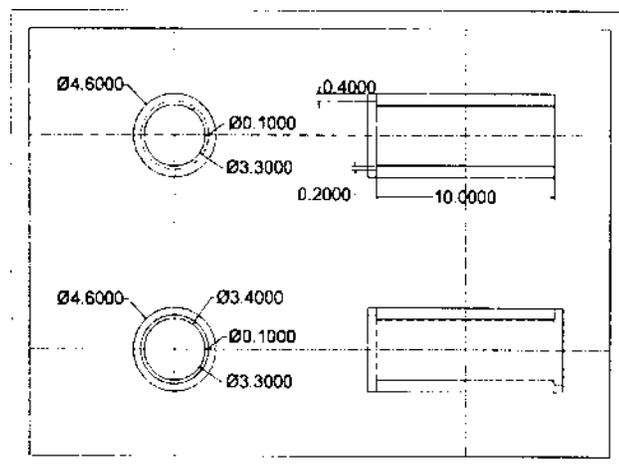


Figura 3.2 Plano del cilindro exterior

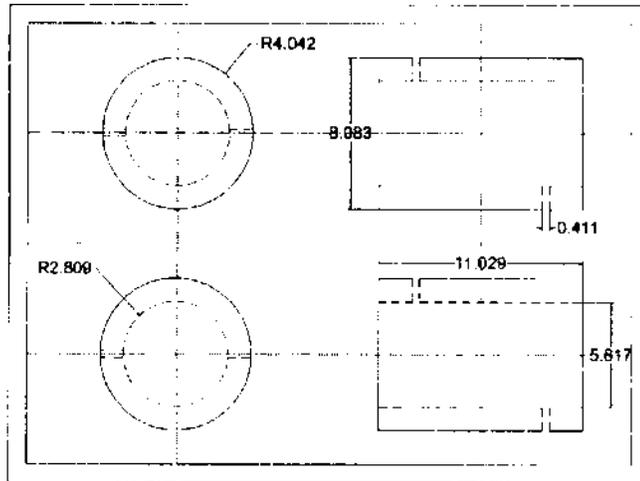


Figura 3.3 Plano del cilindro contenedor

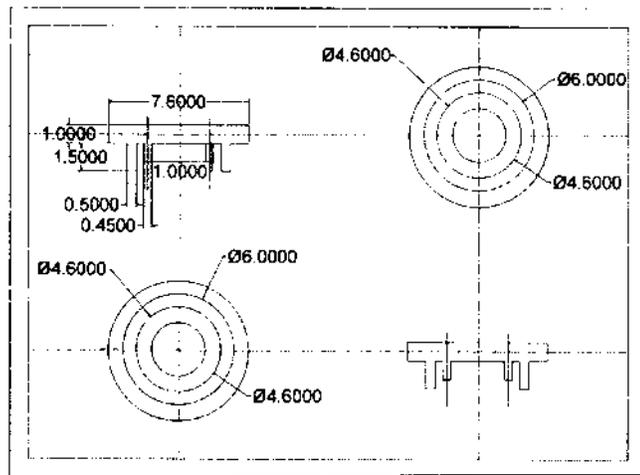


Figura 3.4 Plano de la tapa adiabática superior

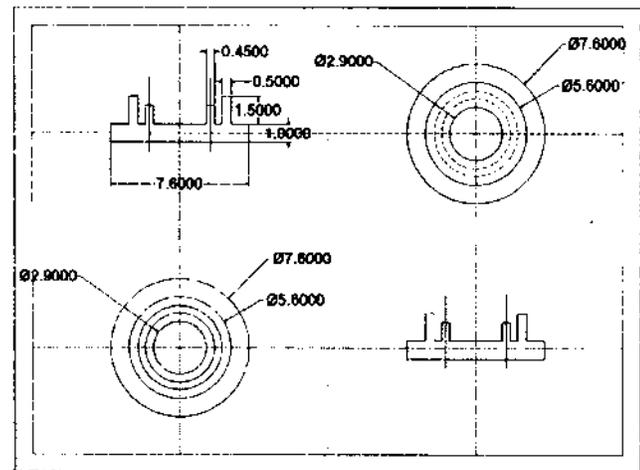


Figura 3.5 Plano de la tapa adiabática inferior

El prototipo completo consta de un total de 9 piezas, los 3 cilindros fabricados en aluminio puro, las 2 tapas adiabáticas además de 2 coples fabricados en celeron y por último 2 conectores de bronce con rosca estándar de $\frac{1}{4}$ ". En las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran las piezas terminadas así como el ensamble final del prototipo.



Figura 3.6 Fotografía del cilindro contenedor con los conectores insertados



Figura 3.7 Fotografía de los dos cilindros concéntricos ensamblados en la tapa inferior



Figura 3.8 Fotografía del prototipo con sus 9 piezas ensambladas

3.2 INTEGRACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El modelo experimental se representa en el diagrama a bloques de la figura 3.9

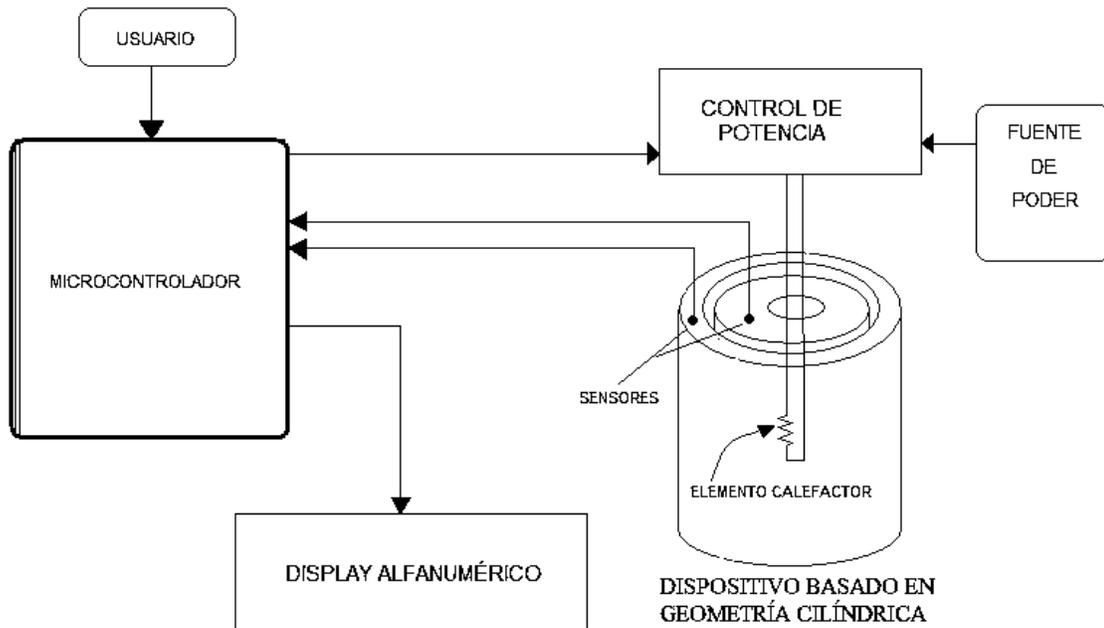


Figura 3.9 Diagrama a bloques del modelo experimental

El sistema electrónico se basa prácticamente en dos partes, una es el control de potencia y la otra el medidor en sí, basándose en el microcontrolador PIC16F877A como cerebro del mismo.

El usuario, por medio de una perilla regula la cantidad de potencia que quiere que tenga el sistema, por dentro el microcontrolador incluye una rutina que controla un pulso PWM en una salida digital y ésta a su vez pasa por una etapa de potencia transistorizada para tener un control fino de la cantidad de voltaje que alimentará el calefactor.

Después de esto, el microcontrolador tomará la señal de los sensores de temperatura y la procesará para hacer los cálculos necesarios basados en las ecuaciones para el sistema basado en geometría cilíndrica y hecho esto lo despliega en un display de cristal líquido.

3.3 DISEÑO DEL HARDWARE

La mitad del desarrollo electrónico se trata del hardware, es decir todo lo físico o tangible: las conexiones, componentes, diagramas, etc. Según la figura 3.9 el hardware se compone del microcontrolador, la etapa de potencia transistorizada, los sensores y el display LCD.

3.3.1 El Microcontrolador



Figura 3.10 Microcontrolador PIC16F877A

La computadora o cerebro central del sistema es el microcontrolador PIC16F877A que tiene las siguientes características:

- Arquitectura Harvard
- CPU tipo RISC

- Tecnología CMOS
- Ejecución de cada instrucción en un ciclo de reloj
- Frecuencia de oscilación de hasta 20MHz
- Hasta 8k x 14 bits de memoria flash de programa
- Hasta 368 bytes de memoria RAM
- Hasta 256 bytes de memoria EEPROM
- Lectura/escritura de la CPU a la memoria flash de programa
- Protección programable de código
- Hasta 14 fuentes de interrupción
- Reset de encendido (POR)
- Timer de encendido (PWRT)
- Modo SLEEP de bajo consumo de energía
- Rango de voltaje de operación de 2.0 a 5.5 volts
- Alta disipación de corriente de la fuente: 25mA
- Rangos de temperatura: Comercial, Industrial y Extendido
- Bajo consumo de potencia:
 - Menos de 0.6mA a 3V, 4 MHz
 - 20 μ A a 3V, 32 KHz
 - menos de 1 μ A corriente de *standby* (modo SLEEP).

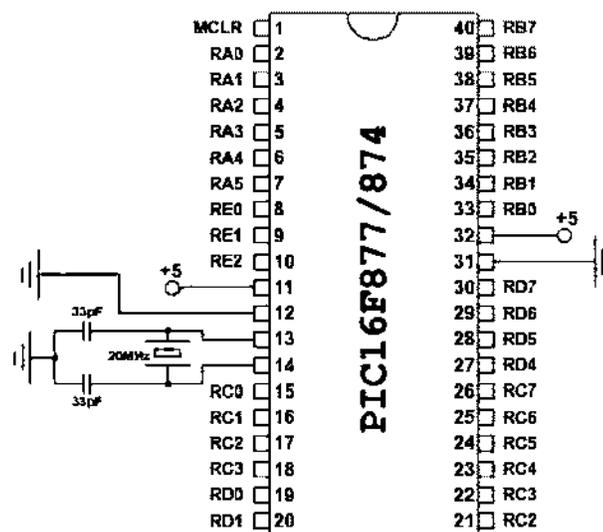


Figura 3.11 Conexión básica del microcontrolador

Como se ve en la figura 3.11 las conexiones del microcontrolador (el hardware) son muy pocas. Sólo se conecta el cristal de cuarzo y los capacitores para la oscilación externa del sistema y mediante el programa (software) adecuado para el PIC se controlan los puertos paralelos tanto de entrada como de salida

3.3.2 Control de Potencia

El diagrama esquemático es el siguiente:

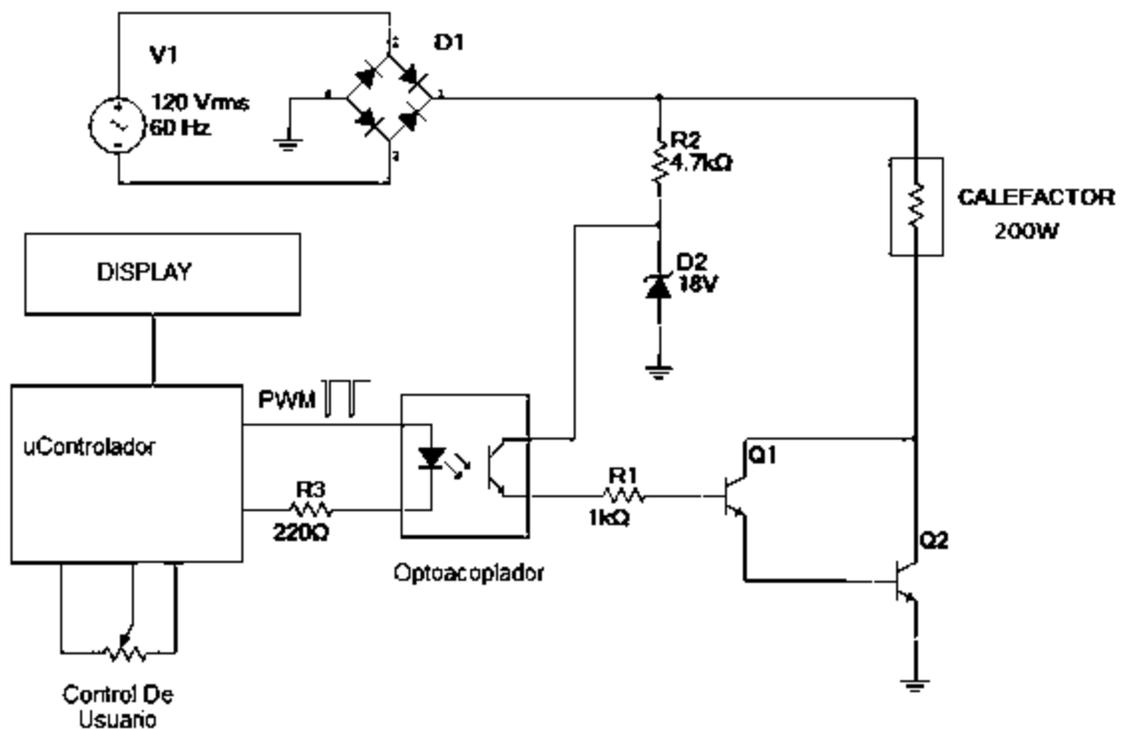


Figura 3.12 Diagrama esquemático del control de potencia.

