

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE
TERMOCONDUCTIVIDAD PARA SUELO Y ROCAS SUAVES
USANDO UN MICROCONTROLADOR PIC

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL

DIBSON ARMANDO LLERENA CAMACHO

MARIO PATRICIO ERAZO MONTAÑO

DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES

Quito, Agosto 2002

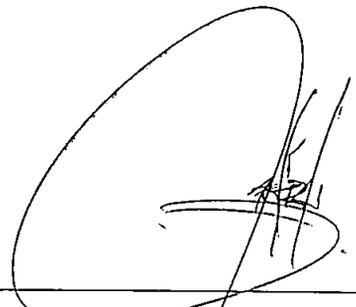
DECLARACIÓN

Nosotros, **Dibson Armando Llerena Camacho** y **Mario Patricio Erazo Montaña** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedemos nuestros derechos de Propiedad Intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



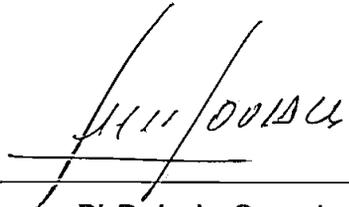
Dibson Armando Llerena Camacho



Mario Patricio Erazo Montaña

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Dibson Armando Llerena Camacho** y **Mario Patricio Erazo Montaña**, bajo mi supervisión.



PhD. Luis Corrales

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a toda mi familia, al Dr. Luis Corrales por su acertada dirección y a todos y cada uno de mis amigos que de una u otra manera me ayudaron a culminar el presente proyecto.

Dibson Armando Llerena Camacho

A Dios que en su silencio ilumina la esperanza, a mis padres por su apoyo desinteresado y paciencia, a Pamela por su amor, a Dibson por su tolerancia, al Dr. Corrales por su tiempo y todos aquellos que en la diversidad desprendieron su amistad.

Mario Patricio Erazo Montaña

DEDICATORIA

Al Dios de la vida,
su amor y presencia permanentes
son el sostén de mi existencia.

A mis Padres,
por su amor, paciencia y sacrificio
entregados en la formación de sus
hijos.

A mis hermanos, Caty y David,
y a una persona muy especial,
el amor de mi vida, María
Augusta.

Dibson Armando Llerena Camacho

..... NUNCA SERÁ

La tarde descansa sobre las montañas,
y su eterna capa cubre el pesado sueño.

Delante de mí, estoy,
y veo el sol
quien se oculta lánguido,
sosteniendo con dificultad su cuerpo,
ante la fría piedra
cuya vida da existencia a las murallas,
y sus cabellos extinguiéndose al unísono
del soplo crepuscular,
para ahogarse irremediablemente en
las grietas mudas que canta la soledad.

Soy la sombra de mis sueños,
quien se confunde en la mas oscura
de las pesadillas,
camino en el límite de la conciencia
y la cordura,
para hacerme dueño del silencio
de aquellos hijos de Ícaro
cuyo vuelo levanta enemiga amistad,
porque en el sol existe la llama
del amanecer,
y será así su despertar.

Porque nunca será noche y
siempre será el fantasma
de la realidad.

CONTENIDO

CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

1. Aspectos generales	3
1.1 Modos de transferencia de calor	5
1.1.1 Conducción	5
1.1.2 Convección (Transmisión)	7
1.1.3 Radiación	8
1.2 Descripción del modo de transferencia de calor como aspecto esencial para la determinación de la termoconductividad	11
1.2.1 La conducción en la termoconductividad.....	11
1.2.2 Conducción en estado estable del flujo de calor.....	12
1.2.2.1 Conducción de calor unidimensional de estado estable con generación interna.....	13
1.2.3 Conducción de calor en estado inestable.....	13
1.2.3.1 Flujo de calor transitorio en sistemas con resistencia interna despreciable.....	13
1.3 Conductividad Térmica.....	20
1.3.1 Ley fundamental de la Conductividad Térmica.....	20
1.3.2 Coeficiente de Conductividad Térmica.....	23
1.4 Formulación matemática de la ecuación de termoconductividad para suelos y rocas suave.....	24
1.5 Métodos aplicados para solucionar los problemas de Conductividad Térmica.....	33
1.5.1 Solución Analítica.....	33
1.5.2 Solución Numérica (Métodos Numéricos).....	35

CAPÍTULO II : DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

2.1	Introducción.....	44
2.2	Construcción del sensor.....	45
2.3	Fuente de corriente.....	48
2.4	Diseño de la etapa de amplificación para el sensor de temperatura (Termocupla Tipo T)	50
2.4.1	Etapa de amplificación.....	51
2.5	Etapa de ajuste.....	53
2.5.1	Diseño de la etapa de ajuste	53
2.6	Etapa de protección.....	56
2.7	Diseño del sistema para determinar la termoconductividad.....	62
2.7.1	El PIC 16F870.....	62
2.7.2	Descripción del hardware para el microcontrolador.....	64
2.8	Diseño de la fuentes de voltaje	75

CAPÍTULO III : DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CÁLCULO

3.1	Introducción	70
3.2	Programación del microcontrolador	70
3.3	Diagramas de flujo del programa principal subrutinas	72
3.3.1	Subrutinas de manejo de LCD	83
3.3.1.1	Subrutina UP_LCD	83
3.3.1.2	Subrutina LCD_ INI	84
3.3.1.3	Subrutina LCD_ REG	85
3.3.1.4	Súbrutina LCD_ DATO.	86
3.3.1.5	Subrutina LCD_ BUSY.....	86
3.3.1.6	Subrutina LCD_ E	88
3.3.1.7	Subrutina LCD_ CLEAR	89
3.3.2	Subrutina de conversión A/D (con_a_d)	90
3.3.3	Subrutina Mensaje	92
3.3.4	Subrutina Tiempo	94
3.3.5	Subrutina Lectura.....	95

3.3.6 Subrutina resta	96
3.3.7 Subrutina Clear	100
3.3.8 Subrutina INT_EX0	101
3.3.9 Subrutina Multipl.....	103
3.3.10 Subrutina Divi_16	105
3.3.11 Subrutina Restar	107
3.3.12 Subrutina Rest_32	109
3.3.13 Subrutina BCD	111

CAPÍTULO IV : PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Introducción.....	117
4.2 Operación de la Fuente de Corriente.....	117
4.3 Operación del Acondicionador de Termocupla	118
4.4 Operación del Conversor A/D	122
4.5 Resultados de las pruebas a las muestras de suelos.....	124
4.6 Análisis Económico.....	131

CAPÍTULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	137
5.2 Recomendaciones.....	139
Bibliografía.....	140
Anexos.....	142

RESUMEN

En este trabajo se diseña y construye un medidor de termoconductividad para determinar el coeficiente térmico de suelos y rocas suaves en base a la Norma ASTM D5334 – 92. En ella se especifica la construcción de la vaina térmica, así como las mediciones de temperatura que deben realizarse y, finalmente, la expresión matemática que debe aplicarse para calcular el referido coeficiente.

La vaina térmica está constituida por una niquelina y una termocupla tipo T y la construcción se realizó, siguiendo la norma, con epoxy térmico. Se puso mucho cuidado para evitar que se junten niquelina y termocupla en la vaina y se produzca un cortocircuito.

Se diseñó y construyó un amplificador en base a un chip especialmente dedicado para acondicionar la señal entregada por las termocuplas. El chip en realidad es para termocuplas tipo K, pero por ser su característica parecida a la tipo T, en el rango de trabajo de 0^oC a 100^oC de este proyecto, se decidió emplearlo.

Para automatizar el proceso de adquisición de datos, tal y como se especifica en la norma, se recurrió a un PIC 16F870 que es el que mejor se ajustó a las necesidades de este trabajo.

En este micro también se desarrolló el método y expresión matemática que permite calcular el coeficiente de termoconductividad, a partir de las muestras de temperatura adquiridas.

Con el algoritmo implementado se logró resolver el problema que es determinar la linealidad de la curva temperatura versus tiempo de la muestra bajo observación. Para esto se hizo un análisis de lo que implica tener una recta y en base a diferencias de valores en tiempos iguales se logró ubicar la parte recta de la curva.

Una vez conseguido el desarrollo del algoritmo, los resultados se compararon con aquellos determinados por otro método confiable, como es el Aparato de Lees. También se recurrió a comparar los valores obtenidos por el algoritmo con aquellos obtenidos manualmente.

Se obtuvo el coeficiente térmico de tres muestras diferentes. El error máximo que se obtiene para cada muestra se detalla a continuación: para la **Muestra 1** es de 9.83%, de la **Muestra 2** es 5.63% y para el **Ladrillo** es de 3.74 %.

Para ninguno de los casos el error sobrepasa el límite descrito por la norma, el cual es 12 %.

PRESENTACIÓN

Siempre que exista una diferencia de temperatura, habrá transferencia de calor desde el objeto más caliente al menos caliente. La cantidad de calor transferida es una función de la diferencia de temperatura y de la resistencia en el camino de la transferencia de calor. Es posible establecer una similitud entre el flujo de calor, el flujo de fluidos, y el flujo de energía eléctrica. En cada caso, el flujo es una función de la cantidad de energía aplicada (potencial) y de la resistencia que se opone al movimiento del fluido.

La transferencia de calor por medio de una sustancia ayuda a determinar ciertas características importantes de una materia.

Para esto se han desarrollado métodos y normas para determinarlo.

En este trabajo se emplea como referencia la norma ASTM D 5334 – 92, para diseñar y construir un equipo que en forma automática calcula la conductividad térmica de una muestra.

Para describir de una forma ordenada los pasos que se siguieron para implementar el objetivo que aquí se plantea, en el Primer Capítulo se cubre el fundamento teórico sobre aspectos generales de transferencia de calor, necesario para su conocimiento y comprensión y, sobre todo, una explicación clara de lo que dice la Norma ASTM D 5334 – 92. El Segundo Capítulo trata sobre el diseño y construcción del hardware del medidor de termoconductividad en cada una de sus etapas, empezando por la fabricación del sensor y posterior acondicionamiento de su señal. Luego se continúa con el diseño del sistema de adquisición de datos. El Tercer Capítulo especifica el software del sistema; es decir, describe el algoritmo de cálculo desarrollado para determinar la termoconductividad. El Cuarto Capítulo contiene un reporte de los resultados experimentales obtenidos de la operación del aparato construido, con diversos tipos de suelos y su contrastación con otro método de medición de

termoconductividad que usa como elemento principal el Aparato de Lees¹, así como con valores de termoconductividad de materiales conocidos que se hallan tabulados en tablas. Finalmente, en el Capítulo Quinto se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan de las diferentes etapas atravesadas para la finalización del equipo, así como de su funcionamiento.

¹ El aparato de Lees se encuentra en el Laboratorio de Energía que pertenece a Ingeniería Mecánica, si se desea conocer su formulación matemática se puede referir a Anexo 3.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

CONTENIDO CAPÍTULO I

1. ASPECTOS GENERALES
- 1.2 DESCRIPCIÓN DEL MODO DE TRANSFERENCIA DE CALOR COMO ASPECTO ESENCIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TERMOCONDUCTIVIDAD
- 1.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
- 1.4 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA ECUACIÓN DE TERMOCONDUCTIVIDAD PARA SUELOS Y ROCAS SUAVE
- 1.5 MÉTODOS APLICADOS PARA SOLUCIONAR LOS PROBLEMAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

1. ASPECTOS GENERALES

En este trabajo se tiene como objetivo diseñar y construir un sistema que en forma automática determine la termoconductividad de cierto tipo de muestras de suelo y rocas suaves, basado en la norma ASTM D 5334 – 92. Esta norma especifica los pasos a seguir tanto para la construcción del sensor, como para tomar y recolectar los valores de temperatura, mediante una termocupla tipo T. Puesto que el origen de este trabajo parte de las recomendaciones y procedimientos contenidos en la referida norma, a continuación se presenta una visión global de la misma.¹

Según el método especificado en la referida norma, la termoconductividad es determinada por inserción de una aguja relativamente larga, de diámetro muy pequeño dentro del material del cual se desea obtener la termoconductividad.

Se puede dividir a la norma en tres etapas:

- Construcción del sensor.
- Adquisición datos.
- Cálculo de la termoconductividad.

La aguja está formada por los siguientes elementos: un elemento calentador, un elemento de medida de temperatura y epóxica líquida. El primero crea una fuente lineal de calor, el segundo permite medir la variación de temperatura en un punto a lo largo del tiempo y el tercer elemento, proporciona un aislamiento eléctrico, pero una buena conducción térmica.

Para realizar la prueba, una cantidad conocida de corriente es pasada a través del elemento calentador y la variación resultante de temperatura es monitoreada como una función del tiempo.

Una vez construido el sensor, la norma especifica como recolectar los datos de temperatura, con el siguiente procedimiento:

¹ La norma ASTM D 5334 – 92, transcrita casi literalmente, se halla en el Anexo 1

1. Colocar la aguja térmica dentro de la muestra, con la parte del conector de termocupla en la parte superior reposando sobre la misma.
2. Permitir que la muestra llegue al equilibrio térmico con la temperatura del medio en el cual se está haciendo la medición.
3. Conectar el alambre calentador (en el presente caso se tiene una niquelina) de la aguja térmica a una fuente de corriente constante, por ejemplo 1A
4. Conectar el medidor de temperatura (en el presente caso una termocupla tipo T).
5. Recolectar los valores de temperatura a los tiempos 0, 5, 10, 15, 30, 45 y 60 segundos, luego tomar lecturas cada 30 segundos hasta un tiempo mínimo de 1000 segundos.
6. Apagar la fuente de corriente constante.
7. De la curva Temperatura vs. Tiempo, seleccionar la parte lineal (en la porción de estado pseudo² estable) y dibujar una línea directamente sobre los puntos.
8. Seleccionar los puntos apropiados para los tiempos t_1 y t_2 sobre la línea y leer sus correspondientes temperaturas T_1 y T_2 respectivamente.

Al tener los datos de temperatura en función del tiempo, la referida norma da la siguiente relación para calcular la termoconductividad:

$$\lambda = \frac{2.3Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \text{Log}_{10} \left(\frac{t_2}{t_1} \right) = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \text{Ln} \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1.1)$$

Donde:

$$Q = \text{Calor de entrada} = \frac{I^2 R}{L} = \frac{E I}{L} \quad [\text{W / m}]$$

$$T_1 = \text{Temperatura inicial de la porción lineal.} \quad [^\circ\text{K}]$$

$$T_2 = \text{Temperatura final de la porción lineal.} \quad [^\circ\text{K}]$$

$$t_1 = \text{Tiempo inicial de la porción lineal.} \quad [\text{s}]$$

$$t_2 = \text{Tiempo final de la porción lineal.} \quad [\text{s}]$$

² Estado pseudo estable significa en el estado casi estable pero no el transitorio.

De lo que hasta aquí se podrá deducir, la termoconductividad es una propiedad térmica de los cuerpos³ relacionada con la conducción de calor, por lo que es procedente revisar los conceptos relacionados con la transferencia de calor, para tener como referencia un marco teórico sólido respecto a estos fenómenos.

1.1 MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres modos de transferencia de energía y son:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación.

1.1.1 CONDUCCION

La transferencia de calor por conducción puede pensarse como el calor transferido, a través de una sustancia o combinación de sustancias, de una región de temperatura alta a una región de temperatura baja, gracias al intercambio progresivo de energía entre las moléculas de la sustancia. En el proceso de transferir calor por conducción, no existe ningún desplazamiento corporal de las moléculas. Sin embargo, en el caso de los metales, el movimiento de los electrones ayuda grandemente a que el calor se transfiera por conducción.

La ley fundamental de la conducción se acredita a Fourier. Esta ley puede ilustrarse como sigue. Considere un flujo de calor en estado estable, unidireccional a través de un sólido, como se indica en la Figura 1.1. Si se toma un trozo sólido en cuyo corte seccional de área **A** transita perpendicularmente un flujo de calor, si se considera el espesor del sólido como **x**, y la diferencia de temperatura que existe en el sólido como **T**, de su trabajo experimental Fourier desarrolló la relación siguiente:

³ Las aplicaciones de esta propiedad térmica se observan en el Anexo 4

Entonces, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica conocida como Principio de la Conservación de la Energía (nada nace, nada muere, todo se transforma).

$$\left[\begin{array}{c} \text{Transferencia Neta de Energía} \\ \text{al o del sistema como} \\ \text{Calor y Trabajo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Incremento (o decremento)} \\ \text{neto en la energía total del} \\ \text{Sistema} \end{array} \right]$$

$$Q - W = \Delta E [KJ] \quad (1.4)$$

Donde:

Q = Transferencia neta de calor a través de las fronteras del sistema.

$$(\sum Q_{ent} - \sum Q_{sal}).$$

W = Trabajo neto hecho en todas las formas. $(\sum W_{ent} - \sum W_{sal}).$

ΔE = Cambio neto en la energía total del sistema. $(E_2 - E_1).$

1.1.2 CONVECCION (TRANSMISIÓN)

La transmisión, en general, es el proceso de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido. En los fluidos, sin embargo, a la par con el movimiento de micro partículas, es posible el desplazamiento de volúmenes macroscópicos entre zonas que tengan diferente temperatura. La transferencia de calor junto con el desplazamiento de unos volúmenes microscópicos de materia lleva el nombre de *termotransferencia convectiva* o simplemente *convección*. Con frecuencia resulta necesario calcular el intercambio térmico entre un fluido y la superficie de un sólido. Este proceso tiene el nombre especial de emisión de calor por convección (fluido cede el calor a la superficie o viceversa).

Los modelos de transmisión de calor se dividen en dos tipos: libre o natural y forzada. La transmisión libre tiene lugar cuando el fluido entra en movimiento por efectos de flotabilidad causados por un incremento térmico. La transmisión

forzada ocurre cuando alguna otra fuerza, por ejemplo el viento, causa un movimiento del fluido relativo a la superficie. La modelación del movimiento de un fluido complejo resulta ser muy complicada, pero Ozisik (1998)⁴ expuso que para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, este proceso puede aproximarse definiendo el coeficiente de la transferencia de calor, h (Energía/área*temperatura) para representar la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido. La transferencia de calor por convección se la evalúa a través de la siguiente ecuación:

$$q = h * |T_f - T_s| \quad (1.5)$$

Donde:

T_f = Temperatura interna del fluido. [°K]

T_s = Temperatura de la superficie [°K]

1.1.3 RADIACIÓN

El tercer mecanismo de transferencia de calor es por *radiación*. El calor se transmite por radiación por todos los medios transparentes a los rayos, incluyendo el vacío. Ozisik⁴ describió a la radiación como la transferencia de calor entre dos cuerpos por ondas electromagnéticas o partículas de fotón; es decir, durante el intercambio de calor mediante este tercer mecanismo, los portadores de energía son fotones irradiados y absorbidos por los cuerpos que participan en el intercambio térmico.

Con frecuencia, la transferencia de calor se realiza simultáneamente por modos diferentes (caso de un *intercambio térmico complejo*). Por ejemplo, la emisión de calor por convección de un gas a una pared, en la práctica siempre está acompañada con la transferencia paralela de calor por radiación; por lo tanto, concebir una idea aproximada del origen de la emisión de radiación es compleja, por lo que surge la idea de considerar esta facultad desde ó penetrando a una profundidad de la superficie del cuerpo que irradia calor. Por lo que, en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, permiten simplificar el

⁴ <http://mnroad.dot.state.mn.us/restools/restools.html>

proceso, suponiendo que el intercambio de energía de radiación sólo ocurre en la superficie de un cuerpo.

La cantidad de energía emitida o absorbida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de ese cuerpo. La constante de proporcionalidad de radiación se llama constante de Stefan-Boltzmann y se la representa como, σ . El modelo de radiación más simple involucra la transferencia de calor entre dos "cuerpos negros" (objetos que emiten o absorben energía perfectamente, es decir, sin reflejar o transmitir alguna energía) donde el cuerpo está suficientemente cercano a otro cuerpo (Figura 1.2). En este caso, el flujo de calor es representado por la ecuación siguiente:

$$q = \sigma * |T_1^4 - T_2^4| \quad (1.6)$$

Donde:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5.669 * 10^{-8}$ [W / m² * K⁴])

T_1 = Temperatura del cuerpo más pequeño [°K]

T_2 = Temperatura del cuerpo más grande [°K]

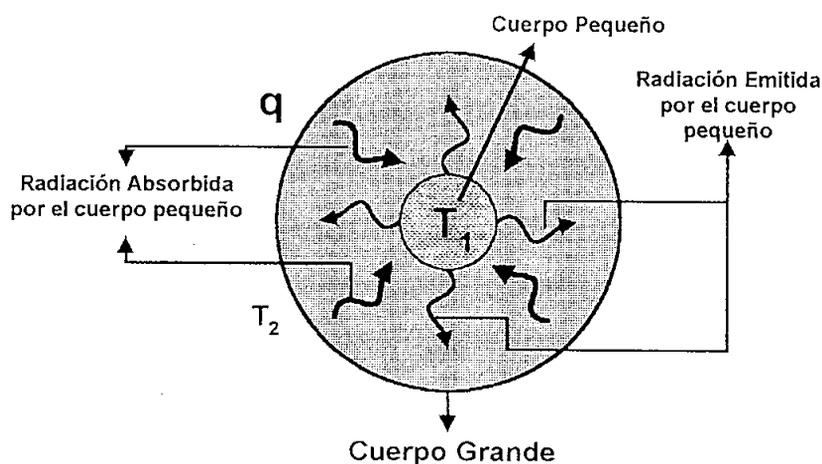


Figura 1.2 Modelo de Radiación de Dos cuerpos

En realidad, ningún objeto absorbe o emite radiación perfectamente, y dependiendo de factores propios de los materiales, la absorbanza (a) y la emitancia (ε) deben ser incluidas en los modelos de radiación. Estos factores tienen valores entre 0 y la unidad, y representan una fracción de la energía total de radiación absorbida y emitida, respectivamente, por una superficie. La energía transmitida por un cuerpo sólido, como el pavimento, a medios circundantes (la atmósfera de la tierra o el espacio exterior), se representa por una modificación de la Ecuación 1.6:

$$q = \varepsilon \sigma * \left| T_1^4 - T_A^4 \right| \quad (1.7)$$

Donde:

ε = Emitancia total del suelo. (adimensional)

T_1 = Temperatura de la superficie de la primera capa del suelo [°K]

T_A = Temperatura ambiente [°K]⁵

La Ecuación 1.5 representa la energía solar absorbida por la superficie externa del sólido (como ejemplo práctico, por el pavimento), pero es innecesaria ésta relación cuando el flujo solar neto de la superficie, H_s es conocido. La ecuación que representa la energía solar absorbida por la capa externa del cuerpo asume la siguiente forma:

$$q = a * H_s \quad (1.8)$$

Donde:

a = Absorbanza total del material a probar (por ejemplo, pavimento).