Se trata de una etapa de potencia transistorizada y con una fuente lineal externa para alimentar el calefactor. Sus características son las siguientes:

- El usuario controla el % de la potencia aplicada al calefactor con un resistor variable
- Se alimenta con corriente directa obtenida de una fuente propia de CA
- Se controla con PWM mediante el microcontrolador

- Utiliza una etapa de potencia transistorizada
- Tiene aislamiento eléctrico de la etapa de potencia con la etapa de control mediante un dispositivo óptico
- El usuario puede ver la potencia suministrada al calefactor en el display

El PWM permite un control de 1 a 99% es decir que puede controlar el voltaje suministrado al calefactor desde 0 a 120 V y de la ley de Ohm

$$V = I * R \quad (3.1)$$

y de la ley de Watt

$$P = V * I \quad (3.2)$$

la disipación de potencia en el calefactor es

$$P = I^2 * R \quad (3.3)$$

Donde:

V	Voltaje en V .
I	Corriente en A .
R	Resistencia en Ω
P	Potencia en W .

De lo anterior y debido a que la resistencia del calefactor es fija, la potencia disipada por el calefactor dependerá directamente del voltaje suministrado por medio del PWM.

3.3.3 Los sensores de temperatura

El sistema lleva dos sensores electrónicos de temperatura, el elemento sensor es el circuito integrado LM35N que tiene las siguientes características:

- Calibrado en °C
- Voltaje de alimentación de 4 a 30 Volts de CD
- Resolución de 10 mV/°C
- Respuesta lineal
- Rango de medición de -55 a 150°C

cada carácter está formado por una matriz de 5x7 píxeles y en ellos se pueden crear caracteres alfanuméricos y en general cualquiera carácter del código ASCII. Para este proyecto se utilizó una pantalla de 4x16.

La figura 3.5 muestra un diagrama del LCD de uso genérico, tanto el diagrama esquemático de pines como una conexión utilizando el puerto B del microcontrolador como bus de datos.

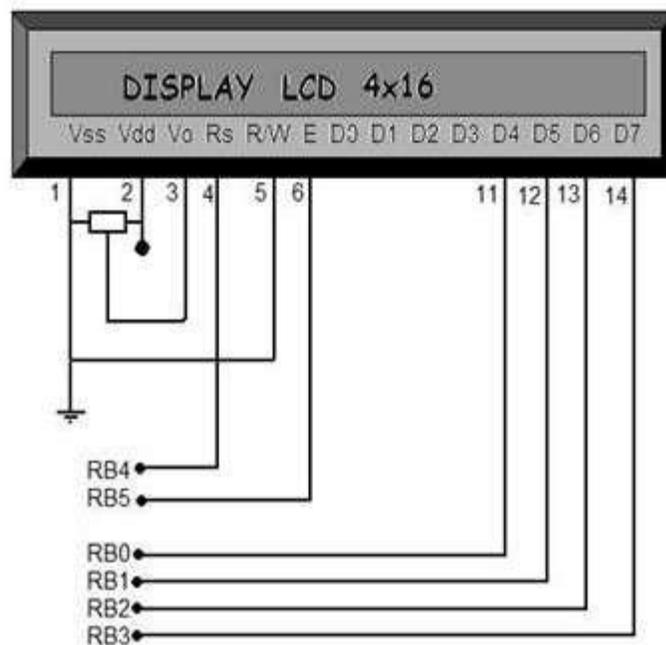


Figura 3.14 Diagrama de conexión de la pantalla LCD.

3.4 DISEÑO DEL SOFTWARE

La otra mitad del desarrollo electrónico es el software, es decir, la parte lógica. El software es creado en una PC y por medio de una interfase es grabado en el microcontrolador para que ahí se ejecute por sí solo.

3.4.1 El entorno de desarrollo

El software desarrollado en el proyecto fue creado en lenguaje C con una interfase de desarrollo propia de la marca del microcontrolador MICORCHIP, se trata del programa MPLAB IDE.

3.4.2 Descripción general del software

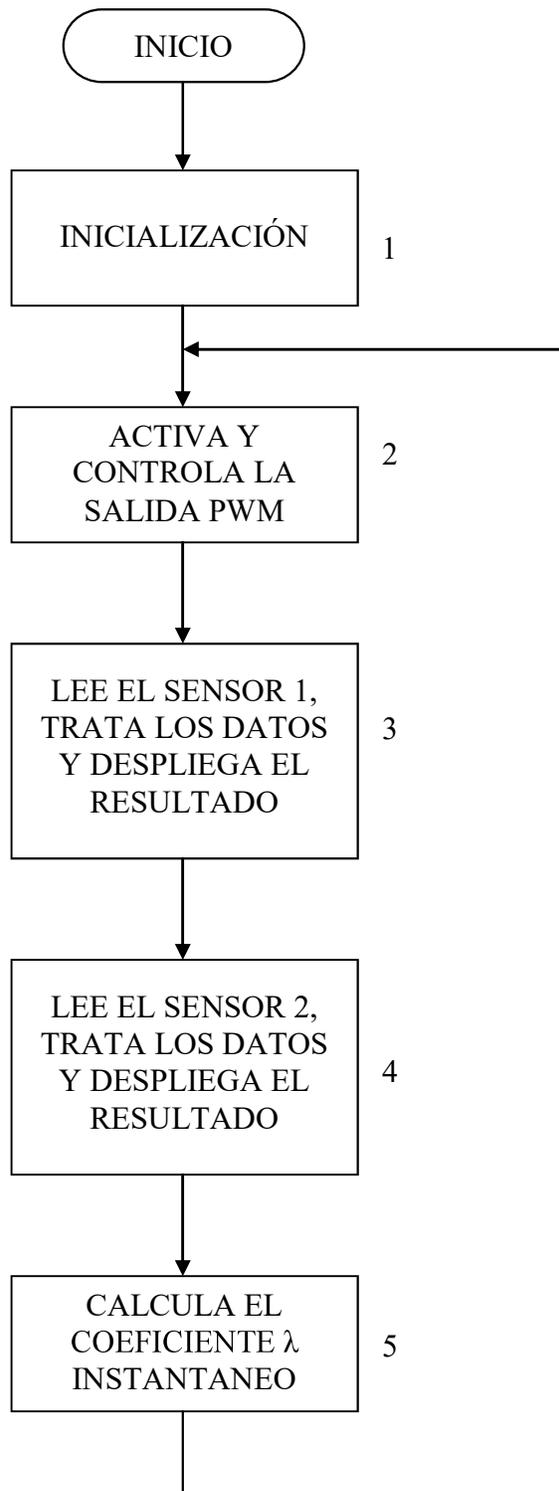


Figura 3.17 Estructura general del programa.

En la figura 3.17 se muestra un diagrama a bloques de la estructura general del programa desarrollado. Consta de 5 bloques que se ejecutan de manera secuencial (*steper*), el primero solamente una vez, entrando los demás en un bucle infinito para repetirse durante toda la ejecución.

En el primer bloque, como se indica en el nombre, se inicializa todo el programa, es decir, en primer lugar se declaran las variables globales y generales que se van a utilizar, se llama a la rutina para utilizar el LCD, se borra la pantalla y por último se configura de manera general en convertidor A/D, es decir, los datos asociados con el registro ADCON1 que son: selección del formato del resultado del convertidor y bits de control para la configuración de los puertos.

En el Segundo bloque se trata lo referente al control de potencia, éste se manipula por medio de un PWM. En primer paso se configura el convertidor A/D para usarse el canal 0 en el cual por medio de un potenciómetro se controla el porcentaje del ciclo de trabajo y cuya salida va hacia la etapa de potencia. Después de convertido el dato se lee y se reduce a 4 bits para tener un control total debido a que el registro de control del PWM puede tomar valores entre 0 y 255. Hecho esto se pasa a la configuración del modulo CCP como PWM: configuración inicial, del puerto, frecuencia y ciclo de trabajo. Por último se lee el dato y se despliega en la pantalla para que el usuario sepa qué cantidad de potencia se está suministrando en el calefactor.

El tercer y cuarto bloques son similares entre sí con la única diferencia de que sus instrucciones se aplican para los sensores 1 y 2 respectivamente. El primer paso de estos bloques es realizar la configuración inicial del canal 1 y 2 del convertidor A/D del microcontrolador que se encuentra apagado, en seguida lo activa y lee el dato instantáneo de 10 bits (valor entre 0 y 1023). Seguido de esto, se hace una manipulación por software para convertir el dato leído a °C. Por último y debido a que la temperatura leída se espera entre 0 y 100°C, se despliegan ambas temperaturas (indicadas como T1 y T2) en la pantalla con 3 dígitos enteros y 3 decimales.

En el último bloque se calcula coeficiente de conductividad térmica λ . Despejando λ de la ecuación 2.3 se obtiene:

$$\lambda = \frac{\left[P \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]}{2\pi L(T_2 - T_1)} \quad (3.4)$$

De lo anterior se observa que tanto $\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ como $2\pi L$ son constantes lo que indica que en esta última parte tenemos todos los datos que requerimos como son la potencia estimada y las temperaturas, por lo cual las operaciones que se requieren son: la multiplicación de la potencia por la constante del logaritmo, la diferencia entre las dos temperaturas, la multiplicación de éstas por la constante $2\pi L$ y por último el cociente de estos dos resultados.

Terminado esto el programa regresará al bloque 2 de manera infinita mientras esté energizado el circuito entregando en la pantalla resultados instantáneos en todo momento.

*El modo de dar una vez en el clavo
es dar cien veces en la herradura.*

Miguel de Unamuno

CAPÍTULO 4 “PRUEBAS Y VALIDACIÓN”

4.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se presentan las pruebas mecánicas y eléctricas hechas a los prototipos durante el desarrollo práctico del trabajo con el fin de validar el mismo, además se muestra también la forma de operar el equipo.

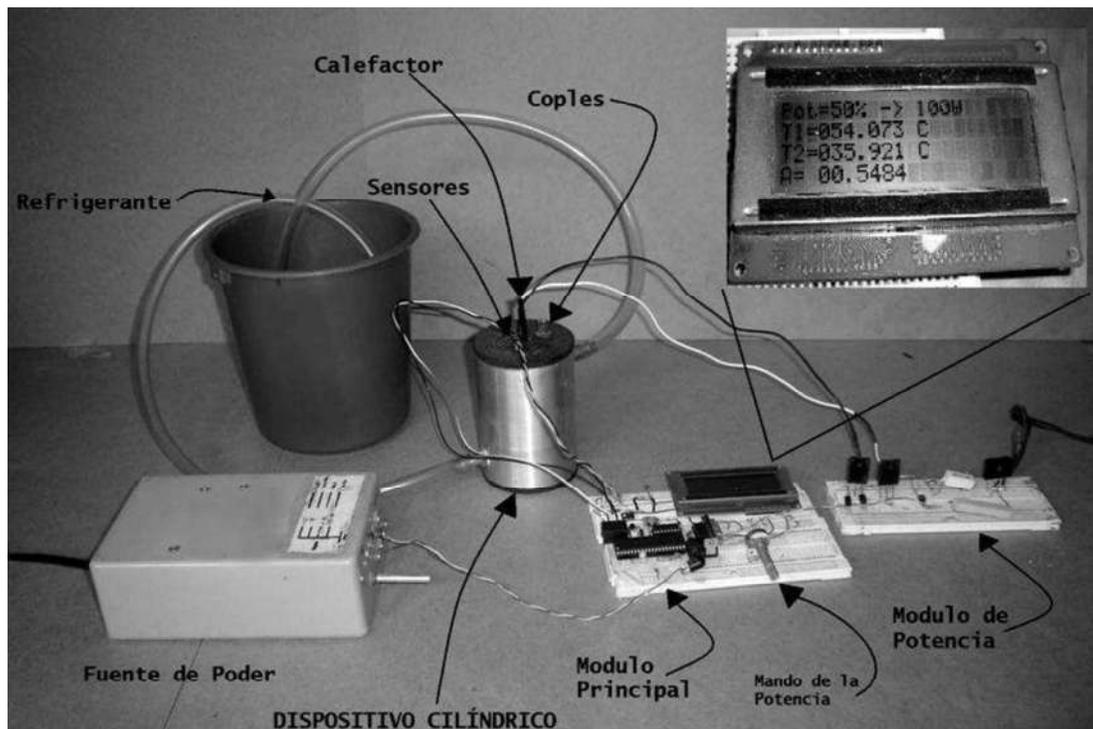


Figura 4.1 Componentes del prototipo completo

4.2 PRUEBAS MECÁNICAS

Las pruebas mecánicas aquí presentadas, fueron tomadas de la tesis titulada “Desarrollo de un método experimental para la determinación de la conductividad térmica en

líquidos y gases” de la Facultad de Ingeniería Mecánica con la que Carlos Perea Díaz obtuvo su título de Ingeniero Mecánico en febrero de 2009. Para obtener las lecturas se implementó un primer medidor electrónico, el cual fue altamente susceptible al ruido eléctrico, sin embargo para fines de validar mecánicamente el experimento fue de gran ayuda. La variante presentada hacía 10 lecturas por segundo y éstas se enviaban una computadora a través del puerto serie. Los datos fueron guardados en archivos de texto para después ser analizados. Los resultados obtenidos fueron óptimos por lo cual se validó el experimento mecánicamente. Las pruebas se hicieron con agua común y se hicieron varias pruebas para diferentes potencias en el calefactor. Las más interesantes con las que se ratificaron los resultados fueron a 80W y 120W, los resultados se presentan a continuación.

4.2.1 Prueba a una muestra de agua aplicándole una potencia de 80 Watts

En esta prueba se utilizó agua purificada como muestra fluida a medir, se ajustó la potencia del calefactor en 80 watts y como refrigerante se usó agua común a temperatura ambiente de 11°C en ese caso. La figura 4.2 muestra los resultados obtenidos con las líneas de tendencia de ambas graficas.

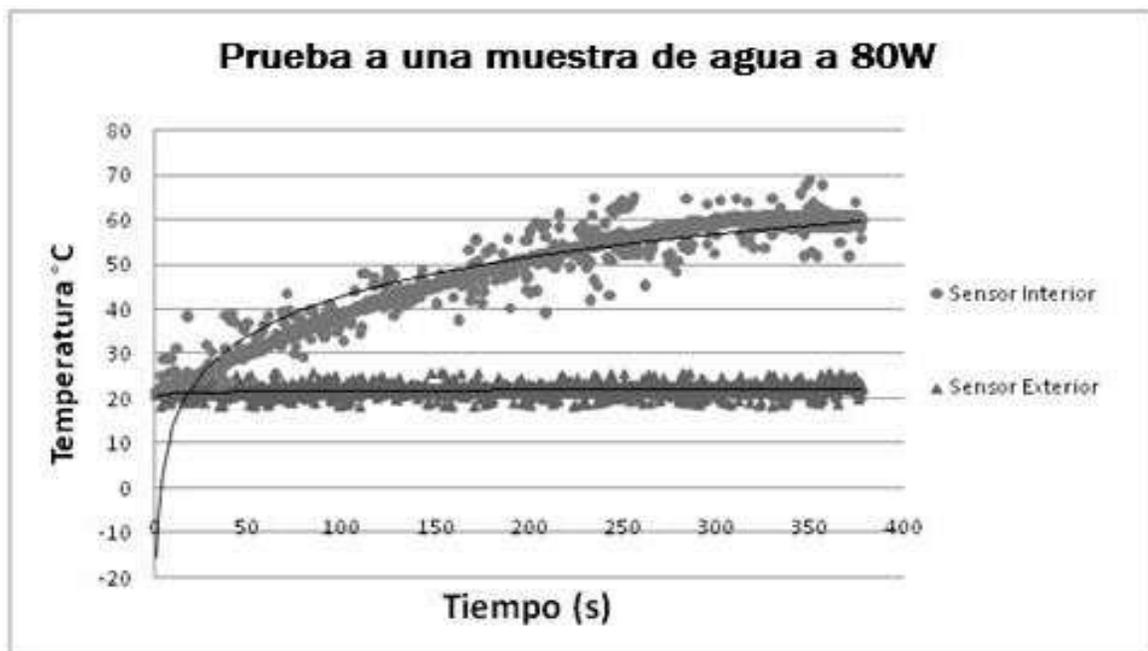


Figura 4.2 Gráfica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 80W

La prueba duró aproximadamente 380 segundos hasta alcanzar el estado estable y se tomaron 10 muestras por segundo, por lo cual se tuvo un total estimado de 3800 valores de temperatura por cada sensor. De éstos fueron desechados los valores que se disparaban muy lejanos a la tendencia por considerarse ruido. Algunos datos relevantes de la lectura se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Mediciones de T1 y T2 para P=80W

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
3	21.875	21.093	1
52	22.363	21.777	5
114	22.656	22.265	10
160	23.632	21.679	15
201	24.316	21.582	20
250	25.195	21.289	25
308	26.269	21.679	30
358	26.953	21.679	35
403	27.832	21.582	40
450	28.710	21.484	45
501	30.273	22.558	50
555	31.152	22.753	55
610	32.226	22.265	60
651	32.812	24.414	65
704	33.496	21.582	70
750	34.667	22.167	75
800	35.937	22.167	80
855	36.328	22.070	85
903	37.304	22.167	90
950	38.085	22.070	95
998	38.964	22.167	100
1047	39.453	22.070	105
1094	40.332	23.535	110
1150	40.917	22.070	115
1205	42.285	21.679	120
1250	43.066	22.070	125
1310	43.066	21.386	130
1351	43.750	21.679	135
1408	44.824	22.167	140
1449	45.117	22.070	145

Tabla 4.1 Mediciones de T1 y T2 para P=80W (continuación)

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
1501	45.703	21.972	150
1559	46.093	22.363	155
1607	46.875	22.265	160
1650	47.363	22.949	165
1701	48.144	22.167	170
1751	48.925	22.265	175
1802	49.707	22.070	180
1850	50.097	21.679	185
1900	50.390	22.070	190
1955	50.976	22.558	195
2008	51.171	22.363	200
2055	51.757	22.558	205
2110	52.343	22.265	210
2150	52.976	21.875	215
2201	53.613	22.265	220
2250	53.906	22.460	225
2306	54.101	23.632	230
2359	54.687	22.167	235
2408	55.273	22.460	240
2451	55.761	22.753	245
2501	56.152	22.167	250
2558	56.640	22.167	255
2602	56.933	21.875	260
2650	57.128	23.437	265
2707	57.617	22.265	270
2755	58.007	22.265	275
2802	58.203	23.437	280
2852	58.886	22.460	285
2901	59.082	22.167	290
2950	59.375	22.558	295
3006	59.863	22.460	300
3054	60.058	22.460	305
3099	60.351	22.460	310
3148	60.449	22.656	315
3201	60.644	23.046	320
3255	60.742	22.167	325
3306	60.546	24.609	330
3350	60.742	22.460	335
3410	60.546	22.265	340

Tabla 4.1 Mediciones de T1 y T2 para P=80W (continuación)

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
3459	60.839	22.460	345
3500	60.644	22.558	350
3552	60.742	22.460	355
3609	60.546	23.828	360
3650	60.644	22.460	365
3705	60.937	22.460	370
3750	60.253	22.558	375
3779	60.351	22.753	380

En la tabla 4.1 se tomó un dato por cada 5 segundos de medición en los cuales se puede apreciar la tendencia de manera clara. Los datos iniciales son iguales para ambos cilindros y se van incrementando conforme avanza el tiempo durante gran parte de la medición y se estabilizan cuando se rebasa el segundo 300 aproximadamente en un valor promedio de 60.5° para el sensor 2 mientras que el sensor 1 mantiene siempre su promedio de 21°C.

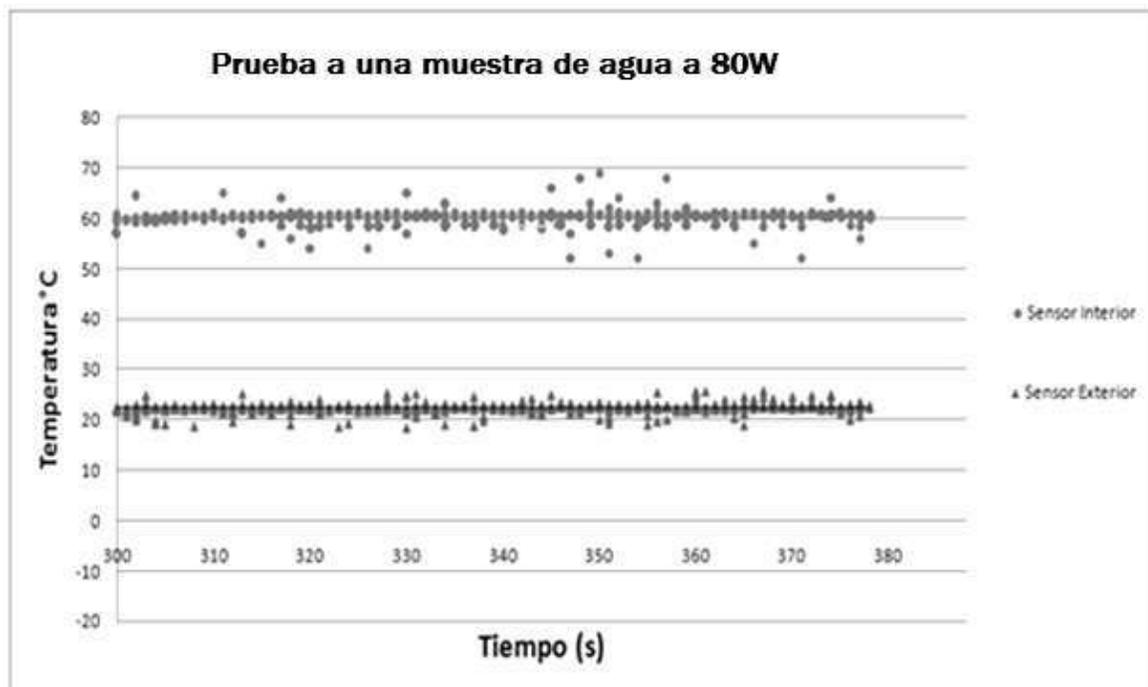


Figura 4.3 Detalle de la gráfica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 80W en estado estable

La figura 4.3 muestra la gráfica de temperatura contra tiempo en estado estable, es decir es un detalle de las mediciones finales, aproximadamente los últimos 800 datos de la medición en donde se nota sin necesidad de una línea de tendencia los valores en los cuales se estabilizan las temperaturas en el interior de los cilindros. Cabe mencionar que el cilindro exterior no cambia mucho su temperatura ya que es el que tiene contacto directo con el refrigerante.