Esto quiere decir que para calcular a se debería estimar H_s , un problema que por su profundidad y extensión cae fuera de éste proyecto de titulación.

⁵ En la Ecuación (1.7) el parámetro T_A se refiere a la temperatura T_2 de la Ecuación (1.6), ya que la temperatura ambiente representa a un cuerpo grande donde la diferencia de temperatura permite la transmisión de calor hacia los cuerpos pequeños.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL MODO DE TRANSFERENCIA DE CALOR COMO ASPECTO ESENCIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TERMOCONDUCTIVIDAD

1.2.1 LA CONDUCCIÓN EN LA TERMOCONDUCTIVIDAD

Se indicó que la determinación de los valores de termoconductividad de las diferentes muestras de suelo y roca suave se rige bajo la norma de la Sociedad americana de Pruebas y Materiales (ASTM) D 5334 - 92: Método de Prueba estándar mediante sonda térmica, en la cual, para la evaluación de éste valor, la sonda es una fuente o sumidero de calor. La sonda excita a las muestras de suelo o roca suave transfiriendo energía calorífica; por lo tanto, el modo de transferencia que interviene en este proceso, es el de "Conducción".

Bajo el enunciado del Numeral 1.1, conforme al segundo principio de la termodinámica, el proceso espontáneo de transmisión de calor en un espacio se da por acción de una diferencia de temperatura dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo. Las particularidades de la transferencia de calor y las características cuantitativas de este proceso son objeto de investigación en la *teoría de intercambio térmico (termotransferencia)*. El calor puede propagarse en cualesquier sustancia e incluso a través del vacío.

En todas las sustancia el calor se transmite mediante la *conductividad térmica* a costa de transferencia de energía por unas micro partículas (esto visto a nivel molecular). Las moléculas, los átomos, los electrones y otras micro partículas que forman la materia, se mueven con velocidades que son proporcionales a su temperatura, transportan la energía de una zona con temperatura más alta a otra zona con temperatura más baja.⁶

⁶ Termotecnia, 621.4 B315

A. P. Baskakov; editorial Mir, 1985

En el flujo por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia es proporcional a la energía cinética media de sus constituyentes moleculares. La energía cinética que posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, recibe el nombre de *energía interna*. Por lo tanto, para un elemento dado de materia, mientras más rápidamente se muevan sus moléculas, mayor será su temperatura y su energía interna. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que las de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región a más baja temperatura. La transferencia de energía podría realizarse por choque elástico (en fluidos, por ejemplo) ó por difusión de los electrones rápidos desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura (por ejemplo, en los metales).

El efecto observable de la conducción de calor es la transferencia de calor y un eventual equilibrio de temperaturas. Sin embargo, si las diferencias de temperatura se mantienen, por la adición y remoción de calor en diferentes puntos, se establecerá un flujo continuo de calor de la región más caliente a la región más fría.

1.2.2 CONDUCCION EN ESTADO ESTABLE DEL FLUJO DE CALOR⁷

Se llama estado estable al caso de transferencia de calor en el que el tiempo no es un factor que influya en la transferencia. Considerar la transferencia de calor en donde no interviene el tiempo permite simplificar el análisis en cierta medida. La ecuación principal para la conducción de estado estable con generación interna de calor es:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (1.9)$$

⁷ Welty, James.; Transferencia de calor aplicada a la ingeniería
621.402;W464 :editorial Limusa, México, 1981

conductividad térmica infinita, que suponga que la resistencia conductiva interna del sistema es tan pequeña, que la temperatura dentro del sistema es sustancialmente uniforme en cualquier instante. Esta simplificación se justifica cuando la resistencia térmica externa entre la superficie del sistema y el medio que lo rodea es grande, comparada con la resistencia térmica interna del sistema que controla el proceso de transferencia de calor; es decir, el conjunto sistema-medio llega a un estado de equilibrio térmico, y dicho estado le es indiferente a las entrañas del sistema (ó sólido) que a su vez depende de las características propias que este último posea, las mismas que son un factor atenuante a las cualidades del medio y permiten de esa forma la inexistencia de una igualdad térmica resistiva entre la superficie y las capas internas del sistema.

Una medida de la importancia relativa de la resistencia térmica dentro de un cuerpo sólido, es la razón de la resistencia interna a la externa. Esta razón puede escribirse en forma adimensional como $\bar{h} L / \lambda$, conocida como el *número de Biot*, donde \bar{h} es la conductancia por unidad de superficie promedio, L tiene dimensiones de longitud y es una constante significativa que se obtiene al dividir el volumen del cuerpo para el área de su superficie, y λ es la conductividad térmica del cuerpo sólido. En cuerpos cuya forma se asemeja a una placa, un cilindro, o una esfera, el error introducido por la hipótesis de que la temperatura en cualquier instante es uniforme a lo largo de su estructura externa, será menor del 5% siempre y cuando la resistencia térmica interna del sistema sea menor del 10% que la resistencia térmica de la superficie externa; es decir, cuando $\bar{h} L / \lambda < 0.1$.

Un ejemplo típico de este tipo de flujo transitorio de calor es el enfriamiento de un pequeño trozo de metal fundido o un lingote en un baño de templado después de sacarlo de un horno caliente. Se supone que el lingote se extrae del horno a una temperatura uniforme T_0 y es sumergido tan bruscamente que se puede aproximar el cambio de temperatura ambiente a una función paso. Se designa al tiempo en el que se inicia el enfriamiento como $\theta = 0$, se supone que

Donde se ha denotado $d(T-T_\infty) = dT$, puesto que T_∞ es constante. Con una temperatura inicial de T_0 y una temperatura al tiempo θ de T como límites, la integración de la Ecuación 1.12 da:

$$\ln \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = -\frac{\bar{h} A_s}{c \rho V} \theta$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-\frac{\bar{h} A_s}{c \rho V} \theta} \quad (1.13)$$

La cantidad $c\rho V/\bar{h}A_s$ tiene dimensión de tiempo y se denomina *constante de tiempo*. Su valor es indicativo de la rapidez de la respuesta de un sistema capacitivo simple a un cambio repentino de la temperatura ambiental. Cuando $\theta = c\rho V/\bar{h}A_s$ la diferencia de temperaturas $T - T_\infty$ decae a 36.8% de la diferencia de potencial⁹ inicial $T_0 - T_\infty$.

Si se observa el circuito térmico de la Figura 1.3, se reemplaza en la Ecuación 1.13 el valor de R (resistencia térmica) y el de C (capacidad calorífica), se obtiene:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-\left(\frac{1}{RC}\right)\theta} \quad (1.14)$$

Esta Ecuación describe el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo para el enfriamiento del lingote.

⁹ Entiéndase a esto de potencial inicial, cuando el lingote es extraído del horno, pero no confundir a éste término con el potencial del voltaje.

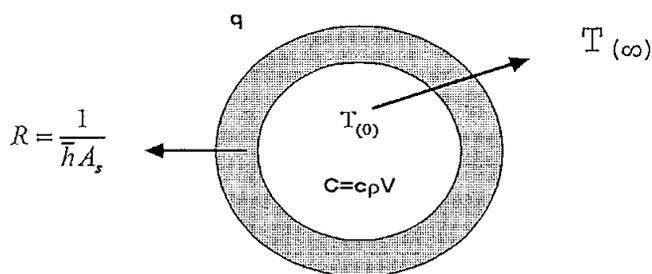


Figura 1.3 Enfriamiento del lingote (Circuito Térmico)

Es posible establecer una analogía entre los sistemas eléctrico y térmico. El sistema eléctrico formado por un capacitor C_e y una resistencia R_e en serie se muestra en la Figura 1.4

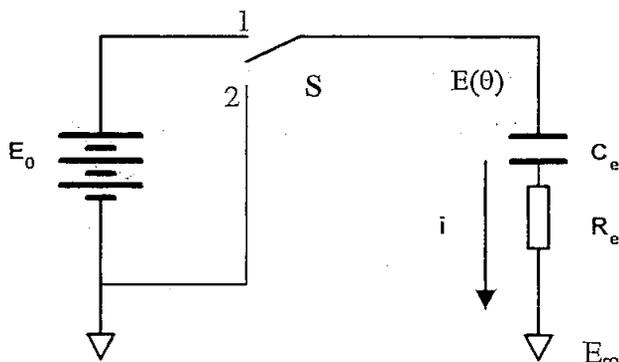


Figura 1.4 Descarga del capacitor (Sistema Eléctrico)

El potencial E_∞ , corresponde al potencial de tierra o GND cuyo valor es de cero voltios, y al igual que su equivalente T_∞ en el sistema térmico, corresponde a la referencia del sistema eléctrico.

Cuando en este sistema el interruptor S se abre repentinamente (posición 2), el condensador comienza a descargarse y la diferencia de voltaje $E - E_\infty$ decrece. La corriente i que fluye del condensador a través de la resistencia R_e está relacionada a la diferencia de voltaje por:

$$i = \frac{E - E_\infty}{R_e} = \frac{dQ_e}{d\theta} = -C_e \frac{dE}{d\theta} \quad (1.15)$$

numéricamente igual a $\bar{h}A_s / c_pV$, ambos potenciales decaerán a la misma rapidez y ambos sistemas pueden ser considerados análogos.

A continuación se despliega una tabla con las variables que forman parte de los sistemas análogos (eléctrico y térmico).

SISTEMA TERMICO	SISTEMA ELECTRICO
$q = \frac{T - T_\infty}{R} = -C \frac{dT}{d\theta}$	$i = \frac{E - E_\infty}{R_e} = -C_e \frac{dE}{d\theta}$
$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-\left(\frac{1}{RC}\right)\theta}$	$\frac{E - E_\infty}{E_0 - E_\infty} = e^{-\left(\frac{1}{R_e C_e}\right)\theta}$
q = Flujo de calor [cal / s]	i = Flujo de corriente [A]
C = Capacidad térmica [cal / °K]	C _e = Capacidad eléctrica [F]
R = Resistencia térmica [°K*s/cal]	R _e = Resistencia eléctrica [Ω]
T - T _∞ = Potencial térmico [°K]	E - E _∞ = Potencial eléctrico [V]

Tabla 1.1 Analogía entre los sistemas térmico y eléctrico

Se observa que $1/\bar{h}A_s$ es la resistencia térmica R en la superficie del lingote, c_pV es equivalente a una *capacitancia térmica concentrada* C del lingote, en tanto indica la cantidad de energía interna que debe retirarse del lingote por cada unidad que varíe su potencial de temperatura. El hecho de abrir el interruptor en el sistema eléctrico corresponde a la exposición del lingote al ambiente más frío.

Si se considera un poco más a la relación que existe entre $V/A_s = L$, se puede ver que la misma tiene unidades de longitud y es una constante significativa para el cuerpo. Si se multiplica el numerador y denominador del exponente de la Ecuación 1.14 por $L \lambda$. Separando la expresión resultante en dos grupos adimensionales queda:

unidimensional o bidimensional, respectivamente. Vale aquí hacer notar que el **campo de temperatura es estacionario**, cuando la temperatura en todos los puntos de un cuerpo no varía con el tiempo $T \neq f(\tau)$ y el **no estacionario**, cuando la temperatura depende del tiempo $T = f(\tau)$.

Una *superficie* en la que todos sus puntos tienen igual temperatura se denomina *isotérmica*. La temperatura varía de forma más notoria en dirección normal a la superficie isotérmica. Un vector normal a la superficie isotérmica en sentido de aumento de temperatura y numéricamente igual a la derivada de la temperatura según esta dirección es la *gradiente de temperatura*: $\text{grad } T$.

De acuerdo con la ley de Fourier, el vector de densidad del flujo calorífico que se transfiere por medio de la conductividad térmica, es proporcional al gradiente de temperatura, lo cual se observó en la ecuación del punto 1.1.1, pero la diferencia está en que:

$$Q = (-\lambda * A) \frac{dT}{dx} \quad \text{De (1.1)}$$

$$\frac{Q}{A} = q \therefore$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.19)$$

Donde el valor de la unidad de medición del coeficiente de termoconductividad (λ) es [W/(m °K)].

Pero esto visto unidimensionalmente; por lo tanto, viéndolo de manera tridimensional:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$q = -\lambda \nabla T \quad (1.20)$$

El signo menos en la Ecuación 1.20 indica que el vector \mathbf{q} está orientado en dirección opuesta a la del vector $\text{grad } T$ (Figura 1.6); es decir, en sentido del decremento máximo de la temperatura; por lo que, para escribir la ecuación de conducción del calor en forma matemática, se debe adoptar una convención de signos.

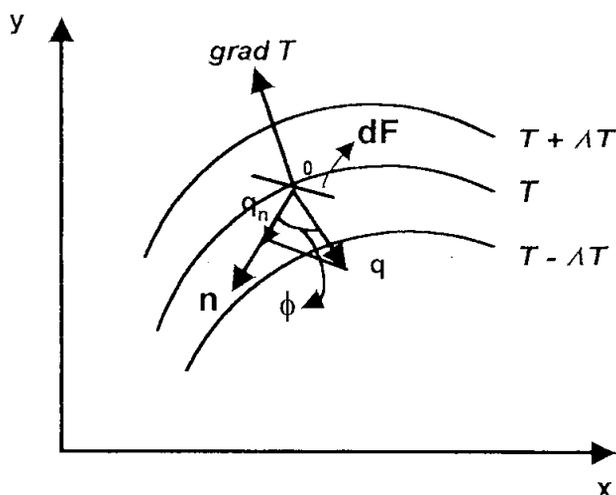


Figura 1.6. Ejemplo de disposición de los vectores $\text{grad } T$ y \mathbf{q} en el punto 0 respecto a las líneas isotérmicas del campo de temperatura bidimensional.

La densidad del flujo calorífico q_n en cualquier otra dirección \mathbf{n} (Figura 1.6) es igual a la proyección del vector \mathbf{q} en esta dirección \mathbf{n} :

$$q_n = q \cos \varphi = -\lambda \nabla T \cos \varphi \quad (1.21)$$

Teniendo en cuenta que $\text{grad } T \cos \varphi = \partial T / \partial n$, puede escribirse:

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.22)$$

La convención de signos especifica que la dirección en que se incrementa la distancia "x" es la dirección del flujo positivo. Entonces, puesto que de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el flujo será positivo cuando el gradiente de temperatura sea negativo, como se observa en la Figura 1.7.

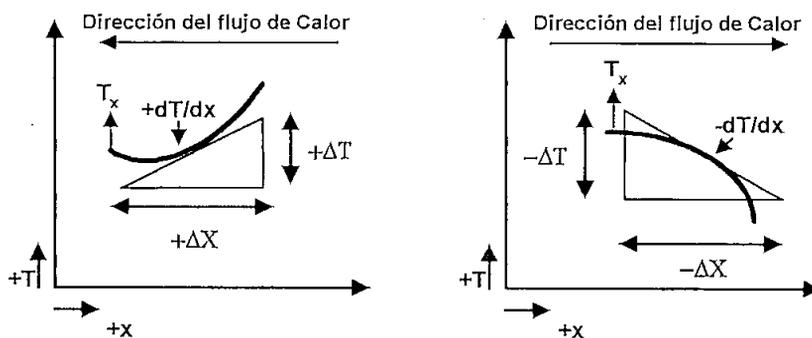


Figura 1.7 Diagrama que ilustra la convención de signos para el flujo de calor por conducción

1.3.2 Coeficiente de Conductividad Térmica

El coeficiente de conductividad térmica λ en la ley de Fourier (Ecuación 1.20) caracteriza la capacidad de una sustancia dada de conducir el calor. Los valores de los coeficientes de conductividad térmica se manifiestan en los esquemas de las propiedades termofísicas de las sustancias. Numéricamente el coeficiente de conductividad térmica $\lambda = q / \text{grad}(T)$ es igual a la densidad del flujo calorífico con un gradiente de temperatura igual a 1 [$^{\circ}\text{K}/\text{m}$]. Al examinar el mecanismo de transferencia de calor en la sustancia se puede comprender la influencia ejercida por diferentes parámetros, así como determinar el valor de λ .

La conductividad térmica en los metales ocurre gracias al movimiento térmico de los electrones (gas electrónico) los que son tres mil veces más ligeros que las moléculas del gas más ligero, el hidrógeno. También la conductividad térmica de los metales es muchas veces superior a la de los gases.¹¹

Los metales fundidos poseen menores coeficientes de conductividad térmica que los solidificados, ya que durante la fusión se destruye la red cristalina

¹¹ Termotecnia, 621.4 B315

A. Baskakov; editorial Mir, 1985

ordenada y los átomos que se mueven, caóticamente, impiden el avance de los electrones.

Por ejemplo, el coeficiente de conductividad térmica de los materiales duros no metálicos es inferior a $10 \text{ [W/m } ^\circ\text{K]}$.

Los materiales porosos: como el corcho, diferentes rellenos fibrosos tipo algodón tienen los menores coeficientes de conductividad térmica $\lambda < 0.25 \text{ [W/m } ^\circ\text{K]}$, cuando es pequeña la densidad de relleno, al coeficiente de conductividad térmica del aire que ocupa los poros. Con el aumento de la temperatura su conductividad térmica sube ligeramente debido a que aumenta la conductividad térmica del aire y se intensifica la transferencia de calor irradiada a través de los poros.

Es interesante hacer notar que la conductividad térmica aumenta de modo brusco al humectar los materiales porosos.

1.4 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA ECUACIÓN DE TERMOCONDUCTIVIDAD PARA SUELOS Y ROCA SUAVE.

A continuación se formulan las leyes físicas que sustentan el proceso relacionado con la propagación de calor cuya medición se realiza por medio de un método que, a pesar de involucrar una teoría complicada, requiere de equipo simple y de poco tiempo para la determinación del parámetro de termoconductividad. A éste método se le denomina, como ya se ha indicado anteriormente, el de la sonda térmica.

Esta técnica indica insertar una sonda que contiene un emisor de calor en una muestra. De esta forma la sonda representa una interfaz entre la fuente de energía calórica y el sumidero de calor (muestra), sin importar cuales sean las condiciones de temperatura (de la cuál se medirá su variación con el tiempo) o flujo de calor hasta alcanzar el equilibrio térmico entre la sonda y la muestra.

Si la temperatura del cuerpo no es homogénea, en éste aparecen flujos caloríficos, dirigidos desde los lugares de mayor temperatura a los lugares de menor temperatura, como se enunció anteriormente.

Con el fin de aplicar ésta teoría, la estructura externa de la sonda es semejante a un tubo cilíndrico no hueco (conformado por una niquelina, termocupla y pega epóxica) en cuyo interior fluiría una corriente eléctrica alimentada por una fuente de corriente constante ubicada en los extremos de la niquelina, donde la emisión de calor se puede caracterizar¹² por la densidad de las fuentes térmicas $F(x,t)$ en el momento t ¹³, en el punto \mathbf{x} (donde \mathbf{x} representa el radio de la sonda tomando como referencia desde el eje principal a lo largo de la estructura de la sonda); como resultado de la acción de estas fuentes en el intervalo de la barra $(x, x+dx)$ durante un intervalo de tiempo $(t, t+dt)$ se emitirá una cantidad de calor por unidad de tiempo y de área, dada por:

$$dq = F_{(x,t)} dxdt \quad (1.23)$$

ó, en forma integral:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} F_{(x,t)} dxdt \quad (1.24)$$

donde q es el flujo de calor por unidad de área atravesando claro está la superficie externa de la sonda térmica, denominado a x_1 el radio r y x_2 los límites extremos de la muestra de suelo o roca suave en que se encuentre contenida. (Obsérvese la Figura 1.8).

¹² Para este caso la Fuente Térmica se refiere al sistema que conforma la Fuente de corriente Constante y la sonda térmica.

¹³ Cuando el calor se desprende como resultado del paso de la corriente eléctrica de intensidad I por la barra, cuya resistencia por unidad de longitud es igual a R , entonces $F = 0,24 I^2 R$.

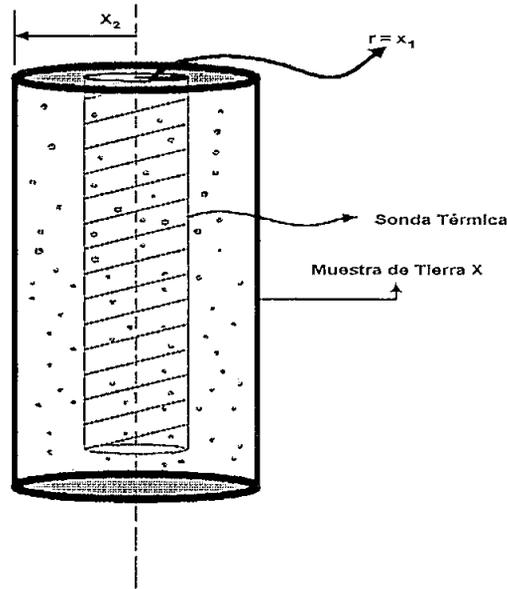


Figura 1.8. Inyección de la sonda térmica en una muestra cualquiera.

Por lo tanto, relacionándolo al caso presente se tiene que:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\lambda \frac{\partial u}{\partial x}(x, \tau) \Big|_{x=x_2} - \lambda \frac{\partial u}{\partial x}(x, \tau) \Big|_{x=x_1} \right] d\tau + \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} F(\xi, \tau) d\xi d\tau = \int_{x_1}^{x_2} c\rho [u(\xi, t_2) - u(\xi, t_1)] d\xi \quad (1.25)$$

que es precisamente la ecuación de conducción de calor en forma integral.

Para obtener la ecuación de la conducción del calor en forma diferencial, se

supone que la función $u(x, t)$ posee las derivadas continuas $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ y $\frac{\partial u}{\partial t}$.