4.2.2 Prueba a una muestra de agua aplicándole una potencia de 120Watts

Esta prueba fue muy similar a la anterior en lo que a condiciones iniciales se refiere, la muestra volvió a ser agua purificada y el refrigerante agua común a temperatura ambiente de 14°C en este caso, la diferencia radicó en que la potencia disipada como calor en el calefactor fué de 120W para este ensayo. La gráfica despreciando valores muy lejanos a la tendencia se muestra en la figura 4.4.

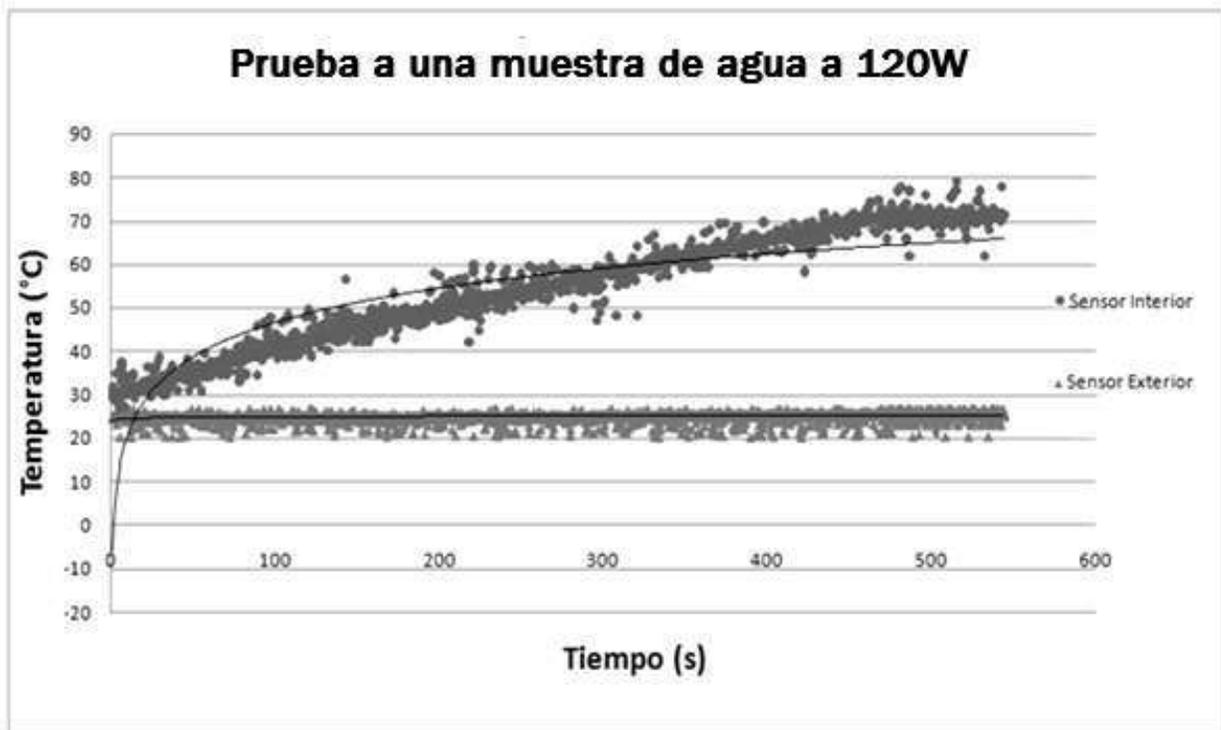


Figura 4.4 Gráfica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 120W

Esta prueba duró cerca de 500 segundos en la que se tomaron aproximadamente 4800 datos por cada sensor. En esta ocasión también hubo una gran cantidad de ruido y datos indeseables, sin embargo con las líneas de tendencia se aprecia que los datos se incrementan de manera lineal hasta llegar a un valor y estacionarse.

El estudio de interés para este caso es el estado estable el cual en esta ocasión llegó cerca de los 450 segundos para el sensor interno mientras que para el exterior la temperatura fue más o menos constante durante todo el experimento. La tabla 4.2 es un muestreo de valores obtenidos en la prueba.

Tabla 4.2 Mediciones de T1 y T2 para P=120W

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
10	29.785	24.414	1
55	30.371	24.804	5
106	30.957	24.511	10
155	31.835	25.097	15
211	32.128	24.609	20
259	32.519	24.414	25
309	33.203	25.097	30
367	33.789	24.316	35
412	34.375	24.707	40
468	34.863	25.000	45
522	35.351	24.707	50
570	36.035	24.707	55
626	36.718	24.804	60
676	37.109	25.097	65
729	38.183	22.851	70
776	38.769	24.707	75
826	38.574	24.707	80
883	39.257	25.000	85
930	39.843	24.902	90
979	40.136	24.218	95
1035	40.917	24.804	100
1083	41.210	24.707	105
1139	42.089	24.804	110
1198	42.968	24.609	116

Tabla 4.2 Mediciones de T1 y T2 para P=120W (continuación)

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
1246	43.066	24.609	121
1294	43.164	25.878	125
1342	43.847	24.707	130
1391	44.042	24.707	135
1441	44.433	26.171	140
1492	45.117	25.976	145
1550	45.605	24.804	150
1603	46.484	24.707	155
1652	46.991	24.414	160
1707	47.167	25.097	166
1754	47.460	25.000	170
1807	47.558	24.316	175
1858	48.046	24.414	180
1909	48.339	24.609	185
1961	49.023	26.562	190
2014	49.316	24.511	195
2059	49.804	24.707	200
2108	50.097	25.292	205
2161	50.781	24.707	210
2213	51.074	24.707	215
2265	51.464	24.804	220
2317	52.050	25.097	225
2367	52.343	25.195	230
2419	52.734	24.902	235
2469	53.027	25.097	240
2521	53.613	24.902	245
2574	54.003	24.902	250
2626	54.296	24.804	255
2689	54.882	25.292	261
2735	55.078	24.511	265
2778	55.468	24.804	270
2829	56.054	25.097	275
2888	56.347	22.167	280
2932	57.324	25.195	285
2992	57.714	25.097	290
3039	57.976	25.195	295
3095	58.203	25.292	300
3141	58.300	26.953	305

Tabla 4.2 Mediciones de T1 y T2 para P=120W (continuación)

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
3141	58.300	26.953	305
3191	58.886	24.902	310
3244	59.179	25.097	315
3296	59.375	24.902	320
3352	59.863	25.097	325
3395	60.156	24.609	330
3453	60.742	26.562	335
3506	61.035	25.195	340
3554	61.328	26.074	345
3604	61.816	25.292	350
3655	62.109	25.488	355
3709	62.792	21.386	360
3763	63.085	25.097	365
3809	63.476	25.292	370
3862	63.769	25.390	375
3913	64.062	22.558	380
3964	64.453	25.195	385
4012	64.941	25.195	390
4072	65.136	26.562	395
4116	65.722	25.683	400
4169	66.113	25.390	405
4224	66.796	25.097	410
4277	66.796	25.390	415
4322	67.089	21.289	420
4375	67.480	25.488	425
4430	68.066	25.390	430
4479	68.359	25.195	435
4534	68.847	25.292	440
4585	69.140	25.488	445
4637	69.433	25.390	450
4688	69.921	25.39	455
4736	70.117	25.683	460
4783	70.312	25.683	465
4839	70.605	25.683	470
4897	70.898	26.953	476
4926	71.191	25.683	480
4967	71.386	23.144	485

Tabla 4.2 Mediciones de T1 y T2 para P=120W (continuación)

No de Evento	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 1 (°C)	Tiempo (s)
5017	71.777	25.585	491
5044	70.996	25.292	495
5082	71.093	25.585	500
5117	71.386	25.390	505
5155	71.191	26.074	510
5187	71.289	25.585	515
5222	71.093	25.585	520
5255	71.386	26.855	525
5291	71.386	23.144	530
5332	71.191	25.683	535
5363	70.996	25.585	540
5393	71.386	25.585	545

En la tabla 4.2 se toma como muestra un dato cada 5 segundos aproximadamente y resulta un gran ejemplo del comportamiento de los datos durante toda la prueba, siendo constantes para el sensor interior e incrementándose hasta establecerse estable en el exterior.

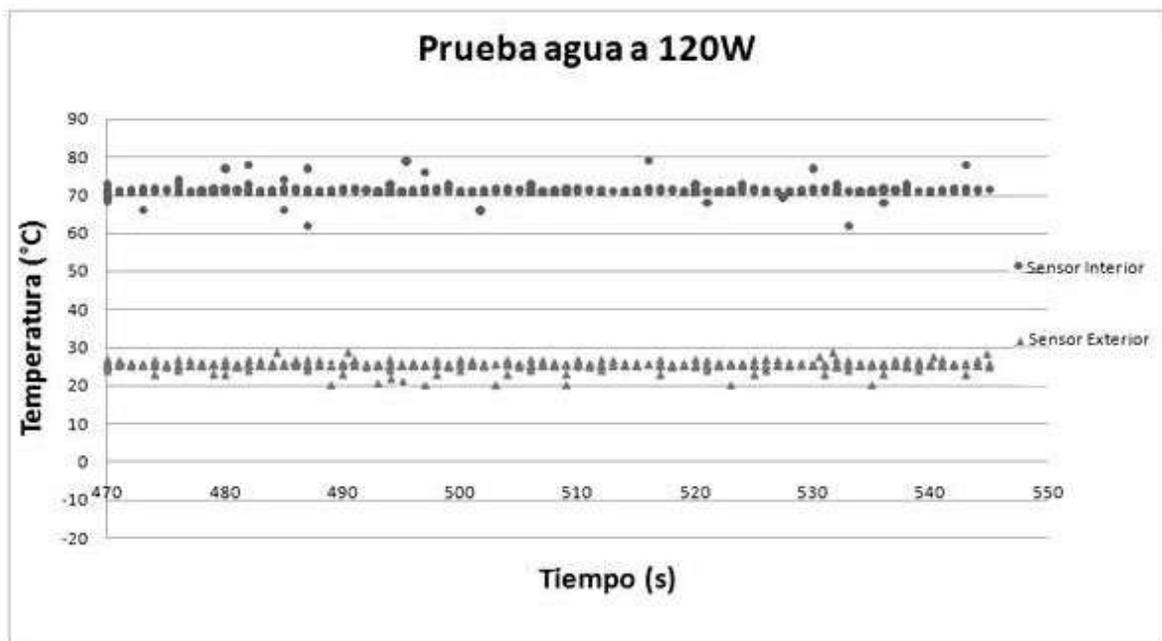


Figura 4.5 Detalle de la gráfica Temperatura vs Tiempo a una muestra de agua a 120W en estado estable

Los resultados en este experimento fueron muy similares al anterior. En la figura 4.5 se muestra un detalle de los últimos 75 segundos de la prueba, es decir, aproximadamente las 750 lecturas finales, en las que se puede observar que las temperaturas se encuentran en estado estable en ambos cilindros siendo el interior el más crítico ya que en el exterior la temperatura fue muy estable durante toda la prueba. A simple vista y sin ayuda de una línea de tendencia se puede observar que las temperaturas sin estado estable son de aproximadamente 71°C para el cilindro interior y 25 grados para el exterior.

4.2.3 Resultados comparativos

En la tabla 4.5 se recaban los datos obtenidos en las últimas dos pruebas, siendo éstas las de mayor relevancia para el experimento, que se realizaron a muestras de agua. Utilizando la ecuación (4.1) se obtiene de manera experimental la medición de la conductividad térmica.

$$\lambda = \frac{\left[\dot{Q} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]}{2\pi L(T_2 - T_1)} \quad (4.1)$$

Donde:

\dot{Q}	Flujo de calor ó potencia disipada (P) en W.
L	Longitud de los cilindros en m.
T_1	Temperatura del cilindro exterior en °C
T_2	Temperatura del cilindro interior en °C
r_1	Radio del cilindro interior en m.
r_2	Radio del cilindro exterior en m.
λ	Conductividad térmica en $\frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$

Tabla 4.3 Conductividad Térmica obtenida de la experimentación a una muestra de agua

No de Prueba	Potencia (watts)	Temperatura promedio (°C)	ΔT (°C)	Conductividad Térmica $\frac{watt}{m \cdot ^\circ C}$	Bibliografía Conductividad Térmica $\frac{watt}{m \cdot ^\circ C}$
3	80	40.5	38	0.5329	0.633
4	120	49.5	44	0.6463	0.645

4.3 PRUEBAS ELÉCTRICAS DEL MEDIDOR.

La validación tanto del modelo mecánico como electrónico para este proyecto siempre estuvieron de la mano, es decir, si el sistema de medición no sirviera no se podría corroborar que el modelo mecánico estaría actuando como debiera y viceversa.

Las pruebas realizadas al medidor para poder hacer la ratificación del sistema mecánico resultaron ser también las primeras pruebas eléctricas. Fue necesario integrar el desarrollo electrónico para hacer cualquier tipo de medición, en este primer prototipo los datos se enviaban a una computadora para su posterior análisis. Una vez que se validó mecánicamente se pudo concluir que el diseño electrónico también funcionaba correctamente sin embargo no en óptimas condiciones debido a la gran cantidad de ruido y señales parásitas que fueron tanto captadas por los sensores y otros elementos del sistema como cables o componentes eléctricos así como perturbaciones en el procesamiento digital de los datos pudiendo así introducir datos falsos en el sistema.

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran las gráficas de las primeras lecturas tomadas por el aparato en las cuales se muestra de buena manera la tendencia de las mediciones pero a su vez con una gran cantidad de datos indeseables catalogados como ruido en ambos sensores muy alejados de lo esperado.

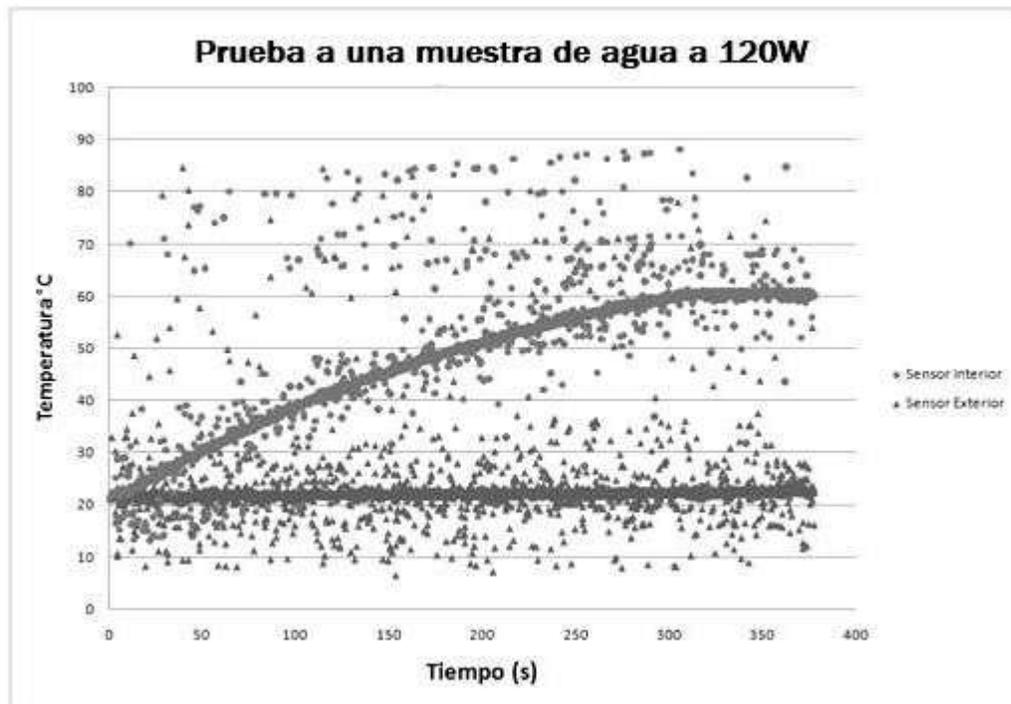


Figura 4.6 Primera medición de temperatura a 80W

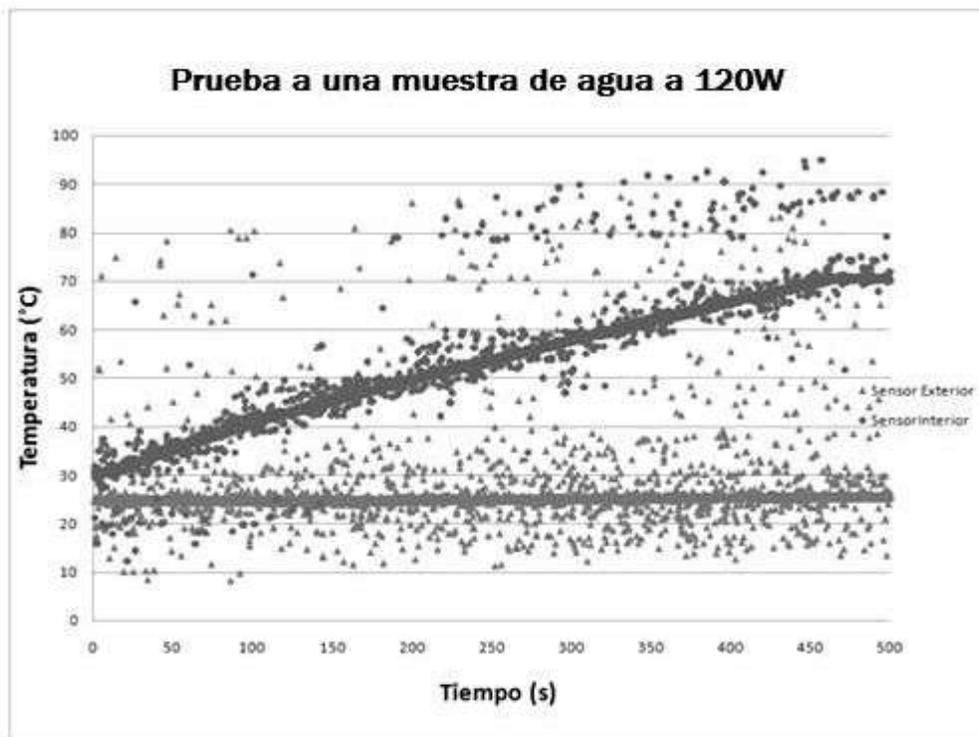


Figura 4.7 Primera medición de temperatura a 120W

Si bien estos datos sirvieron para saber la tendencia de las temperaturas y ayudaron a conocer el comportamiento de los sistemas mecánicos y eléctricos, no fueron pruebas fehacientes para la validación de ambos.

Con esto como nuevo punto de partida se buscó la forma de rediseñar o modificar el prototipo electrónico con el fin de obtener resultados más precisos teniendo como objetivo eliminar el ruido y las señales parásitas e indeseables en el sistema.

Se tomaron varias determinaciones entre ellas que el circuito estaba alimentado por una fuente conmutada, asimismo la etapa de potencia se controlaba con un PWM a 4KHz siendo estos dos potenciales fuentes de ruido de alta frecuencia. Por ello se optó por cambiar la alimentación a una lineal y de aislar físicamente la etapa de potencia colocándola en otra tableta. Otra medida, debido a que el calefactor tiene una cubierta mecánica y hacía contacto directo con los cilindros, fue aislar eléctricamente la resistencia aplicándole en la superficie grasa de silicón, elemento que además de proporcionar resistencia eléctrica también es un gran conductor térmico.

Sabiendo que cualquier cable o alambre puede ser antena para ruidos de alta frecuencia se optó por cambiar los cables de conexión de ambos sensores a unos blindados como los usados en aplicaciones de audio. Por último dentro de estas modificaciones se montó la placa principal o placa madre en una baquelita y se soldó para evitar posibles señales así como resistencias y capacitancias parásitas provocadas por la tableta universal utilizada anteriormente.

Con estas modificaciones se logró un gran cambio, las siguientes pruebas mostraron una disminución muy grande del ruido. Los resultados obtenidos son los mostrados en las gráficas 4.2 y 4.4 que fueron utilizadas ahora sí para la validación del modelo mecánico y con las cuales se tuvieron conclusiones más verídicas, dando con ellas por concluido este primer desarrollo.

Hecho esto se trató de mejorar los resultados con respecto a eliminar el mayor número de datos indeseables, conociendo los resultados esperados y despreciando valores por debajo de la media en el caso del cilindro exterior y recurriendo a técnicas estadísticas como la tendencia y los promedios móviles por medio de software se lograron los resultados mostrados en las graficas 4.8.

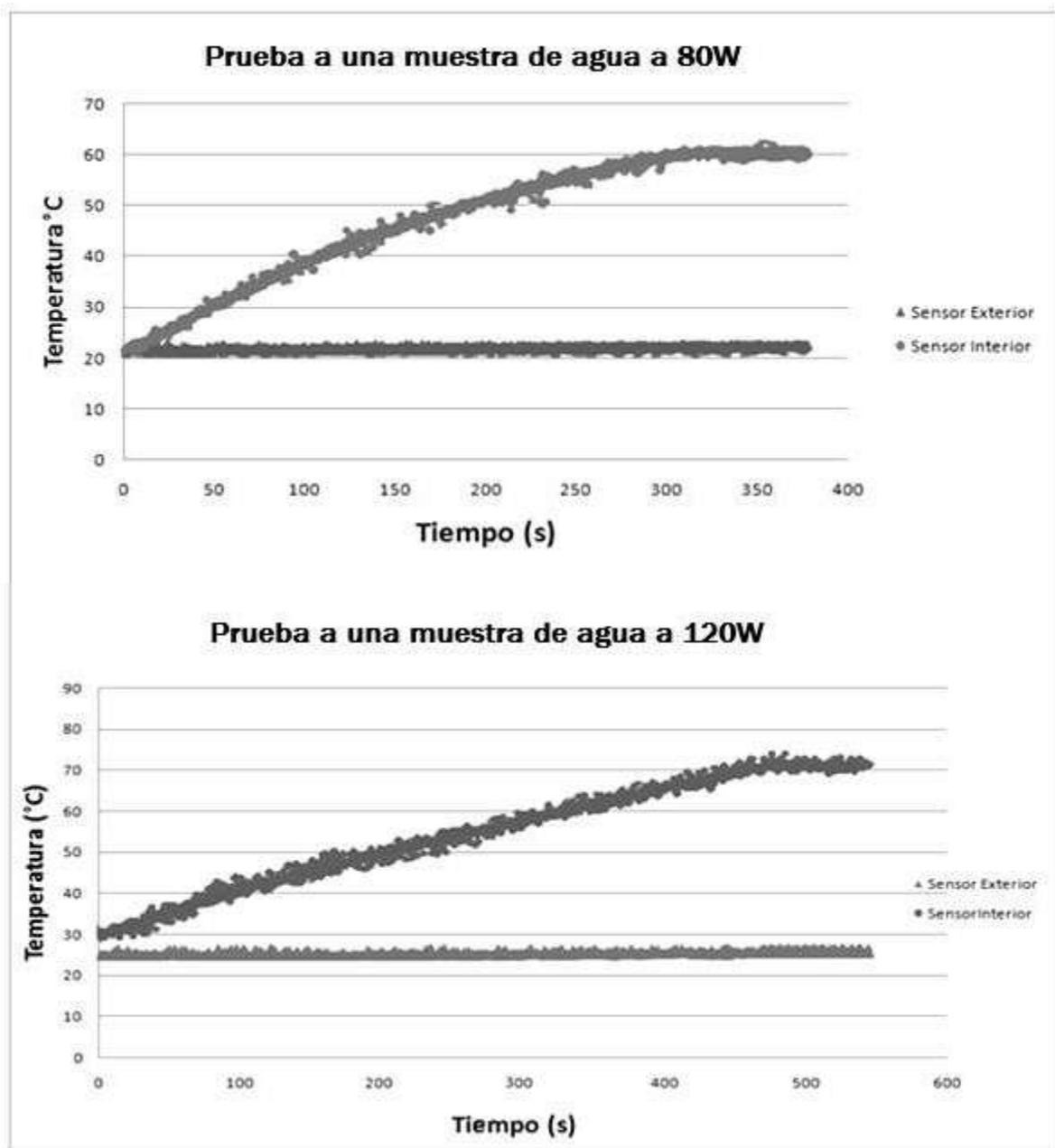


Figura 4.8 Gráficas Temperatura contra tiempo a muestras de agua a 80 y 120 watts después de filtrar los datos por software

4.3.1 Conceptos de precisión y exactitud

Estos dos conceptos van muy ligados entre sí y sobre todo relacionados siempre con instrumentos de medición. La definición de exactitud es: la capacidad de un instrumento de medir un valor cercano al valor de la magnitud real, esto se refiere al grado de concordancia entre lo que marca el medidor y el valor según un estándar, la forma en que cuantificamos la exactitud de un resultado se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero por medio de la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{Valor_{verdadero} - Valor_{medido}}{Valor_{verdadero}} * 100 \quad (4.2)$$

El resultado es absoluto, adimensional, se expresa en porcentaje y existe un valor por cada medición realizada. Mientras tanto la precisión se define como: la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones, esto se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad de los datos es la desviación estándar de las mediciones mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (4.3)$$

Donde:

σ	Desviación estándar
X_i	Dato actual
\bar{X}	Madia de los datos
N	Número total de datos

La precisión se puede estimar como una función de ella.