Aplicando el teorema del valor medio, se obtiene la igualdad:

$$\left[\lambda \frac{du}{dx}(x, \tau) \Big|_{x=x_2} - \lambda \frac{du}{dx}(x, \tau) \Big|_{x=x_1} \right]_{\tau=t_3} \Delta t + F(x_4, t_4) \Delta x \Delta t = \{c\rho [u(\xi, t_2) - u(\xi, t_1)]\}_{\xi=x_3} \Delta x \quad (1.26)$$

la cual, en virtud del teorema del valor medio, se puede transformar como sigue:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial u}{\partial x} (x, t) \right]_{x=x_3}^{t=t_3} \Delta t \Delta x + F_{(x_4, t_4)} \Delta x \Delta t = \\ & = \left[c \rho \frac{\partial u}{\partial t} (x, t) \right]_{x=x_2}^{t=t_5} \Delta x \Delta t \end{aligned} \quad (1.27)$$

donde t_3, t_4, t_5 y x_3, x_4, x_5 son puntos intermedios de los intervalos (t_1, t_2) y (x_1, x_2) .

De aquí, después de simplificar entre el producto $\Delta x \Delta t$, se halla:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_3}^{t=t_3} + F_{(x, t)} \Big|_{x=x_4}^{t=t_4} = c \rho \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{x=x_3}^{t=t_5} \quad (1.28)$$

Todos estos razonamientos son aplicables a intervalos (t_1, t_2) y (x_1, x_2) .

Pasando el límite cuando $x_1, x_2 \rightarrow x$ y $t_1, t_2 \rightarrow t$, se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F_{(x, t)} = c \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.29)$$

que se llama *ecuación de la conducción de calor*.

En el interior de la sonda, donde existe un emisor de calor que posibilita la transferencia calorífica a los alrededores en cantidad igual a la energía eléctrica disipada. La corriente eléctrica está dada por:

$$\frac{I}{A} = J_e = -\sigma \frac{dE}{dx} \quad (1.30)$$

En cada sección del conductor la energía eléctrica disipada es igual al calor transferido a los alrededores (Figura 1.9):

$$dQ = I \frac{dE}{dx} dx \quad (1.31)$$

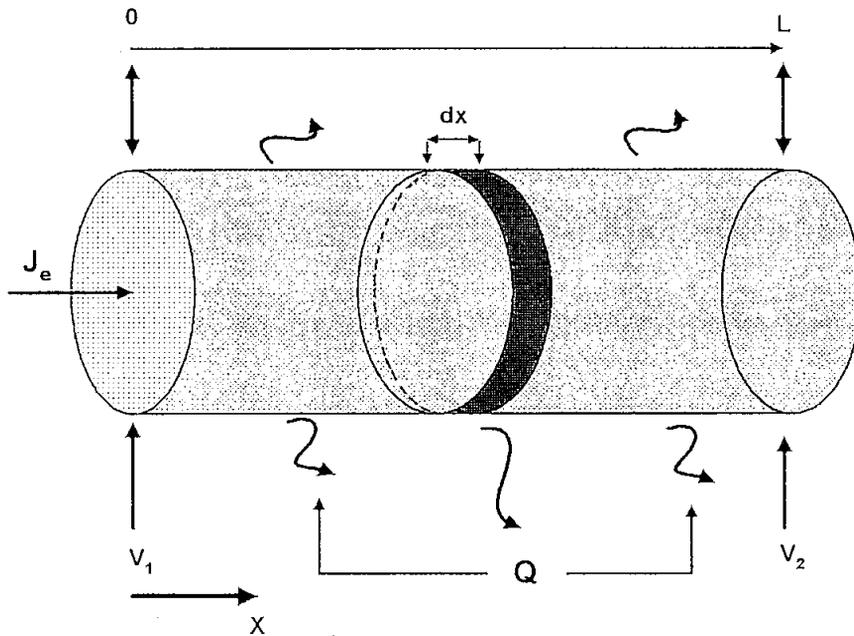


Figura 1.9 Flujo unidimensional de corriente eléctrica

Se sabe además que,

$$\Delta V = V_1 - V_2 = E * L \quad (1.32)$$

Donde:

E = Campo Eléctrico. [V/m]

ΔV = Diferencia de Potencial Eléctrico. [V]

L = Longitud del conductor. [m]

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (1.33)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica. [Ω/m]

σ = Conductividad eléctrica. [m/Ω]

Entonces, de la Ecuación 1.30 se despeja la derivada del campo eléctrico (E) con respecto a la dirección x, con lo que resulta:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{J_e}{\sigma} \quad (1.34)$$

Sustituyendo $\frac{1}{A} = \frac{J_e}{I}$ en la ecuación de la resistencia eléctrica R (1.33), se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\sigma} \\ R &= \rho \frac{L}{A} = \rho L \left(\frac{1}{A} \right) = \rho L \left(\frac{J_e}{I} \right) = \frac{L}{I} \left(\frac{J_e}{\sigma} \right) \\ \frac{J_e}{\sigma} &= \frac{RI}{L} \end{aligned} \quad (1.35)$$

Reemplazando la Ecuación 1.35 en 1.34 resulta:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{RI}{L} \quad (1.36)$$

La Ecuación 1.36 en 1.31:

$$\begin{aligned} dQ &= I \left(-\frac{RI}{L} \right) dx, \\ \frac{dQ}{dx} &= \left(-\frac{RI^2}{L} \right) \end{aligned} \quad (1.37)$$

Si se considera el valor positivo de esta ecuación, debido a que su valor negativo solo dice que el sistema desprende o pierde energía en forma de calor al medio ambiente, resulta:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dx} &= \frac{RI^2}{L}, \\ dQ &= \frac{RI^2}{L} dx, \text{ integrando} \\ \int dQ &= \int_0^L \frac{RI^2}{L} dx \\ Q &= \frac{RI^2}{L} \left(x \Big|_0^L \right) = \frac{RI^2}{L} (L - 0) \\ Q &= RI^2 \end{aligned} \quad (1.38)$$

Por lo tanto, al hallar la parte lineal de esa curva, se logra determinar la termoconductividad aplicando la relación dada por la norma ASTM.

1.5 METODOS APLICADOS PARA SOLUCIONAR LOS PROBLEMAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Si se hace referencia a la Ecuación 1.45, al realizar la sustitución $\alpha^2 = 1/\alpha$, se obtiene otra relación que constituye la ecuación diferencial que describe la conducción térmica :

$$\alpha^2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{con} \quad \alpha^2 = \frac{\rho c}{\lambda} \quad (1.49)$$

Si se logra determinar $T(x,t)$, siendo la solución de la ecuación anterior, en donde se halla introducido el coeficiente α^2 , implícitamente se podría calcular la termoconductividad.

Para resolver esta ecuación existen diversos métodos, algunos de ellos son: solución analítica y solución numérica.

1.5.1 SOLUCIÓN ANALÍTICA

Se supone una barra metálica de longitud L (Figura 1.10), conectada por sus extremos a dos focos de calor a temperaturas T_a y T_b , respectivamente. Sea T_0 la temperatura inicial de la barra cuando se conectan los focos a los extremos de la barra.

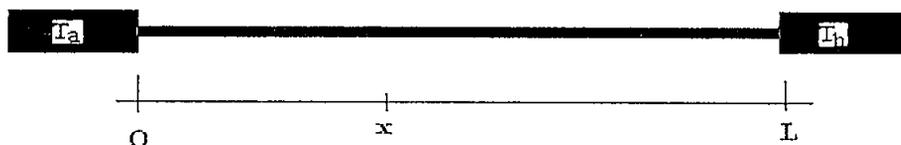


Figura 1.10 Barra metálica conectada entre dos fuentes de calor

Al cabo de cierto tiempo, teóricamente infinito, que en la práctica depende del tipo de material que se emplea, se establece un **estado estacionario** en el que la temperatura de cada punto de la barra no varía con el tiempo. Dicho estado está caracterizado por un flujo J constante de energía. La ley de Fourier establece que la temperatura variará linealmente con la distancia x al origen de la barra.

$$T_a + \frac{T_b - T_a}{L} x \quad (1.50)$$

La temperatura en cualquier punto x a lo largo de la barra, en un instante determinado, $T(x, t)$, es la solución de la ecuación diferencial, que es una combinación de dos términos, la que corresponde al régimen permanente más la del régimen transitorio.

$$T(x, t) = T_a + \frac{T_b - T_a}{L} x + \sum_{n=1}^{\infty} k_n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{\alpha^2 L^2} t\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n \pi}{L} x\right) \quad (1.51)$$

Con las condiciones de contorno, es decir, la temperatura T_0 en el instante inicial ($t=0$), y las temperaturas en los extremos T_a (para $x=0$) y T_b (para $x=L$) que permanecen invariables, se obtiene los valores de los coeficientes λ_n :

Para n par
$$\lambda_n = 2 \frac{2T_0 - (T_a + T_b)}{n\pi} \quad (1.52)$$

Para n impar
$$\lambda_n = 2 \frac{T_b - T_a}{n\pi} \quad (1.53)$$

Así, la temperatura en cualquier punto de la barra x , en un instante t , se compone de la suma de un término proporcional a x , y de una serie rápidamente convergente que describe el estado transitorio.

1.5.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA (METODOS NUMÉRICOS)

En referencia a la Ecuación 1.49, su solución se puede simplificar si se toma una escala de tiempo tal que $\xi = t/a^2$, la ecuación diferencial que describe la conducción térmica se transforma en otra más sencilla.

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.54)$$

La solución de la ecuación diferencial en derivadas parciales puede obtenerse utilizando el procedimiento de redes del siguiente modo.

Se considera un sistema de coordenadas posición – tiempo (x en el eje horizontal y ξ en el vertical), se construye una retícula trazando rectas paralelas al eje ξ equidistantes un intervalo fijo h , tal que $h = L/n$, siendo L la longitud de la barra y n el número de intervalos en los que se ha dividido la barra. Se traza rectas paralelas al eje x , equidistantes una cantidad k .

Se puede calcular la temperatura en los puntos de la barra $x = i h$ ($i = 1, 2, 3, 4 \dots n$) y en el instante $\xi = (j + 1) k$, a partir de los datos de la temperatura de la barra en los puntos x de la barra en el instante anterior $\xi = j k$ ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) sin más que aplicar el procedimiento de recurrencia esquematizado en la Figura 1.11

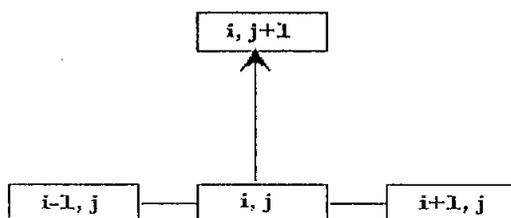


Figura 1.11 Gráfica del procedimiento de recurrencia necesario para calcular la distribución de temperatura en una barra.

La fórmula para la recurrencia es:

$$T_{i,j+1} = \frac{T_{i-1,j} + 4T_{i,j} + T_{i+1,j}}{6} \quad (1.55)$$

La distribución inicial de partida ($j = 0$) está dada por la temperatura inicial de la barra T_0 , y las temperaturas fijas en los extremos T_a y T_b , a partir de las cuales, y si se aplica la fórmula de recurrencia, se puede calcular sucesivamente las temperaturas de cada uno de los puntos de la malla (i, j).

Para practicar este método con una calculadora o con un pequeño programa de computadora, se puede seguir el siguiente procedimiento:

1. Constrúyase una tabla como la que se indica en la Figura 1.12¹⁵ y rellénese la columna izquierda, la columna derecha y la fila inferior con las temperaturas fijas en el extremo izquierdo de la barra T_a , del extremo derecho de la barra T_b , y con la temperatura inicial T_0 .

¹⁵ La tabla formada por valores de temperatura que se obtienen con la fórmula de recurrencia, corresponden a la gráfica tiempo vs. posición de la solución de la Ecuación 1.54, que indica la variación de la temperatura a medida que transcurre el tiempo en diferentes posiciones.

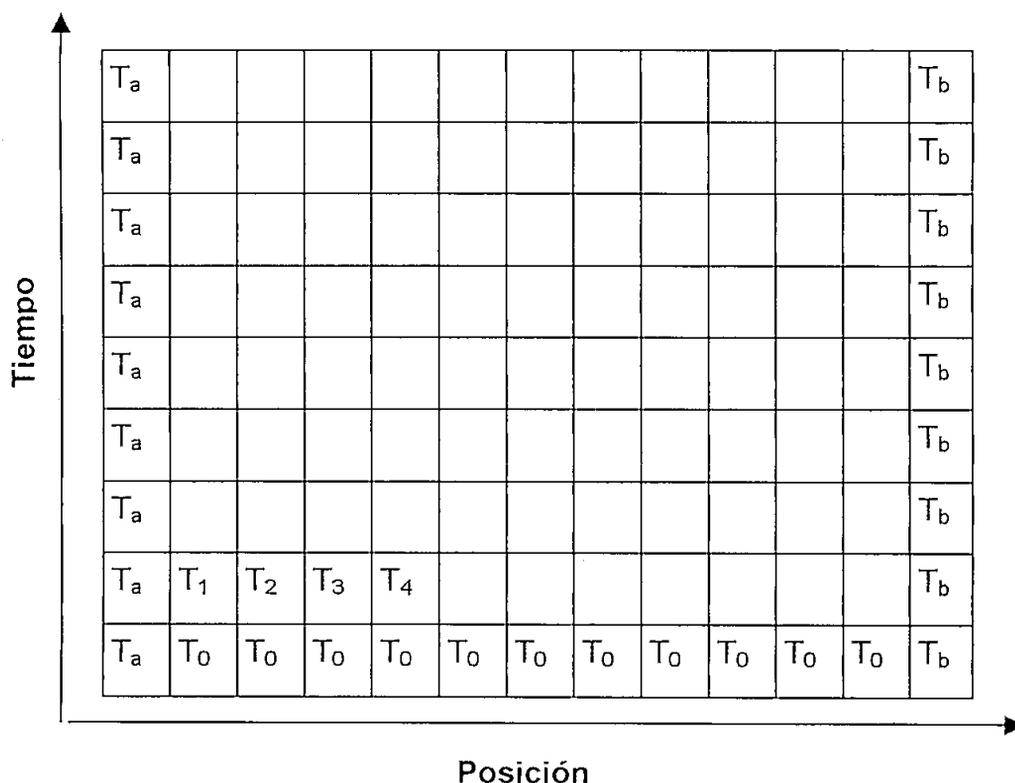


Figura 1.12 Distribución de temperatura en la barra

2. Completar la primera fila vacía aplicando la fórmula de recurrencia (Ecuación 1.55). Las cifras obtenidas corresponden a la distribución de temperatura en un instante posterior al inicial ($j = 0$).

$$T_{1,0} = \frac{T_{i-1,0} + 4T_{i,0} + T_{i+1,0}}{6} = \frac{T_a + 4T_0 + T_0}{6} = T_1$$

$$T_2 = \frac{T_0 + 4T_0 + T_0}{6} = T_0$$

3. A partir de los datos de la primera fila, completar la segunda fila vacía, y así sucesivamente.

De esta forma, al culminar de llenar la tabla, se puede determinar la evolución de la distribución de temperaturas con el tiempo que existe en la muestra, además se conoce la solución de la ecuación diferencial que describe la termoconductividad y por consiguiente el valor de esta propiedad térmica.

Vale indicar que aún los métodos analíticos más perfectos permiten obtener la solución precisa de los problemas de conductividad térmica sólo en casos simples. Mientras tanto, existen otros métodos como los numéricos aproximados, con ayuda de los cuales se puede solucionar prácticamente cualquier problema tomando en consideración muchas singularidades reales del fenómeno. La dificultad de estos métodos consiste en la necesidad de cumplir una multitud de las operaciones aritméticas y, además, cuanto más precisa ha de ser la solución obtenida, mayor volumen de cálculos tendrá que realizarse. Hoy día las computadoras permiten obtener soluciones numéricas de alta precisión, por lo tanto los métodos numéricos tienen actualmente una amplia difusión.

El método numérico más divulgado es el de *diferencias finitas* o de *redes*. En éste método el cuerpo examinado se divide en varios volúmenes ΔV de dimensiones finitas (pero éstos no son diferencialmente pequeños dV) y a cada volumen se le atribuye un número. Dentro de los límites del volumen ΔV , ordinariamente en su centro, se elige un *punto nodal* o *un nodo*. La capacidad calorífica de toda la sustancia ($C = c_p \Delta V$) que se encuentra en el volumen ΔV , se considera concentrada en el punto nodal. Los puntos nodales se unen entre sí por medio de unas barras que conducen calor, con resistencia térmica a la conductividad térmica R de la pared, cuyo espesor es igual a la distancia entre los nodos y el área igual al de contacto entre los volúmenes. Los nodos extremos, en dependencia de las condiciones de frontera, o bien se mantienen a una temperatura determinada, o bien intercambian calor con el medio que lo rodea. El sistema de nodos y de barras que conducen calor, se llama red (para un problema bidimensional éste en realidad parece una red) que se observa en la Figura 1.13.

Después de presentar el cuerpo examinado en forma de red, se plantean las ecuaciones de balance térmico para cada nodo. El sistema de ecuaciones de

balance representa por sí solo un análogo de diferencias de una ecuación diferencial de conductividad térmica en la que las derivadas están sustituidas por las razones de incrementos finitos (diferencias) de las variables independientes.

Por ejemplo, si las temperaturas iniciales en los nodos de la red mostrados en la Figura 1.13 son iguales a T_i (estas temperaturas se conocen a partir de las condiciones iniciales), y al transcurrir un intervalo de tiempo $\Delta\tau$ serán iguales a T_i' , siendo ésta última la temperatura en un instante posterior al inicial. Para cualquier nodo puede hallarse balance de calor, igualando la variación de la energía interna $c_i \rho_i \Delta V_i (T_i' - T_i)$ a la suma algebraica de las cantidades de calor ΔQ_τ que lleguen durante el tiempo $\Delta\tau$ por todas las barras conductoras de calor. De este modo, para el nodo quinto de la red, se tiene por ejemplo:

$$c_5 \rho_5 \Delta V_5 (T_5' - T_5) = \left[\frac{T_2 - T_5}{R_{2-5}} + \frac{T_4 - T_5}{R_{4-5}} + \frac{T_6 - T_5}{R_{6-5}} + \frac{T_8 - T_5}{R_{8-5}} \right] \Delta\tau \quad (1.56)$$

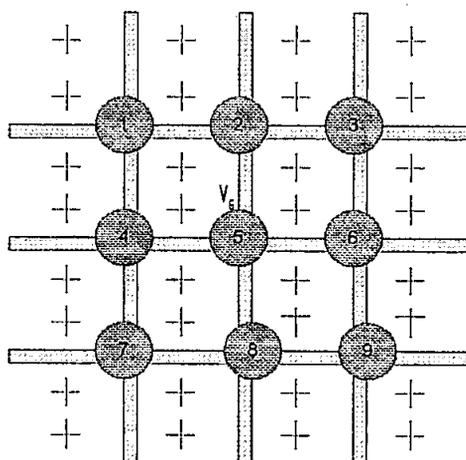


Figura 1.13. Tramo de una red numérica para un problema bidimensional de conductividad térmica

El número de tales ecuaciones será igual al número de los nodos. Además, para todos los nodos interiores las ecuaciones serán análogas, mientras que las ecuaciones para los nodos extremos tomarán en consideración las condiciones de frontera. Después de solucionar estas ecuaciones respecto a T_i' , se encuentra la temperatura de todos los nodos dentro de un intervalo de tiempo $\Delta\tau$ desde el comienzo del proceso. Luego, la distribución de la temperatura obtenida se toma por la temperatura inicial y la resolución se repite. Una repetición múltiple de éste cálculo permite encontrar la distribución de temperatura en los puntos nodales en cualquier momento de tiempo $\tau = N \Delta\tau$, donde N es el número de repeticiones del cálculo.

En las condiciones estacionarias ($T_i' \equiv T_i$) el primer miembro de la ecuación de balance (Ecuación 1.56) será igual a cero. Además, tampoco está prefijado el valor inicial de temperaturas. En este caso, la temperatura estacionaria de todos los nodos se encuentra a partir de la solución del sistema de todas las ecuaciones según el método de selección de los valores T_i . Las computadoras actualizadas en este tipo de método, poseen programas estandarizados para solucionar estos sistemas de ecuaciones.

En resumen, con la teoría cubierta en éste primer capítulo y tomando como referencia lo indicado en la norma ASTM D5334-92, se concluye que ésta última es capaz de medir el coeficiente de conductividad térmica, siempre y cuando se cumplan las condiciones establecidas en la misma.

Con este objeto se propone el siguiente sistema (Figura 1.14) que intentará automatizar la recolección de datos de temperatura y el cálculo que permita deducir el coeficiente de termoconductividad.

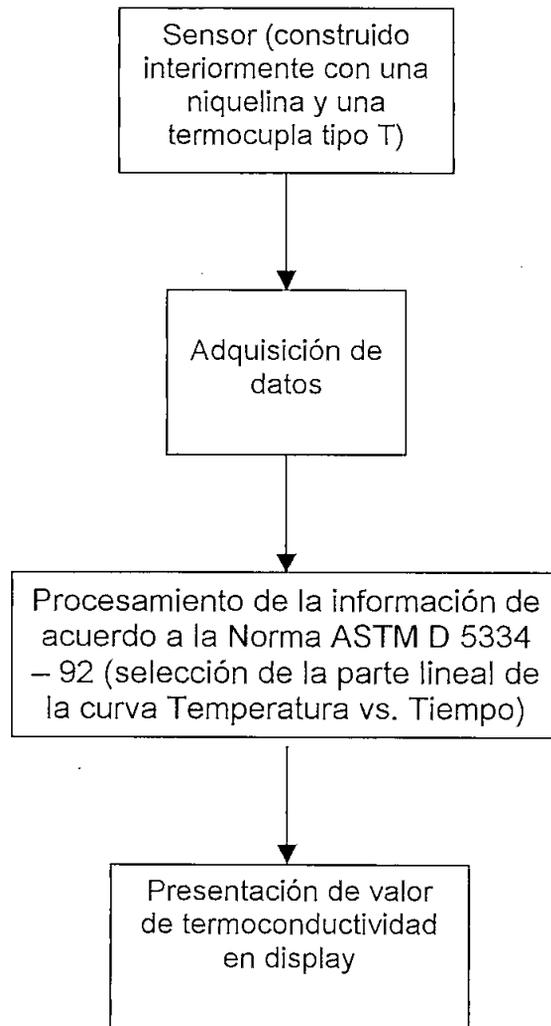


Figura 1.14. Diagrama de bloques del sistema propuesto.