4.3.2 Precisión y exactitud del medidor

El instrumento aquí desarrollado más allá de medir determina un coeficiente de conductividad térmica (λ), es decir, la medición es indirecta puesto que las lecturas directas son de temperatura y lo demás son cálculos algebraicos. Por ende para validar el modelo se optó primero por calcular precisión y exactitud directamente a los sensores de temperatura y posteriormente a los resultados de dicho cálculo

La tabla 4.4 expone las pruebas realizadas a los sensores para determinar su exactitud por medio del porcentaje de error en cada uno para distintas mediciones. Las pruebas fueron hechas para 6 muestras a temperaturas constantes en lugares distintos, es decir son temperaturas ambientes a la sombra, al sol, a diferentes horas del día etc.

Tabla 4.4 Exactitud de los sensores 1 y 2

No de evento	Termómetro calibrado (°C)	Sensor 1 (°C)	Sensor 2 (°C)	%E Sensor 1	%E Sensor 2
1	21.52	21.53	21.51	0.05	0.04
2	26.36	26.35	26.39	0.03	0.11
3	8.09	8.11	8.11	0.24	0.22
4	19.16	19.10	19.16	0.31	0
5	30.5	30.48	30.48	0.065	0.065
6	12.89	12.89	12.88	0	0.07

Dados estos resultados se comprobó que ambos sensores tenían un grado muy alto de exactitud. Para medir la precisión se pensó en un lugar a temperatura constante donde pudieran tomar varias lecturas esperando que fueran iguales entre sí. Las pruebas se hicieron colocando los sensores en el interior de un refrigerador con termostato electrónico mostrando los resultados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Precisión de los sensores 1 y 2

Numero de evento	Sensor 1 (°C)	Sensor 2 (°C)
1	4.04	4.04
2	4.01	4.00
3	3.97	3.97
4	4.03	4.02
Media	4.0125	4.0075
Desviación estándar	0.03095696	0.02986079

Se observó que ambos sensores de temperatura son tanto exactos como precisos puesto que cumplen de manera excelente los requerimientos de muy bajo porcentaje de error y desviación estándar.

Por último se repitieron en dos ocasiones más las pruebas del equipo integrado a una muestra de agua aplicándole una potencia de 120W debido a que fue esta prueba la que validó el prototipo mecánico. Los resultados se muestran en la tabla 4.5 dando por terminadas las pruebas al equipo.

Tabla 4.6 Repetición de pruebas al equipo integrado

No de prueba	Potencia (watts)	Bibliografía Conductividad Térmica $\frac{watt}{m \cdot ^\circ C}$	Conductividad Térmica $\frac{watt}{m \cdot ^\circ C}$	% Error
1	120	0.645	0.6463	0.201
2	120	0.645	0.6395	0.852
3	120	0.645	0.6428	0.341

Puede ser un héroe lo mismo el que triunfa que el que sucumbe, pero jamás el que abandona el combate.

Thomas Carlyle

CAPÍTULO 5 “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

5.1 CONCLUSIONES

Con los resultados sustraídos de la tesis “Desarrollo de un método experimental para la determinación de la conductividad térmica en líquidos y gases” con la que obtuvo el grado de Ingeniero mecánico Carlos Perea Díaz de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH en febrero del 2009, en los que se basó este prototipo electrónico y con las pruebas obtenidas en el capítulo anterior, se puede concluir que el trabajo fue satisfactorio, ya que cumple gratamente con los objetivos iniciales de la tesis.

Se diseñó y construyó un dispositivo electrónico de medición capaz de determinar la conductividad térmica en líquidos y gases. Dicho aparato satisface la necesidad de tener un instrumento de laboratorio, el cual requería tener ciertas características como son: movilidad, funcionalidad, sencillez y autonomía, que también fueron satisfechas en el desarrollo del prototipo.

Este desarrollo tuvo un diseño aparentemente sencillo, sin embargo debido a que se trató en sí de un medidor, existió cierta problemática recurrente a la hora de la implementación, como errores de medición, lectura de datos falsos, alta susceptibilidad a ruidos en el sistema, estabilidad de los datos y, principalmente en dos características muy importantes de los medidores: precisión y exactitud. La primera fue difícil de conseguir debido a ruidos de alta frecuencia generados en el conmutador de la salida de potencia, obligando a aislar de diversas formas esta etapa de las demás, pero fue la exactitud la más difícil de conocer ya que la conductividad térmica es un parámetro que se obtiene indirectamente y como no se contaba con otro medidor los resultados medidos fueron

comparados únicamente con valores de tablas de sustancias conocidas y estudiadas. Añadiéndole a esta problemática el hecho de que gran parte del instrumento se trata de dispositivos mecánicos que también son muy susceptibles a fallas, teniendo como caso particular las fugas de líquidos, tanto del agua utilizada como refrigerante así como del líquido a medir llegando a mezclarse éstos entre sí e incluso llegando a inundar los receptáculos de los sensores así como el del calefactor.

Otro aspecto que se puede concluir en este trabajo es la opción de utilizar otro microcontrolador para realizar las rutinas programadas en vez del 16F877A que se utilizó, buscando mejoras en cuestión de espacio sobretodo, sin embargo esto no se hizo ya que para las características requeridas resultó un tamaño adecuado además de que al ser un circuito muy popular tiene un costo muy bajo en relación con otros incluso más pequeños o con características inferiores a este.

El trabajo aquí presentado resultó ser una gran oportunidad para poner en práctica muchas herramientas teóricas y conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera desde ciencias básicas hasta ingeniería aplicada, lo cual también es uno de los objetivos de realizar una tesis.

Uno de los temas más relevantes a lo largo del presente trabajo ha sido la labor conjunta entre los alumnos y sus asesores de las Facultades de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Mecánica de la UMSNH. Esta forma de trabajar resulta un tanto complicada y laboriosa debido a que no todo depende de uno, hay que habituarse a avanzar a ritmos diferentes a lo acostumbrado y no siempre resulta fácil ponerse de acuerdo con otro grupo de personas, sin embargo las experiencias positivas sobrepasan de las negativas. Como principal ventaja se puede mencionar que al trabajar colectivamente se pueden abarcar temas distintos y mucho más amplios a lo acostumbrado o a lo que es la carrera en sí, lo cual abre un mundo de posibilidades. Otra ventaja es que el total de lo que se realiza se divide entre el número de personas que participan en el proyecto lo cual resulta de gran apoyo, ya que una persona no puede dominar todos los temas, mencionando por último que al laborar de esta manera se llegan a conocer otras instalaciones, edificios o laboratorios de la misma

universidad, otras personas ya sean alumnos o profesores y se amplían los lazos y horizontes tanto laborales como educativos.

Como punto de vista del autor y de las personas que han colaborado en esta tesis, se propone que la UMSNH propicie e impulse los desarrollos interdisciplinarios entre sus dependencias, tanto escuelas y facultades como institutos. Esto puede abrir un mundo de posibilidades en la investigación para profesores investigadores, así como para sus alumnos tesistas, pudiendo enriquecer en gran medida sus proyectos obteniendo resultados con mucho mayor aporte científico y tecnológico. Asimismo y como un plus, al realizar trabajos conjuntos se pueden romper algunos viejos estigmas como son las falsas (y en ocasiones reales) rivalidades entre alumnos y de ciertas escuelas dentro de la misma universidad.

5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Debido a que se trata de un instrumento que será parte de un laboratorio y que tendrá un uso constante se recomienda que sea utilizado con el cuidado que éste amerita: darle mantenimiento preventivo periódico, limpiar bien sus partes mecánicas especialmente los cilindros después de usarlo para evitar que se mezclen sustancias y secarlo para evitar la corrosión de los materiales.

Debido a que el equipo maneja líquidos y gases, merece un especial cuidado el detectar y corregir fugas de cualquier tipo de material. Por último tomando en cuenta que el calefactor disipa 200W de potencia, se recomienda apagarlo después de su uso para alargar su vida útil.

Como trabajos futuros considerando la parte mecánica, se recomienda mejorar las tapas adicionándoles un sistema para que cierren herméticamente sin necesidad de embonarlas con algún pegamento ya que las actuales tienen que adherirse con silicón y resultan muy difíciles de destapar para limpiarse, igualmente los coples por donde se inserta la muestra a medir deben tener un sistema roscado para poder retirarse y limpiarse

correctamente, además de que el prototipo debe montarse en un módulo especial para el laboratorio.

En cuanto a la parte electrónica se deberá implementar un sistema de protección, especialmente un apagado automático después de cierto tiempo para evitar que la resistencia se sobrecaliente, además es deseable lograr estabilizarlo en un tiempo menor.

APÉNDICE “Hojas de datos”



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory, Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM), Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

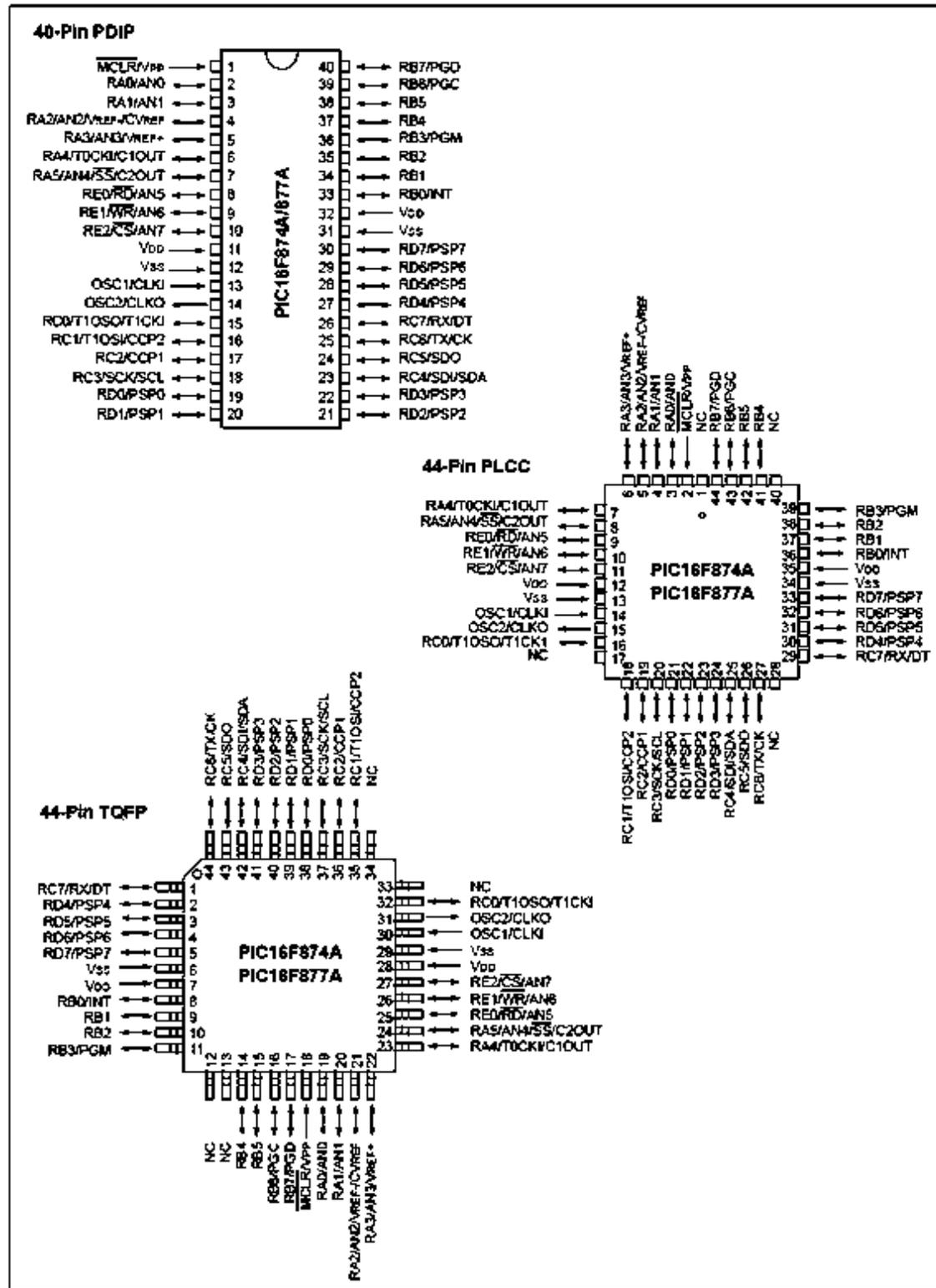
CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