A partir de este diagrama de bloques se pasa al diseño y construcción de los componentes de cada una de las etapas arriba indicadas.

CAPITULO II

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

CONTENIDO CAPÍTULO II

- 2.1 INTRODUCCIÓN
- 2.2 CONSTRUCCIÓN DEL SENSOR
- 2.3 FUENTE DE CORRIENTE
- 2.4 DISEÑO DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA (TERMOCUPLA TIPO T)
- 2.5 ETAPA DE AJUSTE
- 2.6 ETAPA DE PROTECCIÓN
- 2.7 DISEÑO DEL SISTEMA PARA DETERMINAR LA TERMOCONDUCTIVIDAD

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detalla el proceso seguido para diseñar y construir el hardware del sistema que aquí se reporta.

El medidor de termoconductividad está constituido por una punta de prueba que consta de una fuente de calor y de una termocupla tipo T para medir la temperatura dentro de la muestra (en base a la Norma ASTM D5334 - 92), un circuito de amplificación debido a que la señal de voltaje entregada por la termocupla está en el orden de los microvoltios, y por lo mismo imprescindible amplificarla hasta un rango manejable (de 0 a 5 voltios).

Una vez realizado el acondicionamiento de la señal de la termocupla, se ingresará a un microcontrolador, a través de un conversor análogo-digital, que se encargará de procesar los datos enviados por la termocupla, aplicando el procedimiento matemático indicado en la referida norma ASTM D5334 – 92, para determinar el valor de conductividad térmica correspondiente a la muestra. El resultado se mostrará en un display de cristal líquido, sea en unidades de: $[W / ^\circ K * m]$ ó en $[cal / ^\circ K * m * s]$.

El medidor de termoconductividad consta de las siguientes etapas (Figura 2.1):

- Sensor.
- Fuentes de Voltaje y corriente.
- Etapa de linealización.
- Etapa de protección.
- Procesamiento de la información.
- Etapa de visualización.

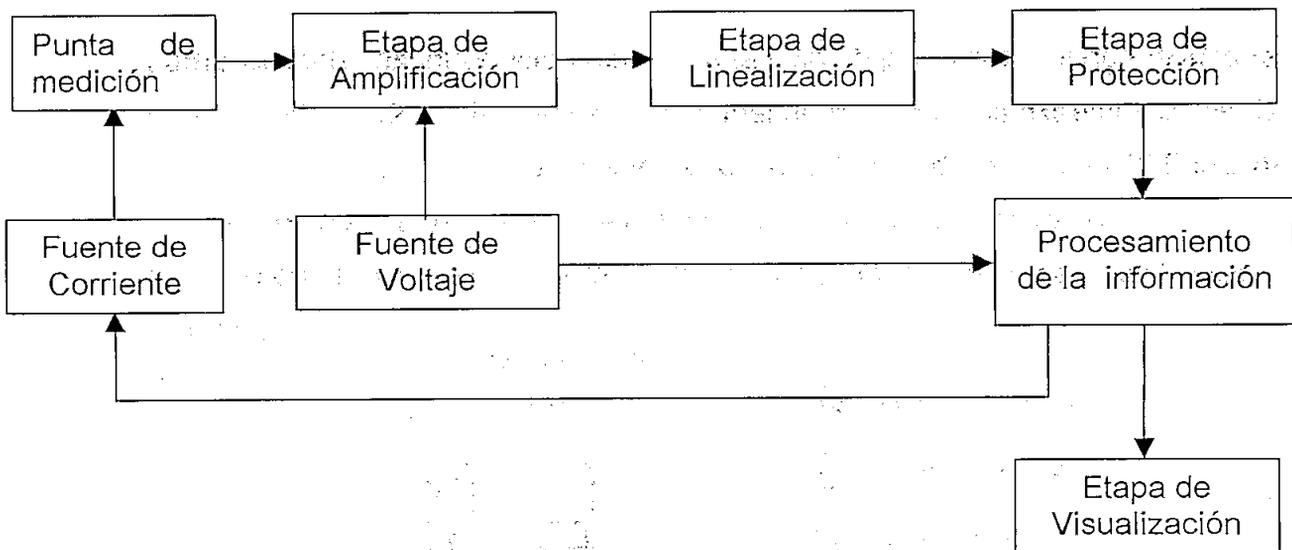


Figura 2.1 Etapas del hardware del medidor de termoconductividad

Tal como se mencionó, la punta de medición está constituido por una niquelina, que permite introducir calor a la muestra, y una termocupla tipo T, la misma que mide los valores de temperatura dentro de la muestra; pero esta señal es muy pequeña y susceptible al ruido, por tal razón ingresa a una etapa de amplificación para tener niveles de voltaje manejables, luego pasa por una etapa de linealización para obtener una salida proporcional a la entrada, la señal resultante se ingresa a un microcontrolador en donde se realizará el procesamiento de los datos para la determinación de la termoconductividad, cuyo valor se observará en un LCD.

En los numerales siguientes párrafos se describe cada una de las etapas con mayor profundidad.

2.2 CONSTRUCCIÓN DEL SENSOR

El sensor va en una vaina térmica muy delgada cuyas dimensiones, forma y componentes están especificadas en la norma ASTM D 5334-92.

La vaina térmica consiste de un tubo hipodérmico de acero limpio conteniendo un elemento calentador y una termocupla como se muestra en la Figura 2.2. Para construir la vaina térmica, se corta 115 mm (4 ½ in) de longitud del tubo hipodérmico. La termocupla de Cu – Constantán cubierta previamente con un

El extremo por el que sobresalen los alambres de la termocupla y de la niquelina de la vaina se inserta dentro de un frasco a través de un tapón de caucho. El otro extremo se coloca en un reservorio que contiene epoxy térmica como se muestra en la Figura 2.3. Una bomba de vacío conectada al frasco crea un vacío que ejerce una fuerza que absorbe la epoxy y llena la vaina completamente.

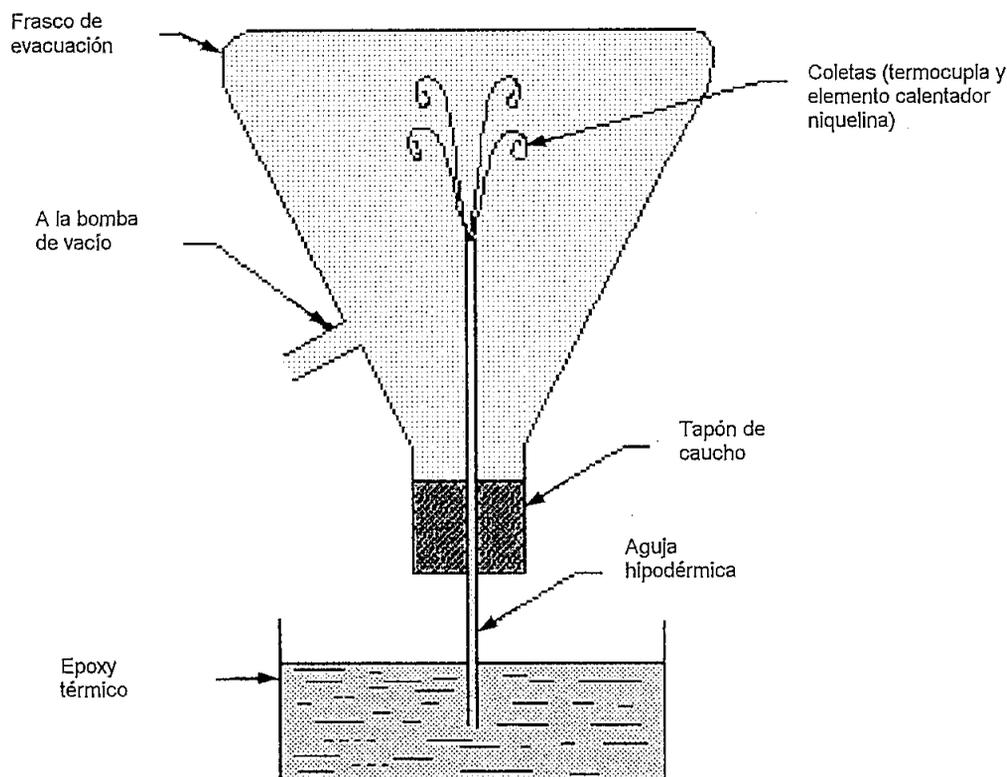


Figura 2.3 Forma en la que la epoxy se introduce dentro del vaina hipodérmica

La epoxy se usa por ser a la vez un conductor térmico y no eléctrico; de esta forma aísla eléctricamente los alambres de la termocupla con los del elemento calentador (niquelina).

Una vez llena de epoxy, se pone una pequeña cantidad de masilla en la punta de la vaina para sostener la epoxy térmica. Después de que la epóxica térmica se endurezca, los alambres de la termocupla se atornillan a los pines de un jack de termocupla para su posterior conexión al circuito de acondicionamiento.

Los alambres del calentador se sacan a través de dos agujeros en la parte posterior de la cabeza del jack (Figura 2.2)

Luego de realizar todos los pasos descritos, se verifica el completo aislamiento entre la termocupla, la niquelina y el tubo hipodérmico. Si se tiene una resistencia pequeña (cerca a cero ohmios), necesariamente la epóxica debe ser extraída del interior de la vaina térmica para volver a realizar su construcción.

La epóxica líquida se puede manipular con cierta facilidad dentro de un tiempo determinado por el fabricante, aproximadamente 10 minutos, antes de que tienda a secarse (en ambiente fresco). A partir de ese momento los alambres tanto de la termocupla como de la niquelina son difíciles de extraer del interior del tubo hipodérmico. Si se presenta una falla se tendrá que sacar toda la epoxy del interior de la vaina hasta dejarla completamente limpia. Para ello se expone al fuego la vaina hasta que llegue a 95°C que es cuando la epoxy se derretiría facilitando su remoción. Se debe tener precaución porque pueden ocurrir explosiones en el tubo debido a que la epoxy se inflama al superar su límite de temperatura.

2.3 FUENTE DE CORRIENTE

La norma ASTM D 5334-92 especifica en su texto que se requiere un elemento calentador ya sea de manganin o nicromo, entonces se escogió a la niquelina cuyas características son: soportar altas temperaturas, enfriamiento rápido y bajo costo.

Para entregar calor en forma constante se necesita una fuente de corriente constante de un valor igual a 900 mA.

Los reguladores de voltaje tienen como una de sus características un voltaje de referencia, que en la mayoría de los casos es de 1,25 V, siendo este valor constante. En virtud de este particular, se usan estos para implementar fuentes

de corriente constante de una manera fácil y segura. El valor de corriente es 0.9 A. Para escoger el regulador apropiado se tiene que sobredimensionar este valor, en el mercado existen reguladores de diversas capacidades de corriente: 500 mA, 1 A, 3 A, 5 A, 8 A, etc.

Como criterio de diseño se sobredimensiona tres veces el valor de corriente requerido, entonces se escoge el regulador de 3 A voltaje variable de 1,25 voltios a 30 voltios. El fabricante especifica que si se extrae 1/3 de su capacidad total es necesario usar un disipador, para evitar cualquier anomalía o desgaste en la vida útil del regulador y con ello mantener la temperatura del mismo dentro de los límites permitidos.

De acuerdo a lo descrito anteriormente se selecciona el regulador de voltaje LM338 al que se lo conecta en la configuración que se muestra en la Figura 2.4.

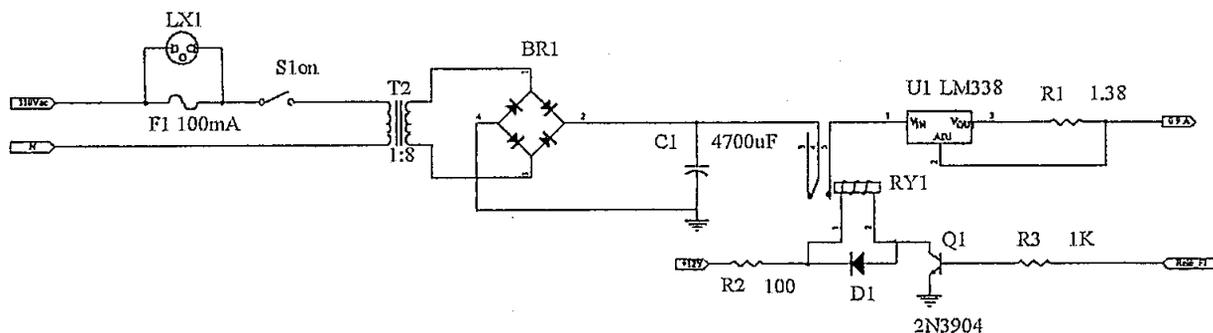


Figura 2.4 Fuente de Corriente

Si $V_{ref} = 1.25$ voltios, constante, se tiene:

$$R = \frac{V_{REF}}{I_o} = \frac{1.25V}{0.9A} = 1.388 \Omega \approx 2.7 \Omega \parallel 2.7 \Omega$$

$$P = I_o^2 * R = 0.9^2 * 1.25 = 1.125 W \quad (2.1)$$

Se selecciona dos resistencias de 2.7Ω en paralelo, con una potencia de 5 W.

El rizado de voltaje afecta a este regulador, y como este parámetro tiene que ver con el valor del capacitor colocado luego del rectificador, se escoge un condensador recomendado en las hojas de datos¹⁶, el mismo que se da en un rango de acuerdo al voltaje de DC o voltaje pico al que se cargará este elemento. De las hojas de datos se opta por $C = 470 \mu\text{F}$.

2.4 DISEÑO DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA (TERMOCUPLA TIPO T)

La termocupla tipo T constan de dos materiales cobre y constantán (Ni-Cr), su coeficiente de Seebeck es aproximadamente de $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Para el acondicionamiento se seleccionó un amplificador de instrumentación de Analog Devices, el AD595CQ que está particularmente diseñado para termocuplas tipo K. Pero si se observa las curvas de temperatura versus voltaje, tanto de esta termocupla como de la tipo T, se puede concluir que en el rango requerido para el presente proyecto, existe una diferencia muy pequeña. Además, el coeficiente de Seebeck de la tipo K es de $40.44 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ muy similar al de la termocupla tipo T. Por otro lado, en el amplificador de instrumentación, se puede calibrar la ganancia y lograr tener en su salida $10 \text{mV}/^\circ\text{C}$, claro está, también linealizado.

La estructura interna del AD595CQ se puede observar en el Anexo B2, y el circuito diseñado se presenta en la Figura 2.5.

A la entrada positiva del AD595CQ (Figura 2.5), se conecta un capacitor electrolítico cuyo valor es de $0.1 \mu\text{F}$, el cual sirve para la eliminación de ruido (recomendado por el fabricante).

¹⁶ En Anexo 2 se puede observar las hojas de especificaciones del regulador de voltaje LM338

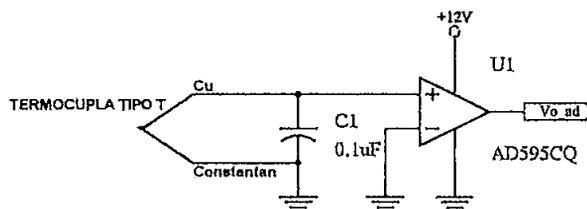


Figura 2.5 Diseño con el amplificador de instrumentación

Este capacitor junto con la resistencia que presenta el alambre de la termocupla, forman un filtro pasabajos, el cual atenúa algunas frecuencias de ruido indeseables, y se evita los errores producidos por el mismo.

En la Figura 2.5 se observa que a la entrada positiva del amplificador de instrumentación (pin #1), se coloca el alambre de Cu de la termocupla (tipo T) y en la entrada negativa (pin #14) el otro extremo de la termocupla; es decir, el alambre de Constantán (Ni-Cu). Cabe indicar que al no conectar a tierra uno de los extremos de la termocupla, se observa unos corrimientos del voltaje de salida.

La salida del amplificador de instrumentación (pin #8), presenta valores de voltaje en el orden de las decenas de los milivoltios, por tal razón, es necesario amplificar esta señal para tener voltajes más manejables.

2.4.1 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

Los valores de voltaje que proporciona el AD595CQ versus el cambio de temperatura se pueden observar en la Figura 2.6.

Se toma como referencia el circuito de la Figura 2.5 y con el "Baño de María"¹⁷ se procede a medir, tanto la temperatura dada por el termómetro digital como el voltaje a la salida del amplificador de instrumentación medido con un osciloscopio digital.

¹⁷ Aparato que se usa en prácticas de Instrumentación, disponible en el Laboratorio del mismo nombre

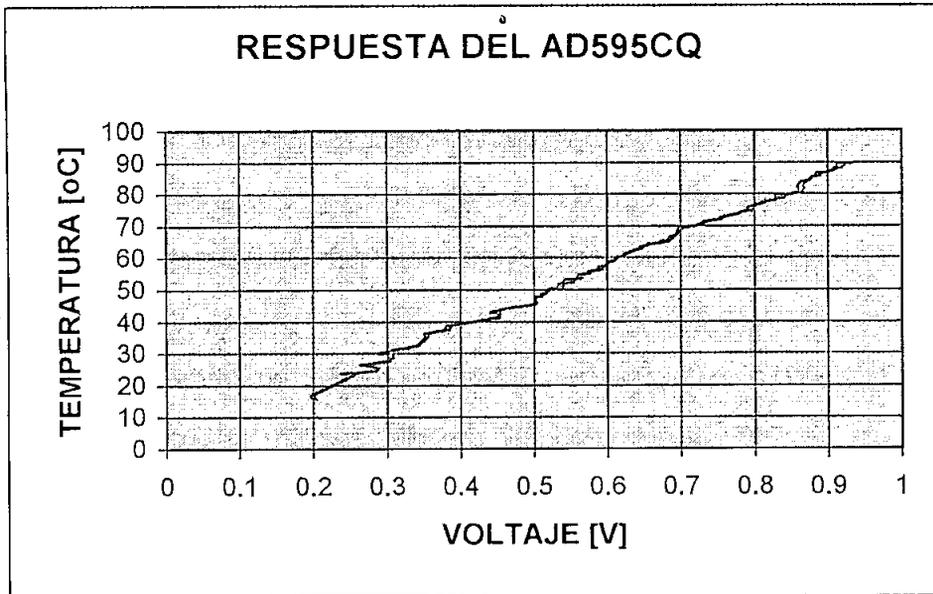


Figura 2.6 Curva Voltaje vs. Temperatura para el AD595CQ

En la Figura 2.6 se puede ver que la respuesta a la variación de temperatura aplicada a la muestra se halla en el orden de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Este es el voltaje que se amplificará hasta lograr valores normalizados de voltaje (0 a 10 V), los mismos que equivaldrán al rango de variación de temperatura de 0 a 100°C .

Para amplificar la señal de la termocupla se diseña un circuito inversor con amplificadores operacionales. Los valores finales del circuito de amplificación se muestran en la Figura 2.7

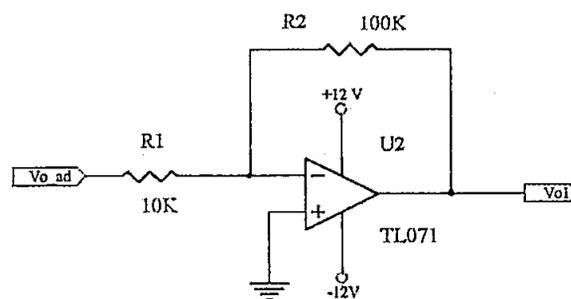


Figura 2.7 Etapa de amplificación

Como se conoce, la respuesta de las termocuplas no es lineal, por lo mismo es necesario linealizar la señal entregada por la etapa de amplificación, para tener una respuesta lineal de voltaje respecto a la temperatura.

2.5 ETAPA DE AJUSTE

Si se analizan los voltajes que presenta el AD595CQ (Figura 2.6), se puede deducir que existe un error en la medición que va de 0.2 a 0.5 V lo que corresponde a 2 y 5 °C respectivamente, además en el rango requerido para el medidor no se necesita una etapa de linealización; por lo tanto, solo se diseña una etapa de ajuste para que este error se minimice y cumplir con lo estipulado en la norma ASTM D 5334-92, la misma que exige un error de 0.1 °C.

2.5.1 DISEÑO DE LA ETAPA DE AJUSTE

En esta etapa se busca la atenuación necesaria sobre la ganancia de la etapa de amplificación (Figura 2.7) y obtener a la salida una variación de voltaje adecuada para la entrada del conversor A/D del microcontrolador.

Se usa un amplificador no inversor, cuya ganancia está dada por la siguiente relación:

$$V_o = -\frac{R_f}{R_s} * V_{in} \quad (2.2)$$

En el caso presente, se utilizan potenciómetros de precisión tanto en la resistencia de entrada (R_s) como en la resistencia de salida (R_f). El circuito se observa en la Figura 2.8.