PIC16F87XA

Pin Diagrams (Continued)



PIC16F87XA

17.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Absolute Maximum Ratings †

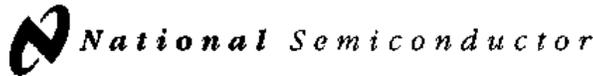
Ambient temperature under bias.....	-55 to +125°C
Storage temperature.....	-65°C to +150°C
Voltage on any pin with respect to V _{SS} (except V _{DD} , $\overline{\text{MCLR}}$, and RA4).....	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)
Voltage on V _{DD} with respect to V _{SS}	-0.3 to +7.5V
Voltage on $\overline{\text{MCLR}}$ with respect to V _{SS} (Note 2).....	0 to +14V
Voltage on RA4 with respect to V _{SS}	0 to +8.5V
Total power dissipation (Note 1).....	1.0W
Maximum current out of V _{SS} pin.....	300 mA
Maximum current into V _{DD} pin.....	250 mA
Input clamp current, I _{IK} (V _I < 0 or V _I > V _{DD}).....	± 20 mA
Output clamp current, I _{OK} (V _O < 0 or V _O > V _{DD}).....	± 20 mA
Maximum output current sunk by any I/O pin.....	25 mA
Maximum output current sourced by any I/O pin.....	25 mA
Maximum current sunk by PORTA, PORTB and PORTE (combined) (Note 3).....	200 mA
Maximum current sourced by PORTA, PORTB and PORTE (combined) (Note 3).....	200 mA
Maximum current sunk by PORTC and PORTD (combined) (Note 3).....	200 mA
Maximum current sourced by PORTC and PORTD (combined) (Note 3).....	200 mA

Note 1: Power dissipation is calculated as follows: $P_{dis} = V_{DD} \times \{I_{DD} - \sum I_{OH}\} + \sum \{(V_{DD} - V_{OH}) \times I_{OH}\} + \sum \{V_{OL} \times I_{OL}\}$

2: Voltage spikes below V_{SS} at the $\overline{\text{MCLR}}$ pin, inducing currents greater than 80 mA, may cause latch-up. Thus, a series resistor of 50-100Ω should be used when applying a "low" level to the $\overline{\text{MCLR}}$ pin rather than pulling this pin directly to V_{SS}.

3: PORTD and PORTE are not implemented on PIC16F873A/876A devices.

† NOTICE: Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operation listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.



December 1994

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is

available packaged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-202 package.

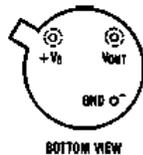
Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55° to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D
Precision Centigrade Temperature Sensors

Connection Diagrams

**TO-46
Metal Can Package***

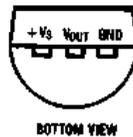


TL/H/5516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH,
LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

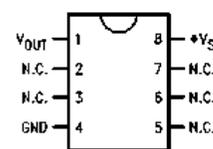
**TO-92
Plastic Package**



TL/H/5516-2

Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

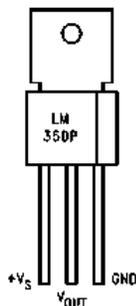
**SO-8
Small Outline Molded Package**



TL/H/5516-21

Top View
N.C. = No Connection
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

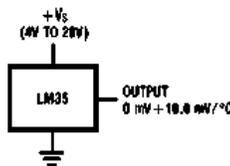
**TO-202
Plastic Package**



TL/H/5516-24

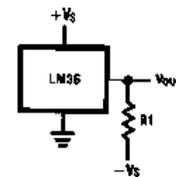
Order Number LM35DP
See NS Package Number P03A

Typical Applications



TL/H/5516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade
Temperature
Sensor (+2°C to +150°C)



TL/H/5516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$

$V_{OUT} = +1.500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade
Temperature Sensor

THE STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation.

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp., TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-202 Package,	-65°C to +150°C

Lead Temp.:

TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds)	300°C
TO-92 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
TO-202 Package, (Soldering, 10 seconds)	+230°C

SO Package (Note 12):

Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V

Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)

LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	±0.2	±0.5		±0.2	±0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	±0.3			±0.3		±1.0	°C
	$T_A = T_{MAX}$	±0.4	±1.0		±0.4	±1.0		°C
	$T_A = T_{MIN}$	±0.4	±1.0		±0.4		±1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±0.18		±0.35	±0.15		±0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	±0.4	±1.0		±0.4	±1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±0.5		±3.0	±0.5		±3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	±0.01	±0.05		±0.01	±0.05		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	±0.02		±0.1	±0.02		±0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		µA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	µA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		µA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	µA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		µA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	µA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	µA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	±0.08			±0.08			°C

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: -55°C ≤ T_J ≤ +150°C for the LM35 and LM35A; -40°C ≤ T_J ≤ +110°C for the LM35C and LM35CA; and 0°C ≤ T_J ≤ +100°C for the LM35D. $V_S = +5Vdc$ and $I_{LOAD} = 50 \mu A$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from +2°C to T_{MAX} in the circuit of Figure 7. Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W, junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-202 package is 85°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6) (Continued)								
Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+ 10.0$	$+ 9.8,$ $+ 10.2$		$+ 10.0$		$+ 9.8,$ $+ 10.2$	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0		± 0.4	± 2.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5.0	± 0.5		± 5.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		$+ 0.39$		$+ 0.7$	$+ 0.39$		$+ 0.7$	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	$+ 1.5$		$+ 2.0$	$+ 1.5$		$+ 2.0$	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

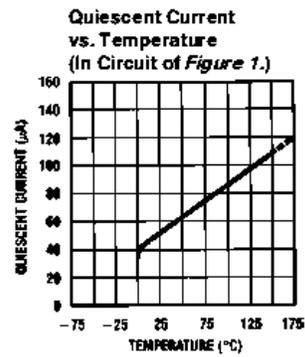
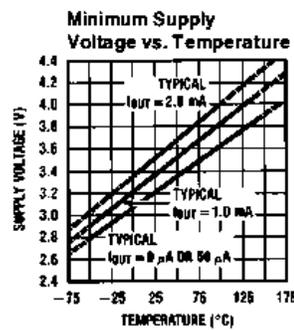
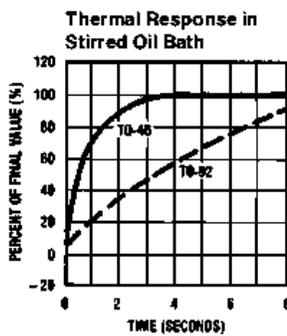
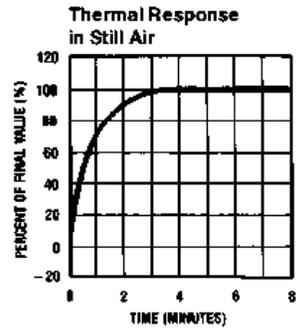
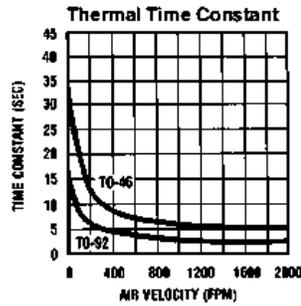
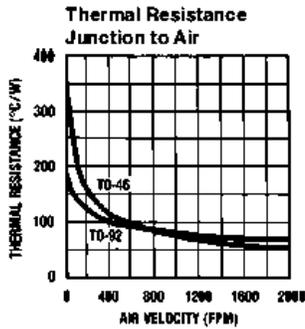
Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of *Figure 1*.

Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

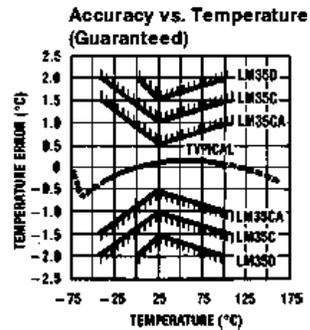
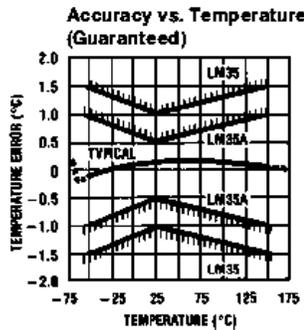
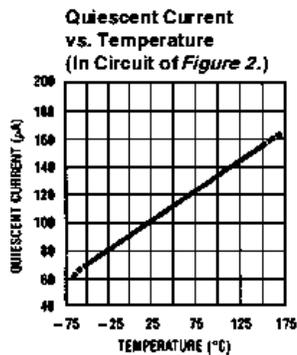
Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

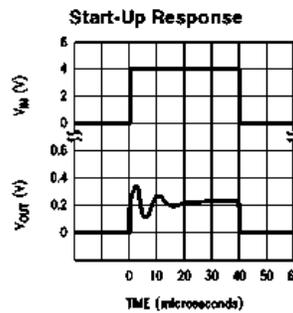
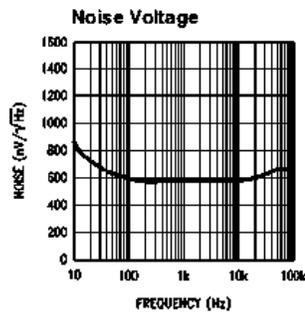
Typical Performance Characteristics



TL/H/5516-17



TL/H/5516-18



TL/H/5516-22

NPN Triple Diffused Planar Silicon Transistor



2SD2580

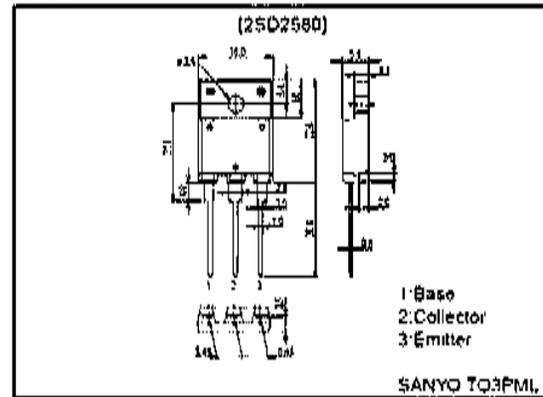
**Color TV Horizontal Deflection
Output Applications**

Features

- High speed.
- High breakdown voltage ($V_{CB0}=1500V$).
- High reliability (Adoption of HVP process).
- Adoption of MBIT process.
- On-clip damper diode.