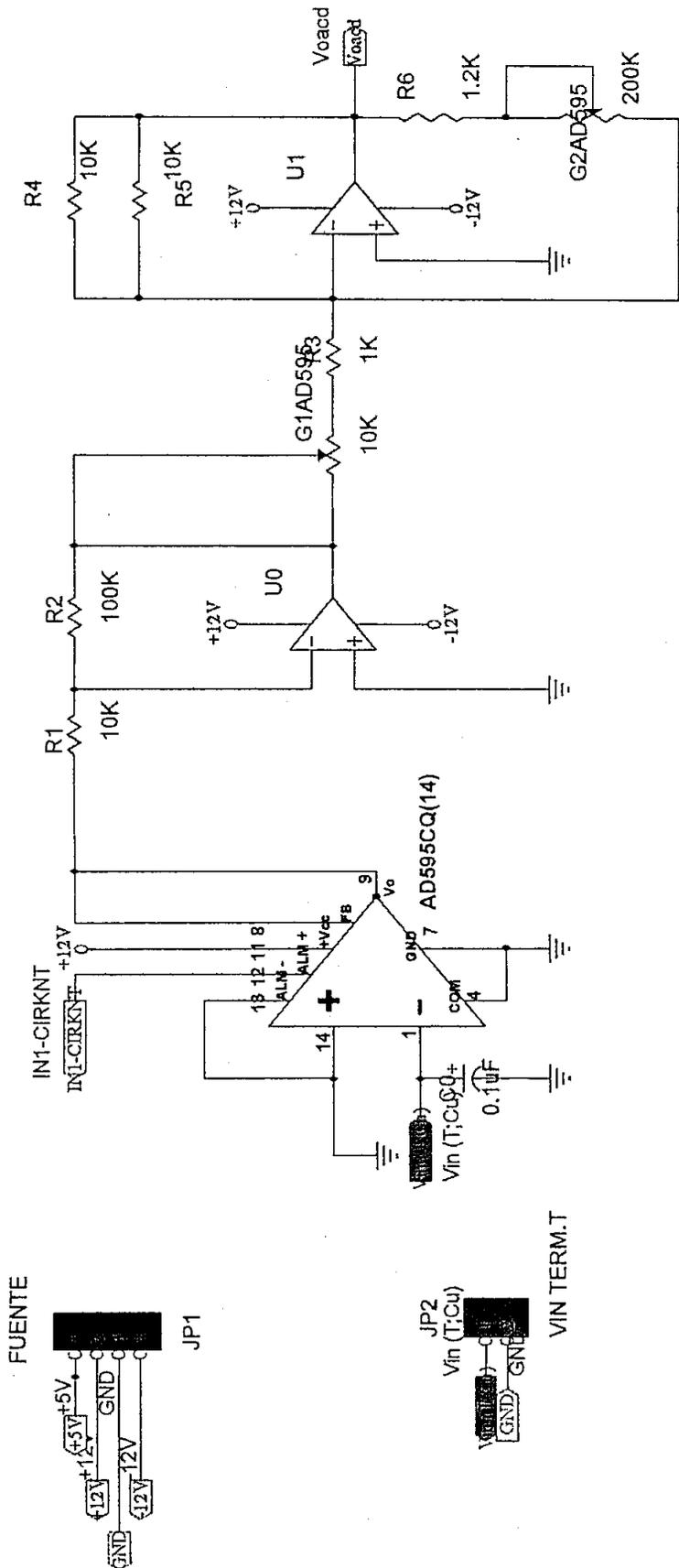


Figura 2.9 Circuito de acondicionamiento de la termocupla tipo T

2.6 ETAPA DE PROTECCIÓN

El siguiente circuito tiene como función proteger a los elementos que forman parte de la fuente de emisión de calor, así como para indicar si la termocupla está rota o desconectada.

- Se limita el rango de variación de la temperatura a sensar entre 0 a 93 °C; es decir, de 0 a 9.3 V (0 a 4.65 V), para proteger al sensor, porque al estar interiormente relleno de epoxy, si sobrepasa la temperatura límite de ésta última, el sensor sufriría un daño irreparable y tendría que ser reconstruido nuevamente. Para activar la protección, se debe enviar una señal TTL al microcontrolador, el cual se encargará de apagar en ese instante la fuente de corriente constante.
- Cuando el nivel de temperatura sea menor a 0 °C, el microcontrolador dará una señal de advertencia de que no se está trabajando con muestras de tierra o roca suave, ya que la temperatura de éstos últimos en condiciones normales se encuentra alrededor de 10 a 15 °C (Temperatura ambiente).

De esta forma el microcontrolador permitirá discernir que problema surgió, y dar una advertencia a la persona que está realizando la prueba.

El diseño de este circuito de control (obsérvese en la Figura. 2.10) incluye dos amplificadores operacionales funcionando como comparadores cuyas salidas van a ser +Vcc o -Vcc, dependiendo de los valores en sus entradas, que son los niveles de voltaje de referencia expuestos en los puntos anteriores. Luego de estos comparadores, existe una etapa de inversión y de amplificación, realizada por un amplificador sumador inversor. En esta etapa los voltajes de entrada tienen como valor máximo 5.1 voltios que corresponden al voltaje del diodo zener. Con esta consideración, en la salida total del circuito de protección se tiene un voltaje dado por:

$$V_o = -\frac{R_f}{R} * (V_{Z_1} + V_{Z_2}) = -7.5$$

$$\frac{-7.5}{5.1} = -1.47 = \text{Ganancia para cada entrada}$$

$$\frac{R_f}{R} = 1.47 \rightarrow R_f = 15 \text{ K}\Omega \quad R = 10 \text{ K}\Omega$$

En este circuito (Figura 2.10) se tiene las siguientes condiciones:

- Si el voltaje $V_{oacd} < V_{sobretemperatura}$ y $V_{oacd} > V_{baja \text{ temperatura}}$, es decir, en condiciones normales de funcionamiento
 Salida del comparador 1: + Vcc
 Salida del comparador 2: + Vcc
 A la entrada del sumador inversor:
 Entrada 1: 0 V
 Entrada 2: 0 V
 Salida del sumador inversor: 0 V.
- Si el voltaje $V_{oacd} > V_{sobretemperatura}$ y $V_{oacd} > V_{baja \text{ temperatura}}$, es decir, cuando exista el error de sobretemperatura:
 Salida del comparador 1: - Vcc
 Salida del comparador 2: + Vcc
 A la entrada del sumador inversor:
 Entrada 1: - 5.1 V
 Entrada 2: 0 V
 Salida del sumador inversor: 5 V
- Si el voltaje $V_{oacd} < V_{sobretemperatura}$ y $V_{oacd} < V_{baja \text{ temperatura}}$, es decir, cuando exista el error de baja temperatura (temperatura bajo cero):
 Salida del comparador 1: + Vcc
 Salida del comparador 2: - Vcc
 A la entrada del sumador inversor:
 Entrada 1: 0 V
 Entrada 2: - 5.1 V
 Salida del sumador inversor: 5 V

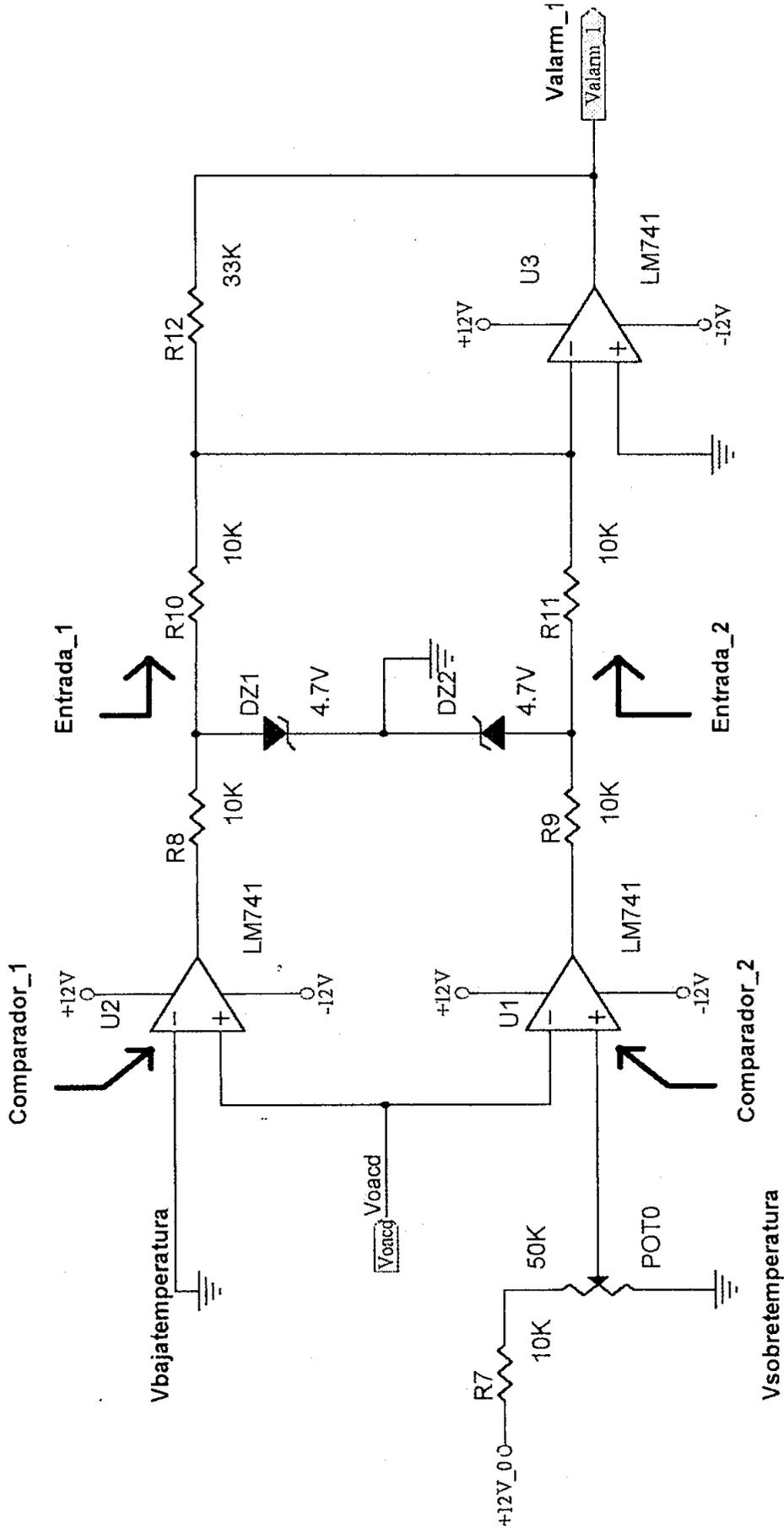


Figura.2.10 Circuito de control para limitar la variación de temperatura que detecta el sensor y verificación si es que existe desconexión de la termocupla

El amplificador de instrumentación AD595CQ¹⁸, proporciona una señal de alarma (0 voltios) cuando la termocupla está rota o desconectada, a través del pin # 12 (+ALM) y el pin # 13 (-ALM).

Internamente el AD595CQ posee un transistor NPN (Figura 2.11) que es la salida de alarma, el cual estará apagado en funcionamiento normal y externamente se coloca una resistencia pull up de 20 K Ω (recomendación del fabricante) la misma que pondrá en la salida del pin 12 o +ALM un estado alto; según con que valor de voltaje se alimenta en los pines 11 y 7 del AD595CQ . Si uno o los dos alambres de la termocupla se interrumpen, el pin 12 o +ALM bajará al estado de cero lógico.

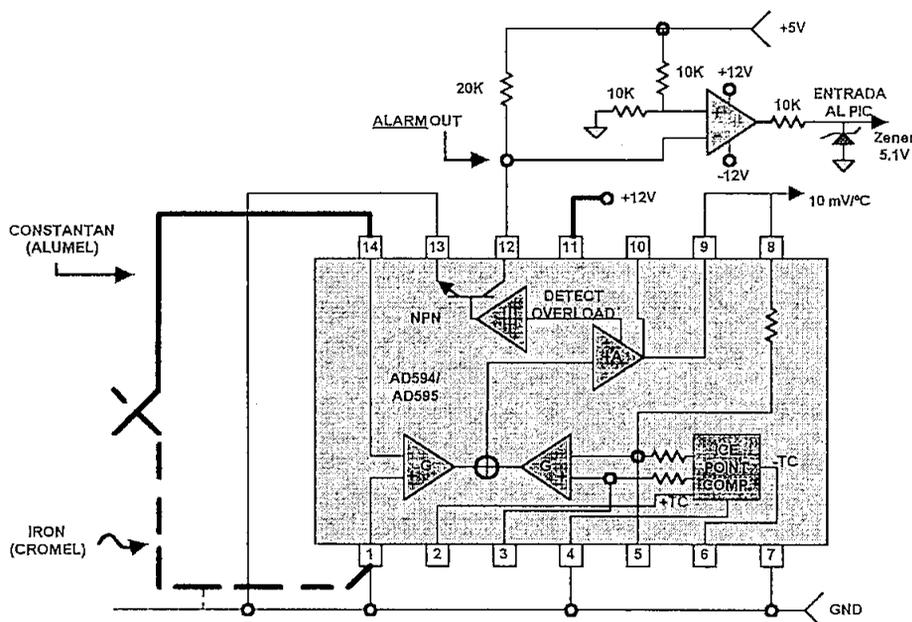


Figura 2.11 Circuito de alarma proporcionado por el amplificador de instrumentación.

La alarma puede usarse con las dos fuentes duales de alimentación o con una sola fuente. Las salidas del colector o emisor del transistor pueden usarse con normalidad como interruptor.

Vale la pena indicar que el terminal + ALM (pin 12) corresponde al colector de un transistor NPN que tiene una capacidad de corriente limitada de aproximadamente 20 mA, pero puede manejar un led directamente sin ningún problema.

¹⁸ Las hojas de especificaciones se hallan en Anexo 2

En éste proyecto los voltajes de alimentación que alimentan a éste dispositivo son duales (+12 V y -12 V), por lo tanto el pin 7 se conecta a -12 V y no a tierra. Además, en el colector (pin 12) se conecta un amplificador operacional (LM741), el cual actúa como comparador de voltaje con respecto a una señal de referencia. Cuando la termocupla no está desconectada o no sufre de ruptura, el colector del amplificador de instrumentación se satura con un valor de +5 V y cuando éste contacto deja de existir el colector se pone en bajo, es decir, 0 V.

El circuito completo de la etapa de amplificación, linealización o ajuste y protección se observa en la Figura 2.12

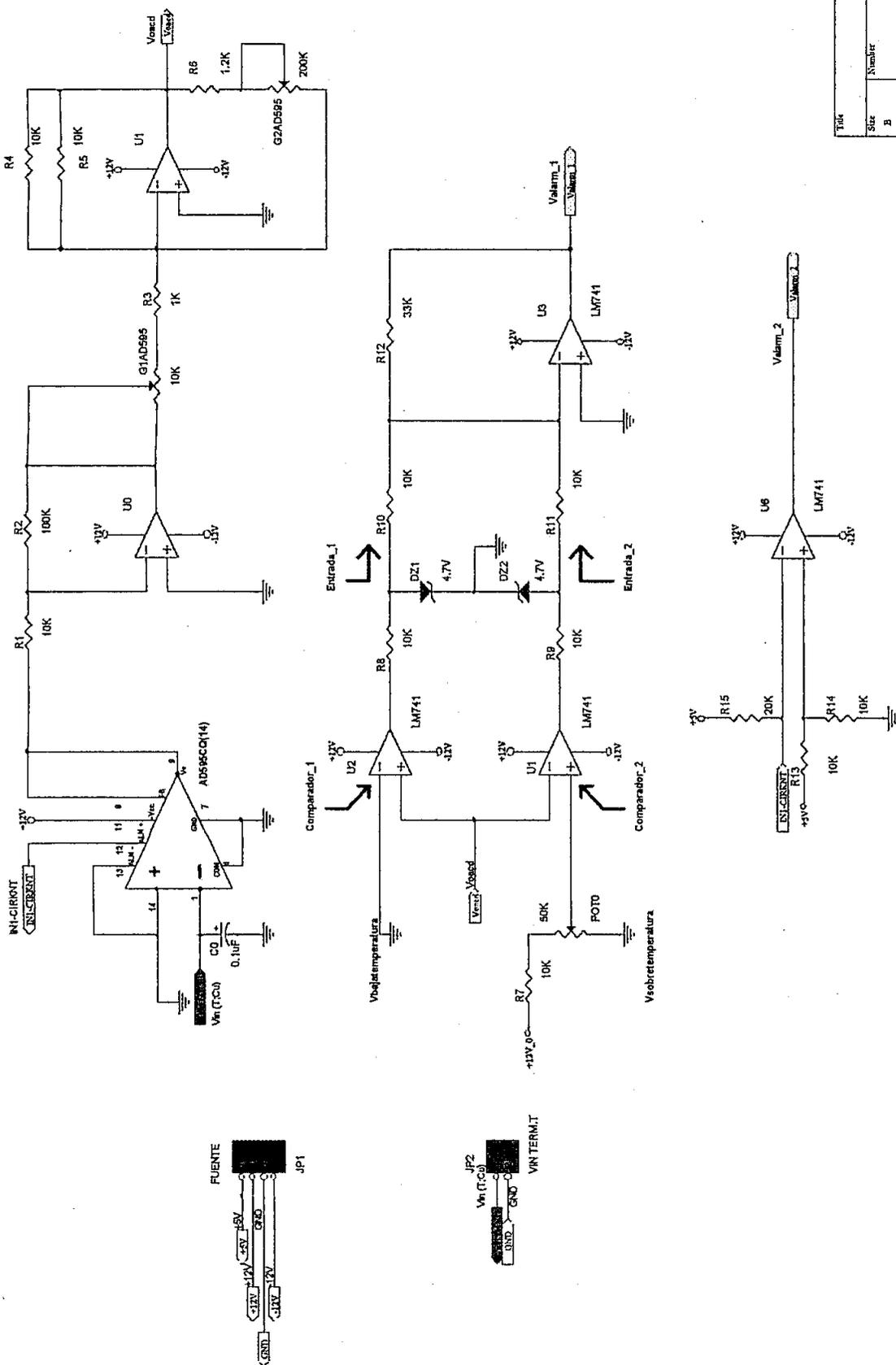


Figura 2.12 Circuito completo para el acondicionamiento de la termocupla tipo T y protecciones

Tiempo	
Tamaño	B
Número	

2.7 DISEÑO DEL SISTEMA PARA DETERMINAR LA TERMOCONDUCTIVIDAD

La señal entregada por la termocupla sirve para que un sistema automático colecte los valores de temperatura cada cierto tiempo (especificado por la norma) desde la muestra bajo observación. Con los valores medidos el sistema debe calcular el valor de la termoconductividad aplicando los pasos también especificados en la norma. Este sistema automático se diseña en este numeral.

2.7.1 EL PIC 16F870

En el mercado existe un gran número de PICs los cuales se dividen en cuatro familias: enana, mediana, grande y extragrande.

Microchip, el fabricante de estos PICs, presenta muchas opciones a un costo bajo en el mercado, esto hace que el ingeniero puede seleccionar, de toda la gama, el más adecuado para una aplicación específica.

Se decidió realizar el diseño en base al PIC 16F870¹⁹ de la Microchip, para la construcción del medidor de termoconductividad aunque existe la posibilidad de usar el PIC 16F876, pero los precios no varían mucho entre estos dos, y sus características no los distancian.

Por lo tanto las características necesarias que posee el PIC 16F870 para éste proyecto, son:

- 2Kx 14 palabras de memoria FLASH EEPROM de programa.
- 128 X 8 bytes de memoria de datos (RAM)
- 64 X 8 bytes de memoria de datos (EEPROM)
- Cinco canales analógicos-digitales.
- Once fuentes de interrupción.

¹⁹ Especificaciones técnicas refiérase al Anexo 2

- Comunicación serial con el USART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter).
- Dos timers de 8 bits y uno de 16 bits.
- Tres puertos para entrada y salida (22 pines).

Existen dos formas de programar un PIC y dependen del voltaje de operación (V_{DD}).

La primera manera o el algoritmo 1, es diseñado para un rango de $2.2 V \leq V_{DD} \leq 5.5 V$. Algoritmo 2 se usa para un rango de $4.5 V \leq V_{DD} \leq 5.5 V$.

El primer método permite el modo de programación normal aplicando un voltaje (V_{PP}) de $13 V \pm 0.5 V$ en MCLR, RB7 y RB6 se usan para ingreso de datos y el reloj respectivamente. El segundo método, llamado voltaje bajo ICSP o LVP, permite al PIC16F870 ser programado usando solamente V_{DD} , sin embargo, cuando este modo es habilitado por un bit de configuración (LVP), el PIC16F870 dedica el RB3 para controlar entrada/salida en el modo de programación. Entonces RB3 y MCLR se pone a V_{DD} para entrar en el modo de programación, todas las otras especificaciones para alto voltaje son aplicadas.

La Tabla 2.1 muestra la descripción de los pines usados durante la programación.

Pin	Durante la programación		
	Función	Tipo de pin	Descripción
RB3	PGM	I	Entrada de programación en bajo voltaje (LVP = 1)
RB6	CLOCK	I	Entrada de reloj
RB7	DATA	I/O	Entrada y salida de datos
MCLR	V _{TEST MODE}	P*	Selecciona el modo de programación
V _{DD}	V _{DD}	P	Fuente de poder
V _{SS}	V _{SS}	P	Ground

Tabla 2.1 Terminales del PIC16F870 durante la programación

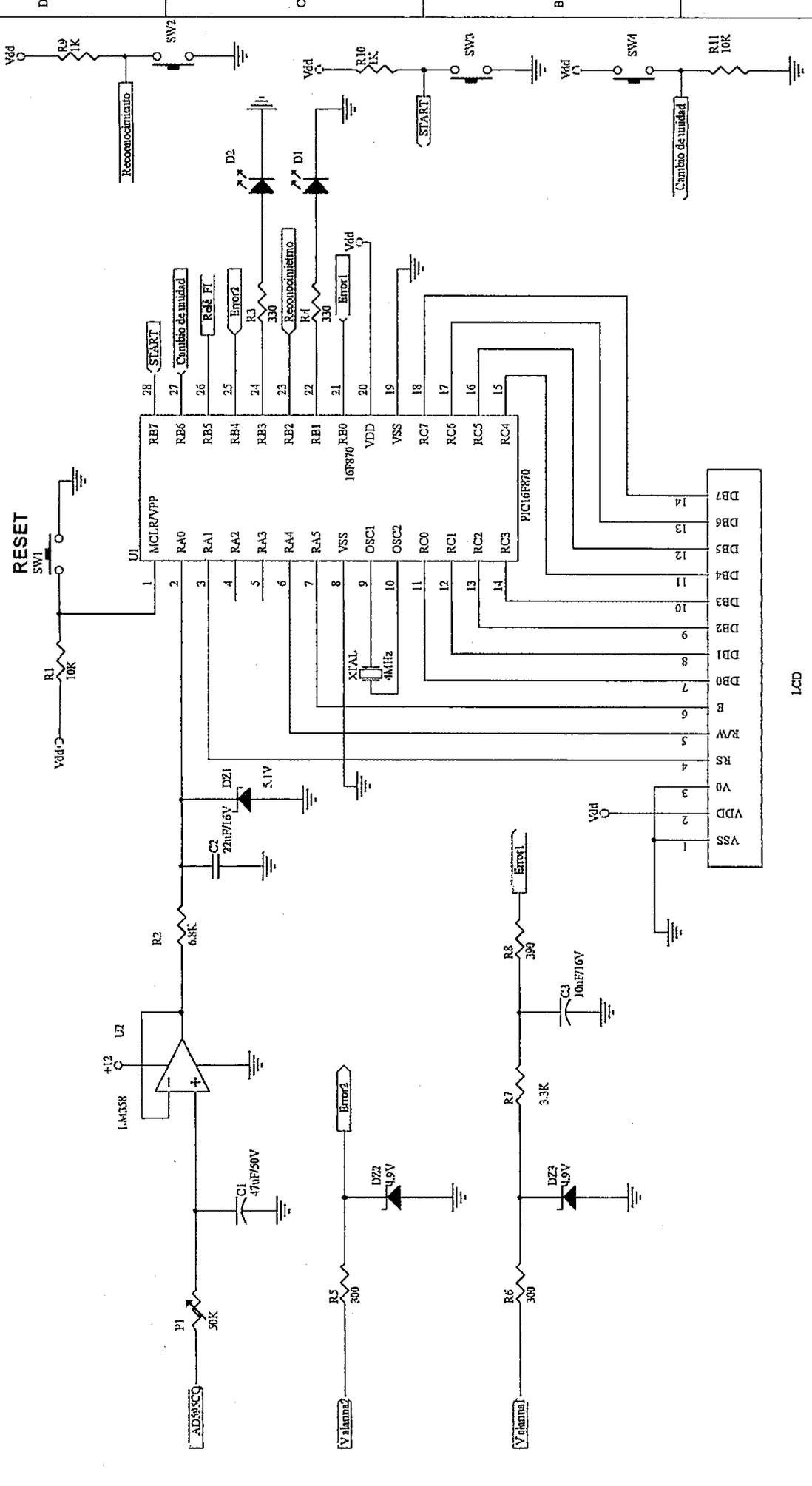
I = Input, O = Output, P = Power.

* Para activar el modo de programación, necesita aplicar alto voltaje (13 voltios) en la entrada MCLR.

En el proyecto se usa la programación en alto voltaje; es decir, aplicando 13[V] en V_{PP}.

2.7.2 DESCRIPCION DEL HARDWARE PARA EL MICROCONTROLADOR

En el diagrama circuital de la Figura 2.13, se puede observar las conexiones del microcontrolador 16F870.



Título: HARDWARE DEL MICROCONTROLADOR

MEDIDOR DE

TERMOCONDUCTIVIDAD

Revisión:

Hojas: 1 de: 1

Número:

Fecha:

Figura 2.13 Diagrama esquemático para el hardware del PIC

LCD

La señal analógica que viene desde el acondicionador de termocupla, llega a través de un filtro pasa bajos y de un seguidor de voltaje conectándolo al canal 0 (AN0) que en el PIC corresponde al pin RA0; el primer circuito permite disminuir el ruido y es diseñado para filtrar frecuencias mayores a 60 Hz, de esta forma:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.4)$$

Si $C = 10 \mu\text{F}$ de 16 V, se tiene:

$$R = \frac{1}{2\pi * 30 * 10 * 10^{-6}} = 530 \Omega$$

Se escoge una resistencia estándar, la más cercana es de 520Ω a $\frac{1}{4}$ W.

El seguidor de voltaje, cuya característica es que su impedancia de entrada es baja, y la impedancia de salida es alta con lo cual se acoplan circuitos, admite que el voltaje que se tiene en la entrada pase totalmente a la salida sin pérdidas significativas.

No se usa capacitores conectados con el cristal porque estos tienen importancia cuando se realiza comunicación serial. El cristal es de 4 MHz, se conecta entre OSC1 y OSC2.

Se usa la interrupción externa 0 (RB0) para determinar si existe error en la conexión de la termocupla, el amplificador de instrumentación (AD595CQ) proporciona esta señal; en el momento en que sucede el error, se enciende un led indicador de desconexión o rotura de la termocupla deteniéndose el programa de su transcurso normal.

Usando la interrupción por cambio de estado del puerto del PIC (RB4), se tiene el error para el sensor cuando se halla fuera de la muestra o sobretemperatura; de manera similar al error anterior el programa se desvía de su espacio corriente, se enciende un led indicador que se encuentra unido a RB3.

Al suceder cualquiera de los dos errores, la fuente de corriente es desconectada de la niquelina, protegiendo al sensor, el técnico quien está realizando la prueba, debe presionar el botón de reconocimiento, y permitir que el programa pase a otra fase de presentación de mensaje, sino reconoce, el programa permanece en un lazo infinito.

El programa nunca puede retomar su transcurso normal luego de haber sucedido alguna falla, sólo puede retornar si se resetea al PIC; es decir, la prueba empezaría de nuevo, para ello se debe esperar un tiempo moderado hasta que el sistema regrese a las condiciones iniciales (equilibrio térmico)

En RB5 se conecta un transistor el cual al saturarse activa un relé que permite el paso de corriente al regulador LM338 para funcionar la fuente de corriente, en el programa del PIC, al empezar la adquisición de datos, se envía un 1 lógico (5 V) a través del pin RB5 activando la fuente de corriente, similarmente al terminar la adquisición de datos, se coloca un 0 lógico en RB5, con ello el relé se desactiva, apagándose dicha fuente.

En RB6 está colocado un pulsador que accede a la opción de cambio de unidad, entre $W / m^{\circ}K$ o $[cal / s *m^{\circ}K]$.

El resultado del valor de termoconductividad y demás mensajes se presentan en un display de cristal líquido (LCD MDL_16264⁴), el mismo que se halla conectado en todos los pines del puerto C y en algunos del puerto A(RA1, RA4, RA5).

⁴ Hojas de datos de éste display observarlas en Anexos 2.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CÁLCULO

CONTENIDO CAPÍTULO III

- 3.1 INTRODUCCIÓN
- 3.2 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR
- 3.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA
PRINCIPAL SUBROUTINAS
 - 3.3.1 SUBROUTINAS DE MANEJO DE LCD
 - 3.3.2 SUBROUTINA DE CONVERSIÓN A/D
(CON_A_D)
 - 3.3.3 SUBROUTINA MENSAJE
 - 3.3.4 SUBROUTINA TIEMPO
 - 3.3.5 SUBROUTINA LECTURA
 - 3.3.6 SUBROUTINA RESTA
 - 3.3.7 SUBROUTINA CLEAR
 - 3.3.8 SUBROUTINA INT_EX0
 - 3.3.9 SUBROUTINA MULTIPL
 - 3.3.10 SUBROUTINA DIVI_16
 - 3.3.11 SUBROUTINA RESTAR
 - 3.3.12 SUBROUTINA REST_32
 - 3.3.13 SUBROUTINA BCD

3.1 INTRODUCCIÓN

Tal como hasta aquí se ha mencionado, la norma ASTM D 5334 – 92 especifica en que momentos se debe medir la temperatura de la muestra hasta que transcurran 1080 segundos como mínimo. También especifica como se debe proceder para calcular el coeficiente de termoconductividad desde los datos medidos; estos es, encontrar la parte más lineal en la curva de los valores tomados, calcular la pendiente de la recta y de allí aplicar la Ecuación 1.1 para encontrar el coeficiente. Estas son las tareas que debe cumplir el algoritmo a desarrollarse dentro del microcontrolador que forma parte de este sistema; es decir, el PIC16F870.

El programa, a más de realizar el algoritmo de cálculo para la determinación de la termoconductividad, debe también manejar periféricos de entrada de datos, así como la señal análoga que ingresa al conversor A/D en el interior del PIC y enviar el resultado de cálculo al display de cristal líquido (LCD). El programa desarrollado para el microcontrolador consta de varias subrutinas que son llamadas desde un programa principal. A continuación se explica, mediante el uso de diagramas de flujo, el funcionamiento lógico del mismo.

3.2 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

Las fases del algoritmo de cálculo se pueden observar en la Figura 3.1

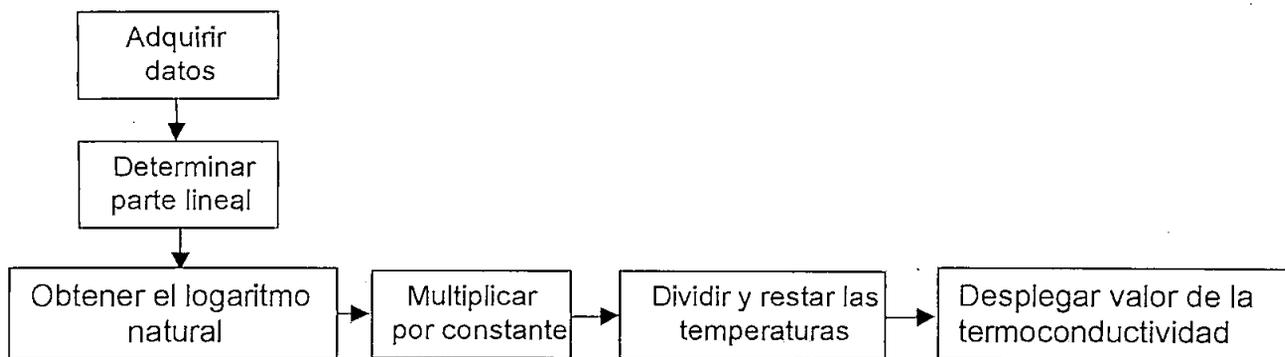


Figura 3.1 Diversas etapas para el cálculo de la termoconductividad

El mapa de memoria que se usa es el mostrado en la Figura 3.2.

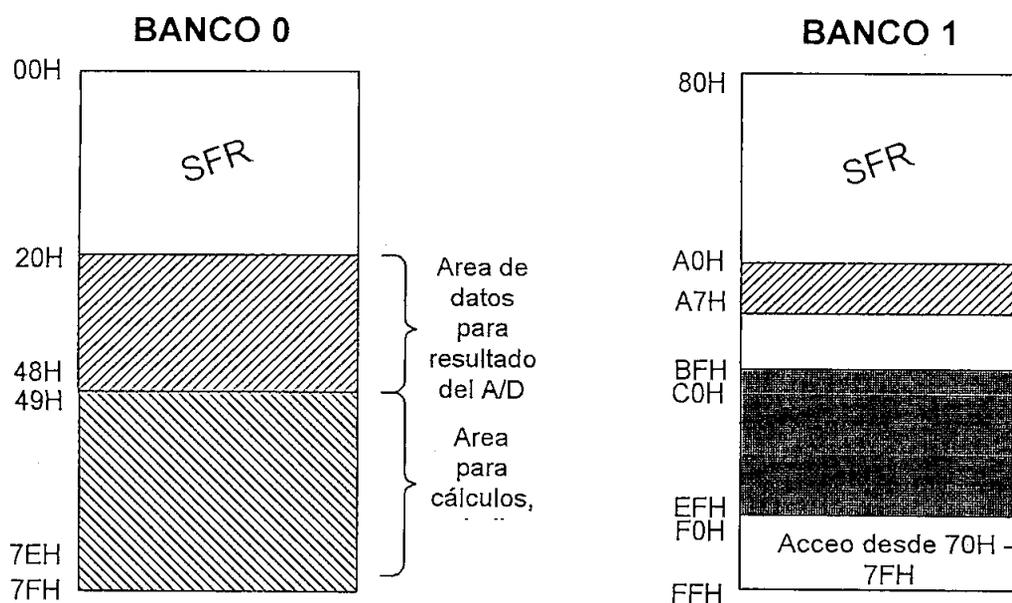


Figura. 3.2 Mapa de memoria para el PIC 16F870

El **SFR** (Special Function Registers) es el lugar donde se hallan los registros de propósito específico, los mismos que permiten realizar tareas puntuales o determinadas, se encuentran tanto en el banco 0 como en el banco 1. Su ubicación está desde la localidad 0H (80H en el banco 1) hasta la 1FH (9FH en el banco 1), por lo tanto quedan libres desde la localidad 20H hasta la 7FH en el

banco 0 y desde la A0H hasta la BFH en el banco 1; en esta área se hallan los registros de propósito general que son aquellos en los que se puede almacenar datos o realizar alguna operación.

Los datos entregados por el conversor A/D, se va almacenando desde la localidad 20H. Se colectan datos en los tiempos: 0, 5, 10, 15, 30 segundos y desde allí en intervalos de 30 segundos hasta completar 1080 segundos, siendo por lo tanto necesario 41 localidades. Es fácil calcular que los datos se extenderán hasta la localidad de memoria 48H. En el banco 1 se usan únicamente 8 localidades para almacenar la respuesta en código binario o hexadecimal.

Se utilizan 104 bytes de la memoria de datos RAM, distribuidos en el banco 0 y banco 1 del microcontrolador, puesto que el PIC16F870 tiene disponible solamente dos bancos.

A continuación se empieza por describir el programa que ejecuta el control descrito.

3.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y SUBROUTINAS

El programa principal es el núcleo del software de soporte. Siguiendo las reglas de una buena programación estructurada, al algoritmo principal se lo divide en varias subrutinas, particularmente para aquellas tareas que son repetitivas.

A continuación se describe como se emplearon los puertos del PIC para poder facilitar la explicación y comprensión del algoritmo desarrollado, esto se observa en la Figura 3.3.

El LCD es conectado al **Puerto C** (buffer tipo Schmit Trigger) y al **Puerto A** (buffer TTL), el bus de datos del display se acopla a los pines RC0 hasta RC7 mientras

que las señales de control RS, R/W y E van hacia RA1, RA4, RA5, respectivamente.

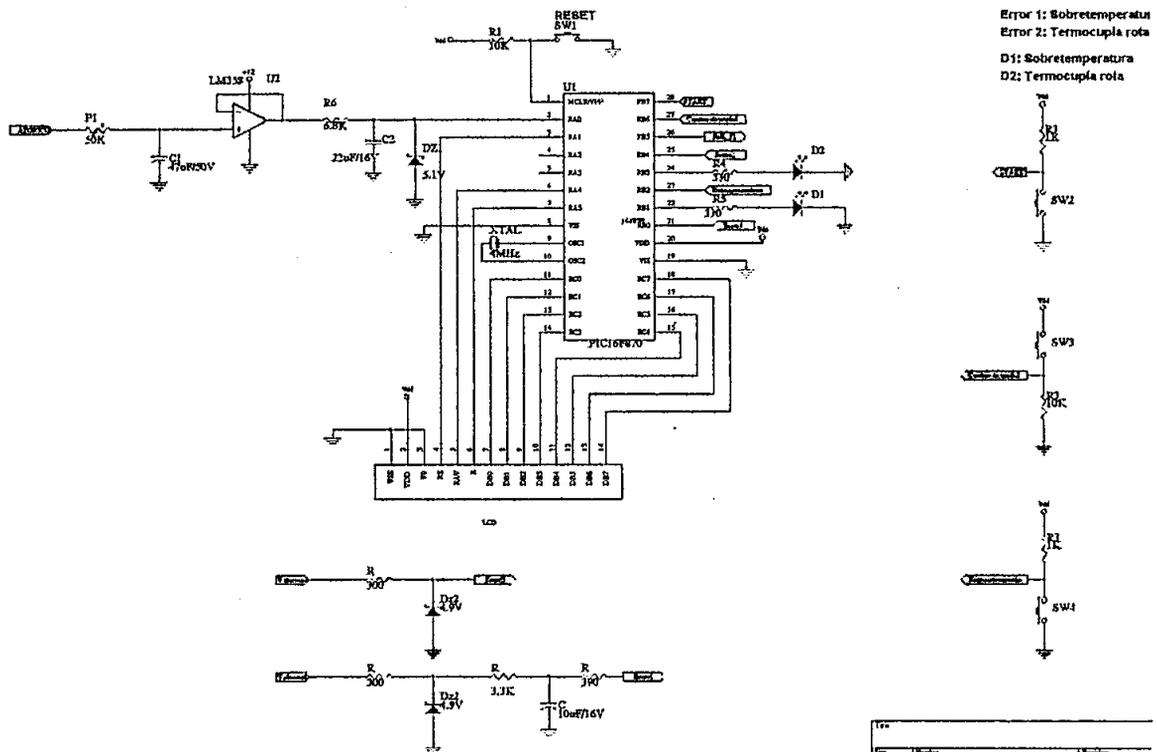


Figura 3.3 Hardware del microcontrolador

Se deja libre los pines RA2 y RA3 para cambiar el voltaje de referencia con el que trabajará el conversor A/D interno del microcontrolador; es decir, define los niveles de voltaje a los cuales le corresponde el valor mínimo del A/D (00H) y el valor máximo (FFH). En el caso presente se tiene un voltaje de referencia de 0 a 5 voltios; el valor digital 00 le corresponde el voltaje de 0 voltios, y a FFH le corresponde el voltaje máximo, 5 voltios.

Los leds indicadores de error, interrupción externa, interruptor para cambio de unidad, pulsador para comenzar la medición, entradas para comprobación de errores, reconocimiento de fallas y accionamiento de la fuente de corriente

ingresan al **Puerto B** (buffer Schmit Trigger y TTL), que en general sirve para el control del medidor de termoconductividad.

RA0 es configurada como entrada analógica, se utiliza para ingresar niveles de voltaje análogos desde el amplificador de señal hacia el conversor A/D del PIC 16F870. En esta entrada se coloca un diodo zener de 5.1 voltios, que sirve como protección contra sobrevoltajes, evitando que el voltaje de entrada suba sobre 5 voltios.

El diagrama de flujo del programa principal se muestra a continuación en la Figura 3.4.

El programa principal se encarga de la presentación de mensajes e inicialización de los registros usados, además debe determinar la parte lineal de los datos de temperatura adquiridos mediante el conversor A/D, y con estos calcular el coeficiente de termoconductividad aplicando la relación dada por la norma ASTM D 5334 – 92. El microcontrolador realiza operaciones de multiplicación, división y transformación a BCD solamente mediante sumas y restas sucesivas. La presentación del resultado, como también mensajes de alarma o de alerta se hace mediante el display.

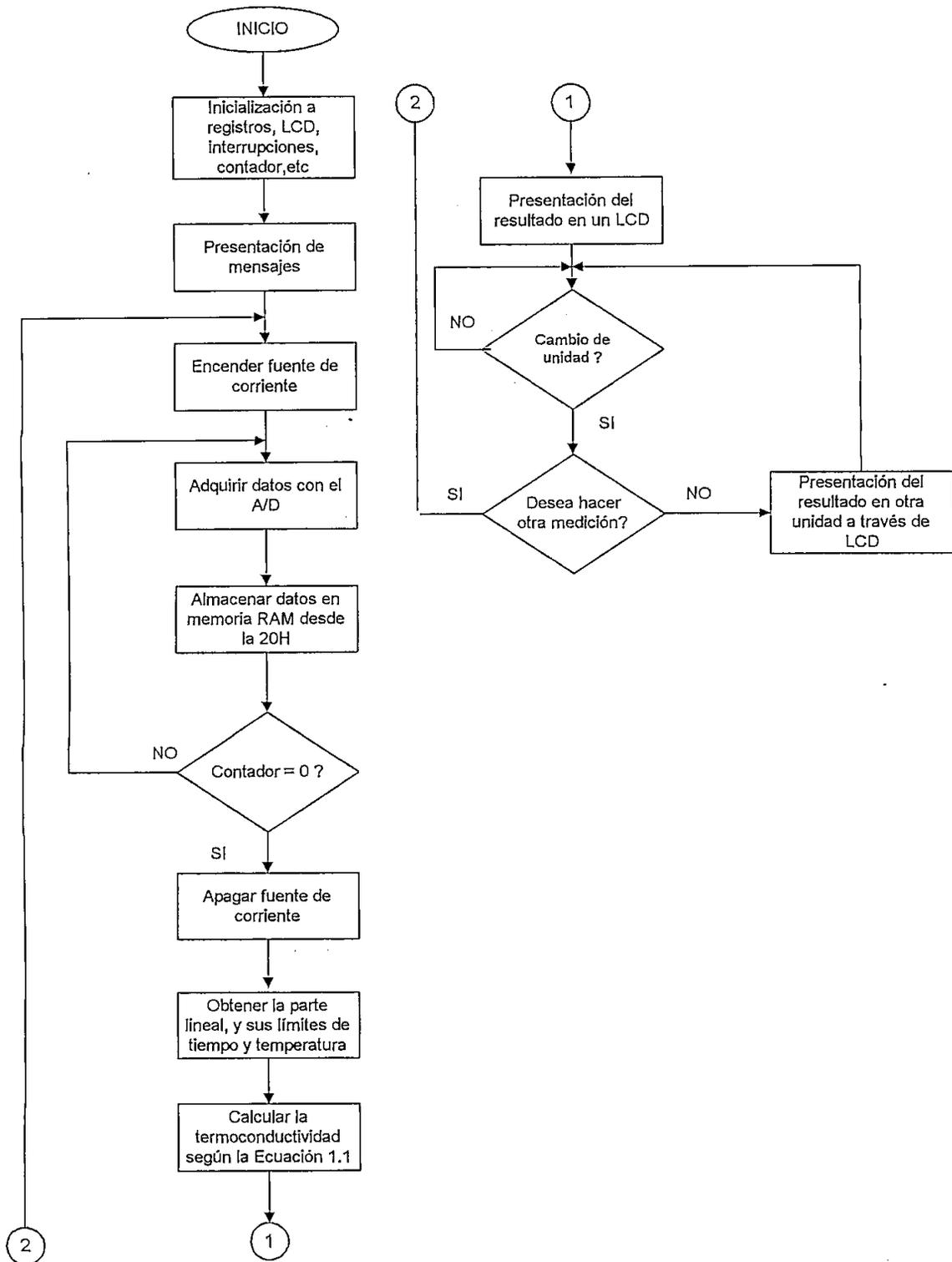


Figura 3.4 Programa Principal

En el programa principal se define en primera instancia las etiquetas de las variables del programa, se define el vector de interrupción que se halla en la dirección 0004H, se inicializan los registros de ciertas funciones, especiales (**SFR**) y se configuran los puertos de acuerdo al hardware conectado; es decir, como entrada o como salida. Luego se habilitan las interrupciones:

El primer mensaje que se observa llamando a las tablas **Mens_1** y **Mens_1_1**, que van en la primera y segunda línea respectivamente, es:

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

A continuación, luego de dar el tiempo suficiente para su correcta visualización, se borra el display con la ayuda de la subrutina **LCD_CLEAR** y se llama al segundo mensaje (**Mens_2** y **Mens_2_2**):

PROYECTO DE TITULACION

Igualmente, se lo despliega un tiempo adecuado y luego se muestra el siguiente mensaje (**Mens_3** y **Mens_3_3**), que dice:

MEDIDOR DE TERMOCONDUCTIVIDAD

Luego se presenta el mensaje:

DIBSON LLERENA
MARIO ERAZO

Posteriormente aparece un mensaje que indica al usuario iniciar el proceso de medición en el momento que desee:

PULSE START PARA EMPEZAR MEDICION

Luego de presionar **START** se da un tiempo de 5 minutos para que el sistema (medio ambiente, muestra y vaina térmica) entre en equilibrio. Durante este tiempo se presenta el siguiente mensaje:

SISTEMA ENTRANDO EN EQUILIBRIO

Terminados los 5 minutos, a través de RB5 se da un pulso de 5 voltios a un relé que conecta la fuente de corriente al elemento calentador (niquelina). Este instante constituye el tiempo cero, al cual se adquiere el primer valor de temperatura (temperatura inicial). Luego de 5 segundos se recoge el segundo dato, luego de 10 segundos se almacena otro dato y a los 15 segundos, se mide el cuarto dato, y así sucesivamente hasta completar todas las mediciones según la norma ASTM D 5334 – 92; lo cual da 40 datos en 1080 segundos.