Package Dimensions

unit:mm
2039D



Specifications

Absolute Maximum Ratings at $T_a = 25^{\circ}C$

Parameter	Symbol	Conditions	Rating	Unit
Collector-to-Base Voltage	V_{CB0}		1500	V
Collector-to-Emitter Voltage	V_{CE0}		800	V
Emitter-to-Base Voltage	V_{EB0}		6	V
Collector Current	I_C		10	A
Collector Current (pulse)	I_{CP}		30	A
Collector Dissipation	P_C		3.0	W
		$T_a=25^{\circ}C$	70	W
Junction Temperature	T_j		150	$^{\circ}C$
Storage Temperature	T_{stg}		+55 to +150	$^{\circ}C$

Electrical Characteristics at $T_a = 25^{\circ}C$

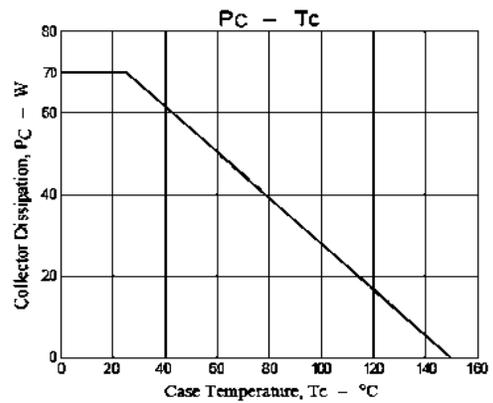
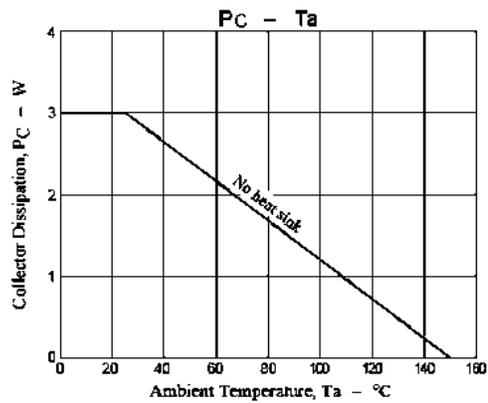
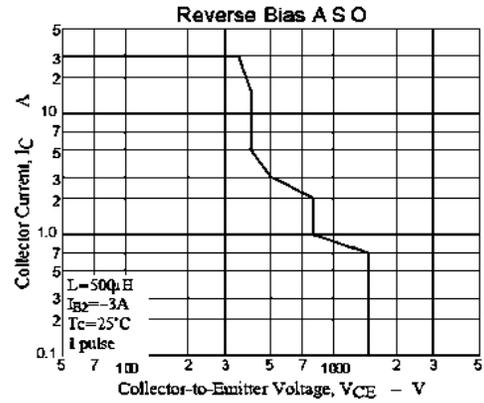
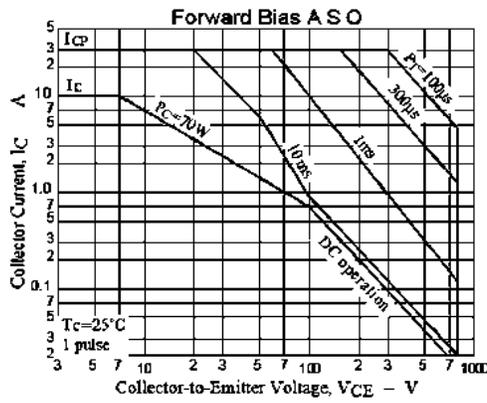
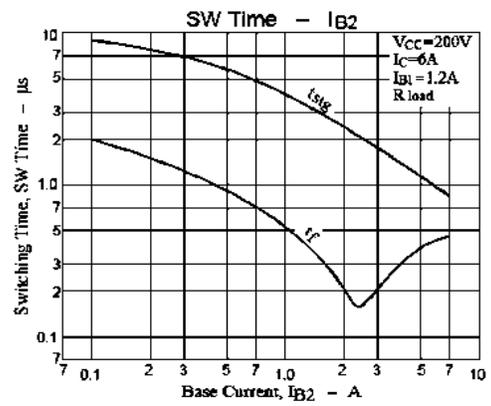
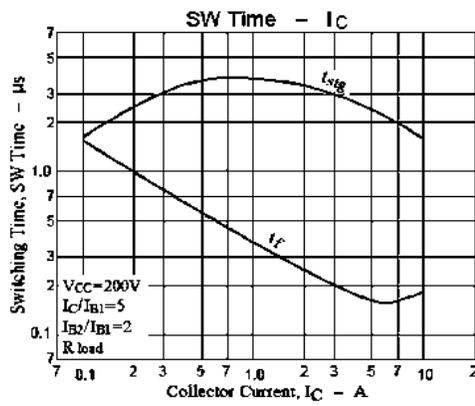
Parameter	Symbol	Conditions	Rating			Unit
			min	typ	max	
Collector Cutoff Current	I_{CBO}	$V_{CB}=200V, I_E=0$			10	μA
Collector Cutoff Current	I_{CES}	$V_{CE}=1500V, R_{BE}=0$			1.0	mA
Collector Sustain Voltage	$V_{CE0}(AV)$	$I_C=100mA, I_B=0$	800			V
Emitter Cutoff Current	I_{EBO}	$V_{EB}=4V, I_C=0$	40		130	mA

Continued on next page

■ Any and all SANYO products described or contained herein do not have specifications that can handle applications that require extremely high levels of reliability, such as life-support systems, aircraft's control systems, or other applications whose failure can be reasonably expected to result in serious physical and/or material damage. Consult with your SANYO representative nearest you before using any SANYO products described or contained herein in such applications.

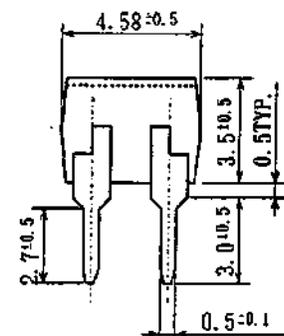
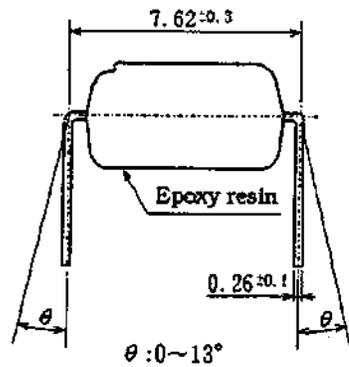
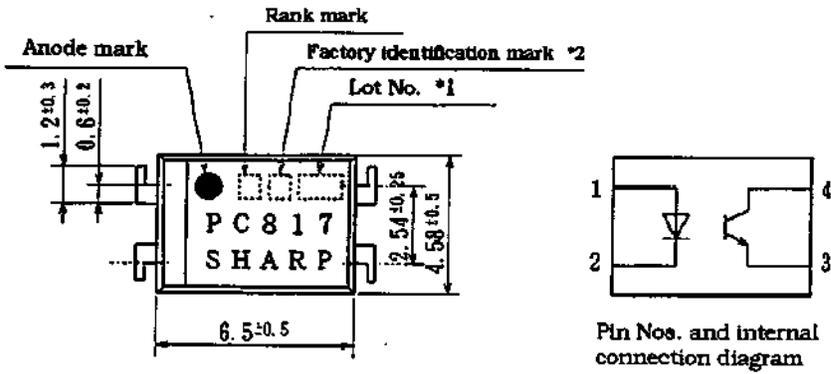
■ SANYO assumes no responsibility for equipment failures that result from using products at values that exceed, even momentarily, rated values (such as maximum ratings, operating condition ranges, or other parameters) listed in products specifications of any and all SANYO products described or contained herein.

2SD2580



SHARP CORPORATION

ED-94054D	June 14, 1996
MODEL No. PC817X	PAGE 5/8



- *1) 2-digit number shall be marked according to DIN standard.
- *2) Factory identification mark shall be or shall not be marked.
- *3) Marking is laser marking

UNIT : 1/1 mm	
Name	PC817 Outline Dimensions (Business dealing name : PC817X)
Drawing No.	CY6961K02

SHARP CORPORATION

ED-94054D	June 14, 1996
MODEL No. PC817X	PAGE 3/8

3. Ratings and characteristics

3.1 Absolute maximum ratings

Ta=25°C

	Parameter	Symbol	Rating	Unit
Input	*1 Forward current	I_F	50	mA
	*2 Peak forward current	I_{FM}	1	A
	Reverse voltage	V_R	6	V
	*1 Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V_{CEO}	35	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector current	I_C	50	mA
	*1 Collector power dissipation	P_C	150	mW
	*1 Total power dissipation	P_{tot}	200	mW
	*3 Isolation voltage	V_{iso}	5	kVrms
	Operating temperature	T_{opr}	-30 to +100	°C
	Storage temperature	T_{stg}	-55 to +125	°C
	*4 Soldering temperature	T_{sol}	260	°C

*1 The derating factors of absolute maximum ratings due to ambient temperature are shown in Fig. 1 to 4.

*2 Pulse width $\leq 100 \mu s$, Duty ratio : 0.001 (Refer to Fig. 5)

*3 AC for 1 min, 40 to 60%RH

*4 For 10 s

SHARP CORPORATION

ED-94054D

June 14, 1996

MODEL No.

PC817X

PAGE

4/8

3.2 Electro-optical characteristics

Ta=25°C

Parameter		Symbol	Condition	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Input	Forward voltage	V_F	$I_F=20\text{mA}$	-	1.2	1.4	V
	Peak forward voltage	V_{FM}	$I_{FM}=0.5\text{A}$	-	-	3.0	V
	Reverse current	I_R	$V_R=4\text{V}$	-	-	10	μA
	Terminal capacitance	C_t	$V=0, f=1\text{kHz}$	-	30	250	pF
Output	Dark current	I_{CEO}	$V_{CE}=20\text{V}, I_F=0$	-	-	100	nA
	Collector-emitter breakdown voltage	BV_{CEO}	$I_C=0.1\text{mA}$ $I_F=0$	35	-	-	V
	Emitter-collector breakdown voltage	BV_{ECO}	$I_E=10\mu\text{A}, I_F=0$	6	-	-	V
Transfer characteristics	Collector current	I_C	$I_F=5\text{mA}, V_{CE}=5\text{V}$	2.5	-	30	mA
	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_F=20\text{mA}$ $I_C=1\text{mA}$	-	0.1	0.2	V
	isolation resistance	R_{ISO}	DC500V 40 to 60%RH	5×10^{10}	10^{11}	-	Ω
	Floating capacitance	C_f	$V=0, f=1\text{MHz}$	-	0.6	1.0	pF
	Cut-off frequency	f_c	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$ $R_L=100\Omega, -3\text{dB}$	-	80	-	kHz
	Rise time	t_r	$V_{CE}=2\text{V}$ $I_C=2\text{mA}$	-	4	18	μs
	Fall time	t_f	$R_L=100\Omega$	-	3	18	μs

BIBLIOGRAFÍA

[RESNIK 2002]

R. RESNIK, D. HALLIDAY, K. KRANE, Física volumen 1, México: Ed CECSA, 5ª edición 2002.

[BOYLESTAD 2003]

R. BOYLESTAD, L. NASHESKY, ELECTRÓNICA: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, México: Ed. PRENTICE HALL, 8ª edición 2003.

[COUGHLIN 1999]

R. F. COUGHLIN, F. F. DISCOLL, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Ed. PEARSON, 5ª edición 1999.

[RICHARDS 2000]

D. RICHARDS, K. WARK, Termodinámica, España: Ed. MCGRAW-HILL 1ª edición 2000.

[KARLEKAR 1985]

B. V. KARLEKAR, M. DESMOND, Transferencia de Calor, México: Ed. Interamericana, 2ª edición 1985.

[JAKOB 1964]

M. JAKOB, HEAT TRANSFER, Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc, 9ª Edición 1964.

[PEREA 2009]

C. PEREA, Tesis: “Desarrollo de un método experimental para la determinación de la conductividad térmica en líquidos y gases”, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH, México 2009.

[URQUIZA 1996]

B. URQUIZA, Tesis: “Determinación de las propiedades térmicas en sólidos, utilizando el método de calor puntual”, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH, México 1996.

[ESPINOSA y MASINI 2000]

S. ESPINOSA, G. MASINI, Notas: “Fundamentos de Transferencia de Calor”, Mayo de 2000.

[WIKIPEDIA 2008-2009]

WIKIPEDIA. Wikipedia, la enciclopedia libre. Estados Unidos, de Septiembre de 2008 a febrero de 2009. <http://es.wikipedia.org/>