Con el símbolo | visto en el LCD se puede determinar cuantos datos se han adquirido, pero solamente los que empiezan en intervalos de 30 segundos; es decir, 36 valores. Como el display posee 2 filas de 16 caracteres cada una, se tendría 32 como máximo. Al sobrepasar este límite, el LCD se borra y los cuatro símbolos restantes son ubicados en la primera fila.

Cada valor de temperatura se almacena con direccionamiento indirecto desde la localidad 20H hasta la localidad 48H.

Una vez que se han almacenado los datos, empieza en sí el cálculo de la termoconductividad. La ecuación para su cómputo es:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \operatorname{Ln}\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

donde:

$$Q = \text{calor de entrada} = \frac{I^2 R}{L} = \frac{E I}{L} \quad [\text{W / m}]$$

De los datos se tiene que determinar una parte en la que la temperatura es lo más lineal con respecto al tiempo, establecer sus límites en los dos ejes (temperatura vs tiempo) los cuales pasan a ser los valores temperatura final T_2 , temperatura inicial T_1 , tiempo final t_2 y tiempo inicial t_1 .

Para acceder a los valores almacenados en memoria RAM se usa direccionamiento indirecto, por lo que se carga en primera instancia al **FSR**, el cual sirve de puntero, 20H para iniciar el cálculo. En general la evaluación se hace de la siguiente manera:

Se va comparando en grupos de 4 valores, almacenados en registros auxiliares de 8 bits de la memoria de datos RAM (**rest1**, **rest2**, **rest3**, **rest4**). Se ejecuta la resta entre los dos primeros **rest2** y **rest1**, que da un resultado1, luego se sustrae **rest4** menos **rest3** que proporciona el resultado2, seguido se restan los dos resultados. Con el indicador **Z** (bit zero) del registro **STATUS** en el microcontrolador se establece si los intervalos son iguales o no. En caso de no ser iguales, se desplaza el puntero (**FSR**) una localidad más y se repite el procedimiento descrito anteriormente; es decir, se forma un nuevo grupo y se repite lo ya indicado. En caso de ser iguales, se sale del lazo de comparación, los límites de la sección lineal tanto para la temperatura como para el tiempo se almacenan en la memoria de datos RAM.

Las subrutinas **LECTURA** y **RESTA**, las cuales se analizarán posteriormente, ayudan a comparar los datos adquiridos.

El logaritmo natural del tiempo se halla en una tabla en la memoria EEPROM del programa, cuyos valores se obtuvieron de la siguiente manera: el entero más significativo del logaritmo de 1080 segundos es 6, por lo tanto solo existe unidades no decenas. Para conseguir su equivalente en hexadecimal, se decidió multiplicar el resultado real por mil, despreciar los decimales y del número entero encontrar su equivalente hexadecimal, por ejemplo:

$$\ln(90) = 4,4998096$$

Se toma en cuenta en decimal solo 4499. Su correspondiente número en hexadecimal es 1193 H. Este valor se graba en dos bytes de la tabla. Como se requiere 36 valores de logaritmo natural, en la tabla se hallarán el doble de bytes, es decir 72 .

Al momento de presentar el resultado final (en el LCD) se considera los decimales acumulados a lo largo del cálculo y se ubica el punto decimal.

Los límites de tiempo de la región lineal se hallan grabados en dos registros de la memoria de datos, se debe restar el offset de 20H, debido a que a partir de esta dirección se hallan grabados los datos de temperatura. Para obtener la lectura correcta del logaritmo natural, a este resultado se le multiplica por dos (porque el logaritmo de cada número se halla en dos localidades).

Primero se extrae el byte menos significativo (LSB), se almacena en un registro auxiliar, seguido llega el byte más significativo (MSB) y de manera similar se guarda en una localidad auxiliar, esto se realiza para el tiempo final t_2 y tiempo inicial t_1 .

Según la ecuación para la termoconductividad, los logaritmos naturales de los extremos de la zona lineal se deben restar, esto se logra con la ayuda de la subrutina **RESTAR**.

A continuación se realiza la multiplicación por la constante $\frac{I^2 R}{4 \pi L}$, donde la corriente $I = 0.9$ A, $R = 6 \Omega$ y la longitud $L = 0.25$ m, en hexadecimal corresponde a: 1306H

Debido a que se realiza una multiplicación de números de 2 bytes cada uno, se obtiene un resultado en 4 bytes, por lo que se realiza un algoritmo de cálculo que por facilidad utiliza la subrutina de multiplicación de números de 8 bits (**MULTIPL**) que se estudiará más adelante. Este algoritmo consta de 4 multiplicaciones de 8 bits; es decir, todas las combinaciones posibles entre dos números de 16 bits separando 8 bits para el más significativo y 8 bits para el menos significativo en cada uno de los operandos. Esto se explica de mejor manera gráficamente en la Figura 3.5:

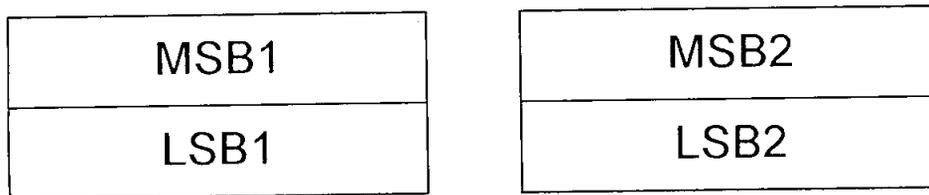


Figura 3.5 Números de 16 bits cada uno

Según lo explicado:

$$\text{MSB1} * \text{MSB2} = \text{D}$$

$$\text{MSB1} * \text{LSB2} = \text{C}$$

$$\text{LSB1} * \text{MSB2} = \text{B}$$

$$\text{LSB1} * \text{LSB2} = \text{A}$$

Para obtener el resultado correcto se tiene que sumar de la siguiente manera:

$$\text{Multiplicación de dos números de 16 bits} = \text{A} + \text{B00} + \text{C00} + \text{D0000}$$

Los ceros en la expresión anterior representan un desplazamiento del respectivo resultado hacia la izquierda.

El resultado de la multiplicación se almacena en registros de memoria RAM desde el banco 0.

Seguido continua la división del resultado para la diferencia de temperaturas de la parte lineal, $T_2 - T_1$. La subrutina que permite realizar lo descrito se llama **DIVI_16**,

la cual requiere cargar los números del dividendo en tres registros de propósito general, mientras que el divisor está en un registro de 8 bits, y el resultado se presenta en 2 bytes. En este instante ya se tiene el valor de termoconductividad de la muestra pero para la presentación en el display es necesario transformar a código decimal o BCD, esto se logra con la llamada a la subrutina de transformación denominada BCD.

La opción presente en el medidor para cambiar de unidad entre $[W / ^\circ K * m]$ o $[cal/^{\circ}K * m * s]$ obliga a multiplicar al último resultado por una constante adicional 0.2398 que es la equivalencia de un watio en calorías sobre segundo. A esta respuesta nuevamente se la transforma a código decimal con la subrutina BCD.

Para una correcta presentación en el LCD, en el momento de enviar el resultado se coloca el punto decimal de acuerdo al número de cifras decimales que se fueron acumulando en el proceso de cálculo con el algoritmo implementado.

Es importante considerar el orden de las operaciones matemáticas en el algoritmo; es decir, primero se realiza la multiplicación, luego la división y por último la conversión a BCD. Otra opción podría haber sido en el orden: división, multiplicación y BCD porque la fórmula lo permite, pero es este caso se introduce un error, por ejemplo:

Suponiendo que la parte lineal tiene los límites: $T_1 = 62^{\circ}C$, $T_2 = 65^{\circ}C$, $t_1 = 510$ s, $t_2 = 600$ s.

La constante del medidor de termoconductividad se calcula:

$$cte = \frac{I^2 * R}{4\pi * L} = \frac{1.03^2 * 5.7}{4\pi * 0.25} = 1.9248 \left[\frac{W}{m} \right]$$

Realizando las operaciones en código hexadecimal, pero primero la multiplicación, se obtiene:

$$\lambda = \frac{I^2 * R}{4\pi * L} * \frac{\ln(l_2) - \ln(l_1)}{T_2 - T_1}$$

$$\lambda = 132C * \frac{18FD - 185A}{A6 - 9E} = \frac{C3504}{8} = 186A0$$

Que equivale a: $186A0 = 1000000$

Como en el logaritmo natural se acumulan 3 cifras decimales y de igual manera al sacar la constante, el valor de termoconductividad será de:

$$\lambda = 1000000 \times 10^{-6} = 0.1 \left[\frac{W}{K * m} \right]$$

Si se ejecutara en primera instancia la división el resultado es:

$$\lambda = 98160 \times 10^{-6} = 0.9816 \left[\frac{W}{K * m} \right]$$

El valor realizando los cálculos en decimal es:

$$\lambda = 103460 \times 10^{-6} = 0.10346 \left[\frac{W}{K * m} \right]$$

En la Tabla 3.1 se puede apreciar el error existente que justifica optar por la primera opción, primero multiplicar y luego dividir.

	PRIMERO MULTIPLICACION	PRIMERO DIVISIÓN	VALOR REAL
	0.1	0.09816	0.10346
ERROR	3.3%	5.12%	0.10346

Tabla 3.1 Error introducido al realizar operaciones en diferente orden

3.3.1.2 Subrutina LCD_INI

Esta subrutina se encarga de realizar la secuencia de inicialización del módulo LCD de acuerdo con los tiempos dados por el fabricante (5ms).

El diagrama de flujo de esta subrutina se observa en la Figura 3.7.

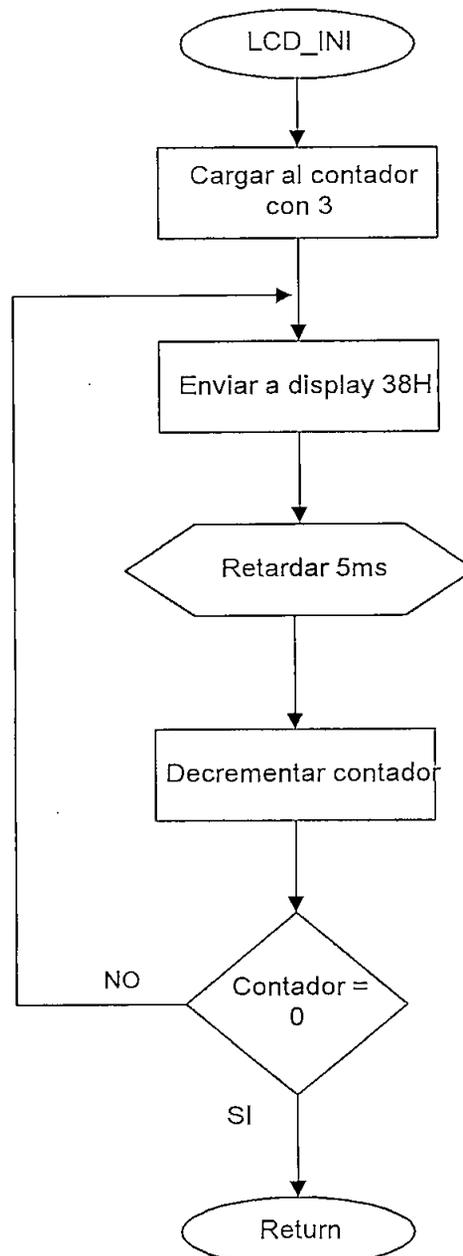


Figura 3.7 Subrutina LCD_INI

Se envía el número 38 hexadecimal que en las especificaciones técnicas significa **Funtion Set** y cada parámetro representa:

38 H = 0 0 1 1 1 0 0 0 B

↓ ↓ ↓
 DL N F

DL = Interfaz de 8 líneas con el bus del PIC (1).

N = Dos líneas de 16 caracteres (1).

F = Matriz de 5 x 7 píxeles (0).

Se transporta tres veces esta cifra binaria para asegurar que el LCD obtenga la configuración descrita.

3.3.1.3 Subrutina LCD_REG

Esta subrutina pasa el contenido cargado en el registro de trabajo **W**, el cual contiene un carácter ASCII, al LCD. Este código da un comando a través del Puerto C para su respectiva ejecución.

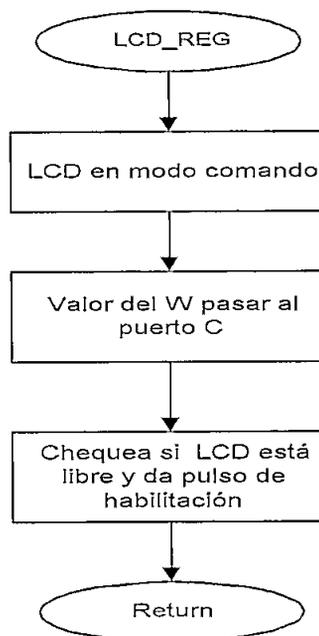


Figura 3.8 Subrutina LCD_REG

El diagrama de flujo de esta subrutina se observa en la Figura 3.8.

3.3.1.4 Subrutina LCD_DATO

El diagrama de flujo de esta subrutina se observa en la Figura 3.9.

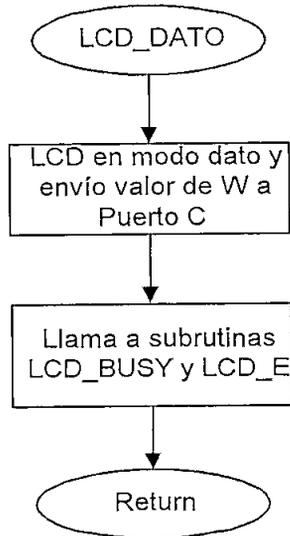


Figura 3.9 Subrutina LCD_DATO

Permite transmitir el dato cargado en el registro de trabajo **W**, que posee un carácter ASCII, al **Puerto C** para visualizarlo en el LCD. Es similar a la anterior subrutina que envía un comando. Interiormente llama a dos subrutinas **LCD_BUSY** y **LCD_E** que permiten lograr el propósito de envío de datos.

3.3.1.5 Subrutina LCD_BUSY

Su diagrama de flujo se observa en la Figura 3.10.

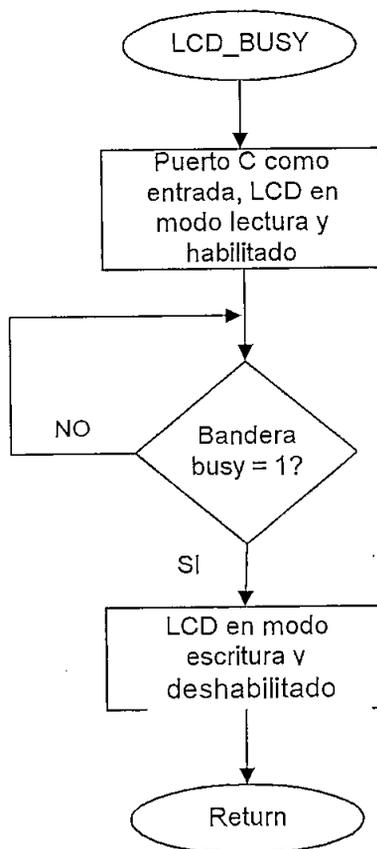


Figura 3.10 Subrutina LCD_BUSY

Con esta subrutina se chequea el estado de la bandera **BUSY** del módulo LCD, que indica si ya ha terminado de ejecutar el comando anterior, siempre y cuando el LCD se halle habilitado ($E = 1$). Esta subrutina espera a que se complete cualquier comando anterior antes de retornar al programa principal y así poder enviar otro comando.

El tiempo de espera depende del comando que se esté ejecutando; además, estos retardos vienen especificados en las hojas proporcionadas por el fabricante.

3.3.1.6 Subrutina LCD_E

Esta subrutina activa al LCD, para lo cual debe generar un pulso de $1\ \mu\text{s}$ (para una frecuencia de oscilación de 4MHz), a través del pin RA5 del **Puerto A** que se halla conectado a la señal E (Enable) del módulo LCD. El diagrama de flujo de esta subrutina se observa en la Figura 3.11.

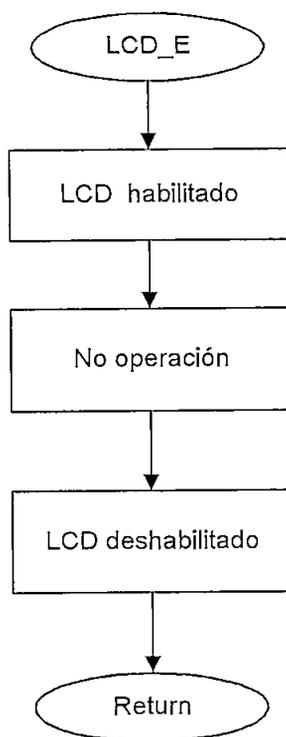


Figura 3.11 Subrutina LCD_E

Consta de tres instrucciones, una envía 1 lógico a ENABLE (LCD habilitado), espera $1\ \mu\text{s}$ (No operación o NOP), y se transmite 0 lógico a ENABLE (LCD deshabilitado).

3.3.1.7 Subrutina LCD_CLEAR

Con esta subrutina se logra, además de limpiar el display, también ubicar al cursor en la posición inicial (dirección 0) del módulo LCD. Sirve para que una vez visualizado un mensaje o resultado, se borre y presente otro.

El diagrama de flujo de esta subrutina se observa en la Figura 3.12.

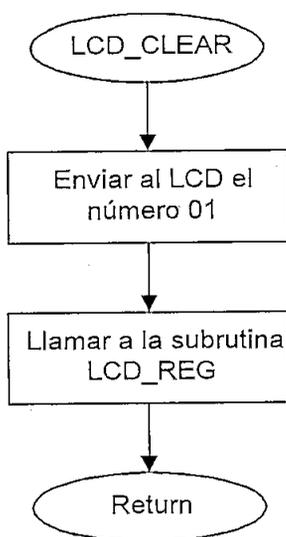


Figura 3.12 Subrutina LCD_CLEAR

La estructura de la subrutina consta únicamente del envío de un comando o instrucción denominado **CLEAR DISPLAY** cuyo código es el 01. Hace uso de la subrutina **LCD_REG** que permite enviar comandos.

A continuación se presenta una secuencia de comandos que deben ser transmitidos con la ayuda de la subrutina **LCD_REG**, luego de la inicialización del display con **LCD_INI**, para una correcta visualización.

Recordar que en la rutina de inicialización ya se envía el código de instrucción de **Function Set (38H)** tres veces.

microcontrolador y depende de la selección del reloj para la conversión A/D. En el presente proyecto se seleccionó $8T_{OSC}$, al trabajar con un cristal de 4MHz esto equivale a aproximadamente $1.6 \mu s$. Se elige esta opción por software en el registro **ADCON0**.

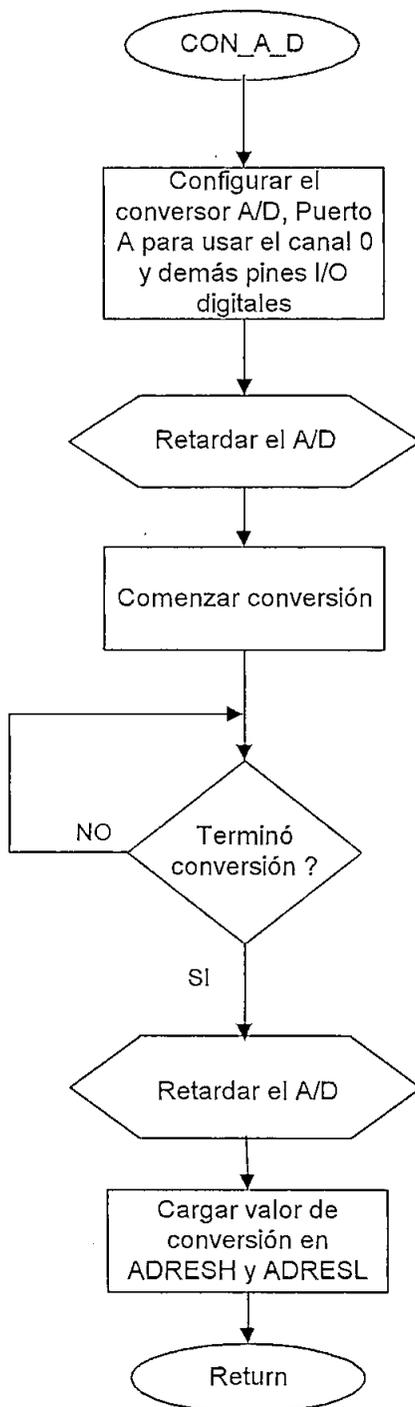


Figura 3.13 Subrutina con_a_d

En el instante que se habilita el bit **GO** del registro **ADCON0**, comienza la conversión y se espera hasta que este bit se ponga en cero para indicar que la conversión ha concluido. Otra opción es rastrear la bandera **ADIF** del registro **PIR1** obteniéndose el mismo resultado. Antes y después de la conversión se añade unos retardos de 100 μ s, cuyo valor se calculó de la forma siguiente:

movlw	K	→	1 CM
movwf	aux2	→	1 CM
decfsz	aux2,1	→	(K - 1) CM + 2 CM
goto	\$-1	→	$\frac{2(K - 1) CM}{(3K + 1) CM}$

Se sabe que un ciclo de máquina (*CM*) en el PIC 16F870 es igual a 4 T_{osc} ; como se usa un cristal con frecuencia de oscilación igual a 4 MHz; por lo tanto, 1CM = 1 μ s, entonces si $K = 21H^{20} = 33 D$ el retardo será de 100 μ s.

El resultado se obtiene en el registro **ADRESH**²¹ (bits más significativos) y **ADRESL** (bits menos significativos), por lo que, para tener una resolución de 8 bits, y puesto que este microcontrolador cuenta con un conversor A/D de 10 bits, se desprecian los dos bits más significativos que se hallan en el registro **ADRESL** y el resultado se almacena en el registro de trabajo **W** el contenido del otro registro. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.13

3.3.3 SUBROUTINA MENSAJE

Con la ayuda de esta subrutina se puede presentar mensajes en el módulo LCD. Los caracteres de cada palabra se hallan guardados en código ASCII en una tabla localizada en la memoria EEPROM de programa.

²⁰ H = hexadecimal y D = decimal

²¹ ADRESH y ADRESL son registros que posee el PIC para almacenar los datos analógicos convertidos a digitales.

Como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 3.14, para la visualización en el display es necesario la llamada a la subrutina de envío de datos LCD_DATO.

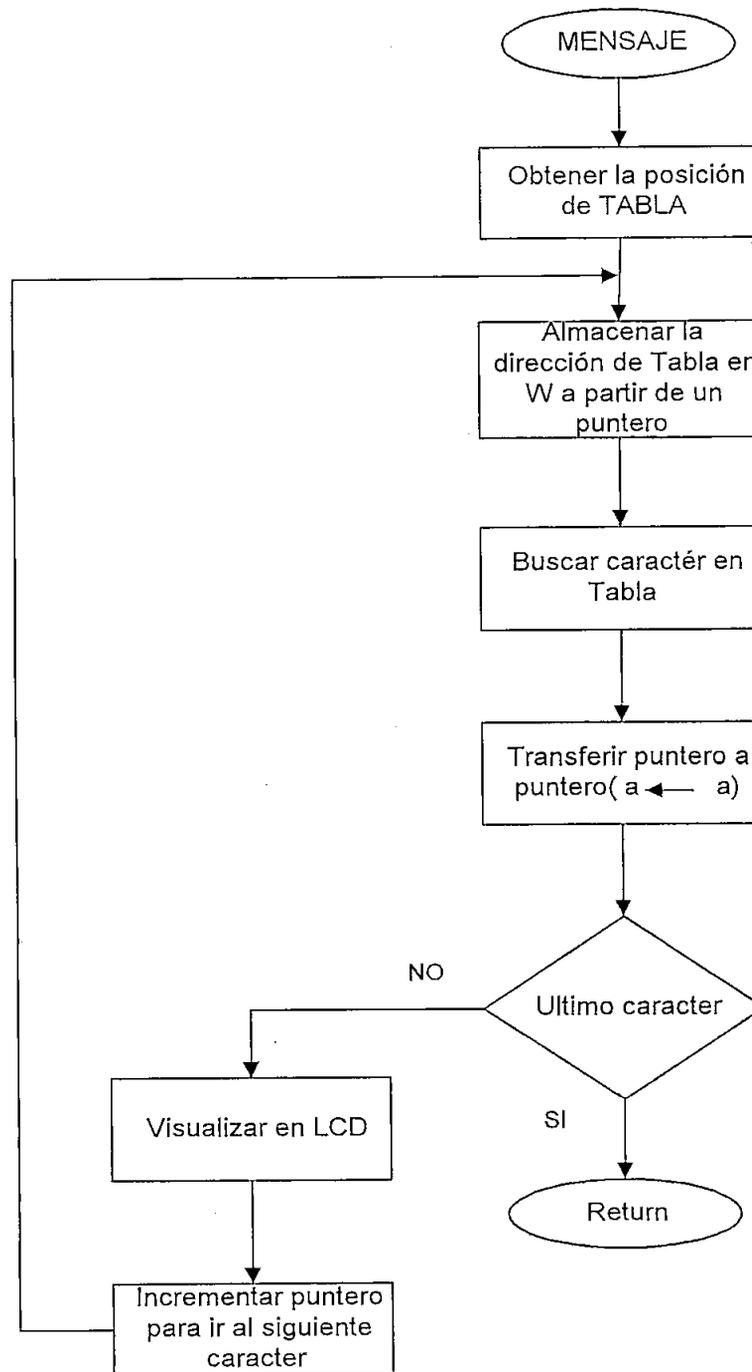


Figura 3.14 Subrutina Mensaje

Los caracteres son extraídos de uno en uno y enviados de la misma forma.

3.3.4 SUBROUTINA TIEMPO

Esta subrutina da una temporización de acuerdo al número de veces que se desea repetir el tiempo dado por el **timer 0**, donde éste valor es cargado en el registro auxiliar **aux1**, el cual actúa como contador.

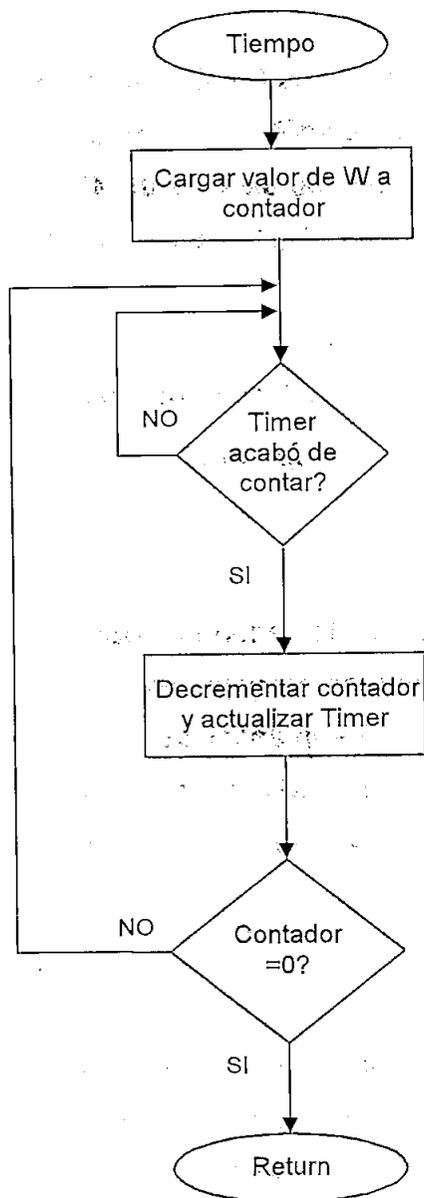


Figura 3.15 Subrutina Tiempo

que apunta al próximo dato. En forma indirecta éste método ayuda a determinar la parte lineal de la curva obtenida con los valores de temperatura.

El diagrama de flujo se presenta en la Figura 3.16.



Figura 3.16 Subrutina Lectura

3.3.6 SUBROUTINA RESTA

Con la subrutina resta se logra determinar los valores de temperatura inicial y final de la región lineal de la curva, así como también los tiempos correspondientes. El diagrama de flujo de la subrutina se halla en la Figura 3.17 y básicamente lo que hace es aplicar el razonamiento matemático que podría explicarse como sigue:

En una línea recta si se incrementan o decrecientan los valores de la abcisa (x), los valores de la ordenada (y) aumentan o disminuyen respectivamente en la misma proporción.

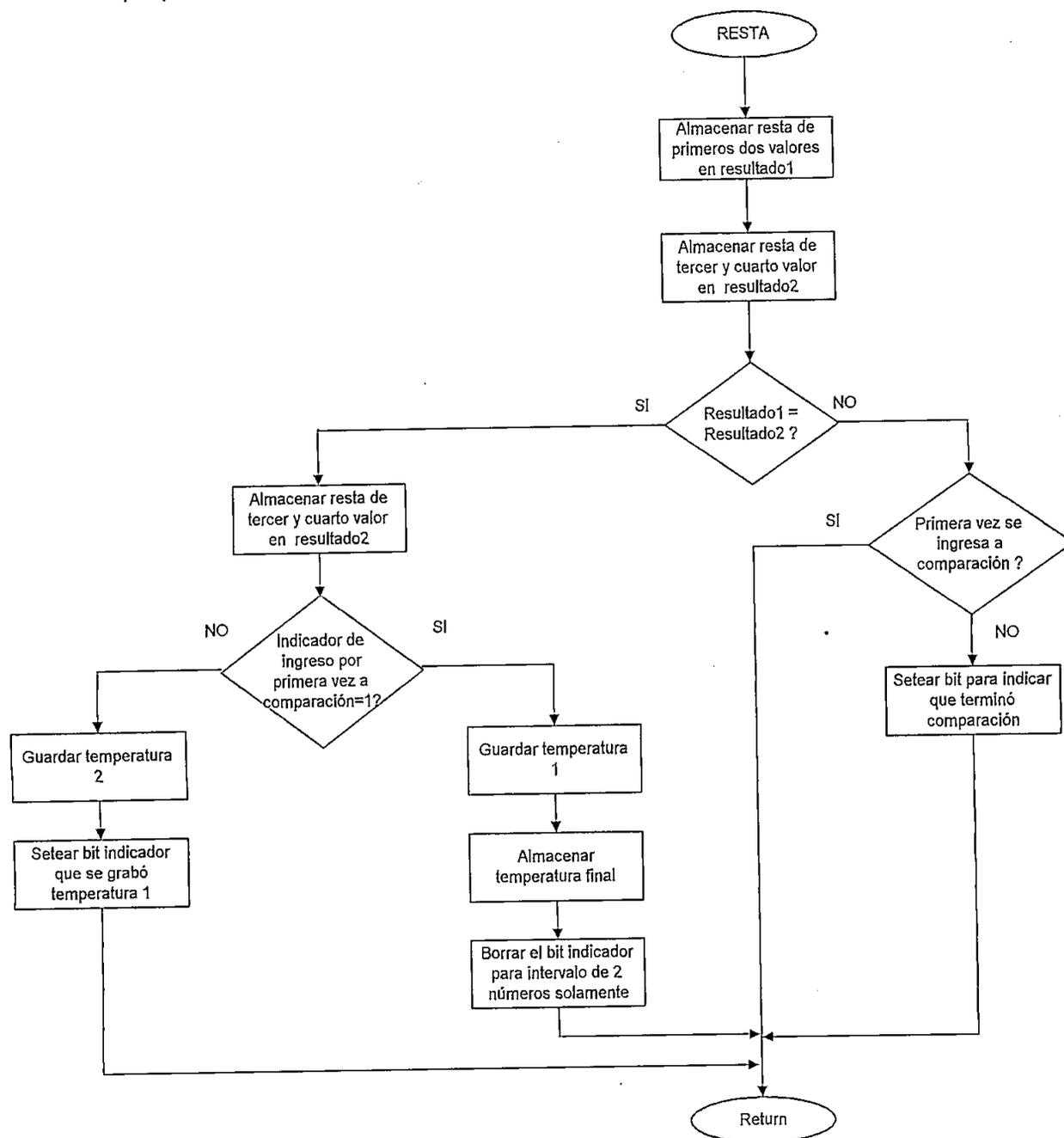


Figura 3.17 Subrutina Resta

Por medio de la subrutina anterior (**Lectura**) se almacenan datos en cuatro registros de propósito general (**rest1, rest2, rest3, rest4**), los cuales se van grabando en orden jerárquico en concordancia con el tiempo especificado por la norma ASTM D 5334 – 92, que se usan para realizar restas de dos en dos, así por ejemplo:

En la Tabla 3.2 se tiene valores de temperatura a determinados tiempos.

TIEMPO [s]	TEMPERATURA [°C]
0	5
5	9
10	10
15	12
30	14
45	16
60	21

Tabla 3.2 Datos de temperatura y tiempo

La parte lineal de la Tabla 3.2, se puede observar en la Figura 3.18.

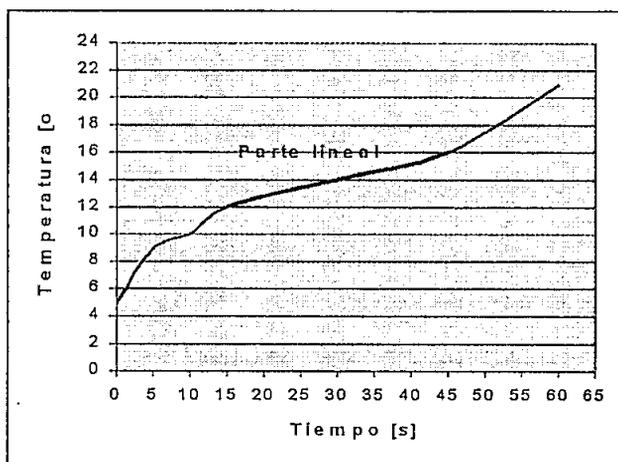


Figura 3.18 Gráfico Temperatura vs Tiempo

Entonces, para realizar las restas, se hace:

5	→	rest1	→	rest2 - rest1=4	Resultado
9	→	rest2			4 - 1 = 3
9	→	rest2	→	rest3 - rest2=1	
10	→	rest3			

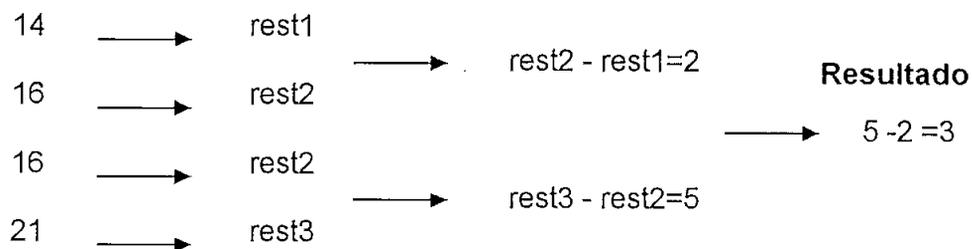
Como el resultado total no es igual a cero, entonces no existe linealidad entre esos puntos. Se continúa con los siguientes datos, así:

9	→	rest1	→	rest2 - rest1=1	Resultado
10	→	rest2			2 - 1 = 1
10	→	rest2	→	rest3 - rest2=2	
12	→	rest3			

Como no es igual a cero, se procede con los siguientes datos.



El resultado es cero, por lo tanto existe linealidad entre los datos 10 y 14. Luego se escoge los siguientes datos, 12, 14 y 16, al realizar las restas según el procedimiento indicado, el resultado es igual cero, por lo tanto la linealidad se extiende desde el 10 hasta el 16. El momento en que el resultado es diferente de cero, la linealidad se ha terminado, así:



Entonces la linealidad estaría entre los datos 10 y 16.

3.3.7 SUBROUTINA CLEAR

Esta subrutina limpia como máximo 16 localidades y como mínimo 1 localidad. El valor de la dirección *XX0H* se carga en el **FSR** y mediante direccionamiento indirecto se procede a borrar las localidades hasta la dirección *XXFH*.

El diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la Figura 3.19.

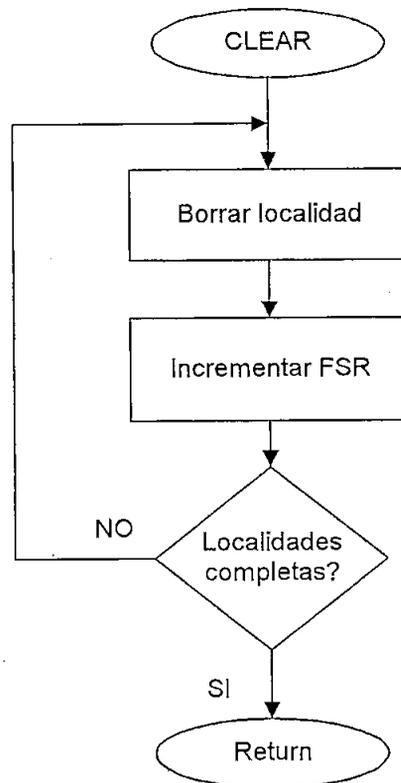


Figura 3.19 Subrutina Clear

3.3.8 SUBRUTINA INT_EX0

Es la subrutina de atención a las interrupciones que se pueden generar en el programa; esto es: interrupción externa 0 (RB0) y debido al cambio de estado en el **Puerto B** (RB4).

En primera instancia se tiene que identificar el tipo de interrupción que se ha presentado. Si es debido al cambio de estado en el **Puerto B**, debe detectar una sola vez; es decir, el paso de 0 a 5 voltios y no el regreso de 5 voltios a 0. Para éste caso, en esta subrutina no se ejecuta ningún esquema determinado sino únicamente borra la bandera de interrupción **RBIF** y activa nuevamente las interrupciones. El diagrama de flujo se observa en la Figura 3.20.

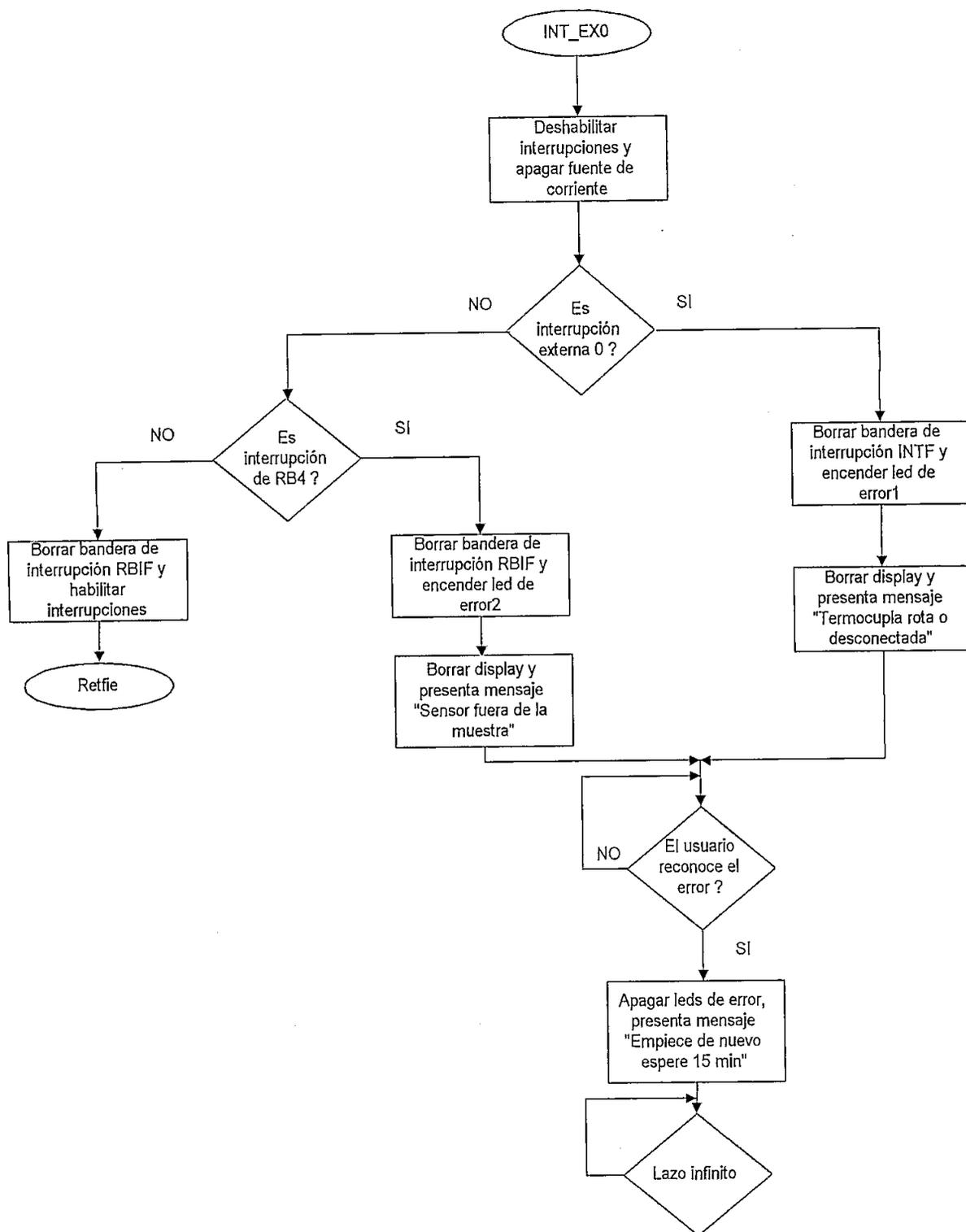


Figura 3.20 Subrutina INT_EX0

Si la interrupción fue la *EXTERNA 0*, en donde se halla conectada la alarma que proporciona el AD595CQ, en el LCD se presenta un mensaje que dice: "TERMOCUPLA ROTA O DESCONECTADA", se enciende el led indicador de este error y espera hasta que sea reconocida la falla. De manera similar ocurre para el otro tipo de interrupción, que constituye el **error2**, y que protege al sensor para que no sobrepase la temperatura de 95 °C. En este caso se observa en el LCD el siguiente mensaje: "SENSOR FUERA DE RANGO", se prende un led y aguarda el reconocimiento del usuario mediante un pulsador disponible en el módulo de este proyecto. Para ambos casos, este es el punto de unión en donde por software se apaga el led correspondiente al error actual y en el display de cristal líquido se indica: "EMPIECE DE NUEVO ESPERE 15 MIN.". Posteriormente, el programa se detiene en un lazo infinito y para salir de él, necesariamente el microcontrolador debe ser reseteado. Esto se hace para que el usuario no pase por alto un mensaje de error.

En caso de surgir alguno de los errores descritos anteriormente, se debe esperar el tiempo recomendado para que la muestra retorne a sus condiciones iniciales. Si no se hace caso a esta recomendación, el valor de termoconductividad determinado con este módulo será erróneo.

3.3.9 SUBROUTINA MULTIPL

Esta subrutina permite realizar la multiplicación de dos números de 8 bits cuya resultante da un número de 16 bits, pero como se necesita hallar el producto de dos cantidades de 2 bytes, se realiza un pequeño algoritmo (descrito en 3.2) que tiene como base esta subrutina.

El resultado es almacenado en un par de registros cuya dirección está en el banco1 de la memoria de datos RAM.

Su diagrama de flujo se halla en la Figura 3.21.

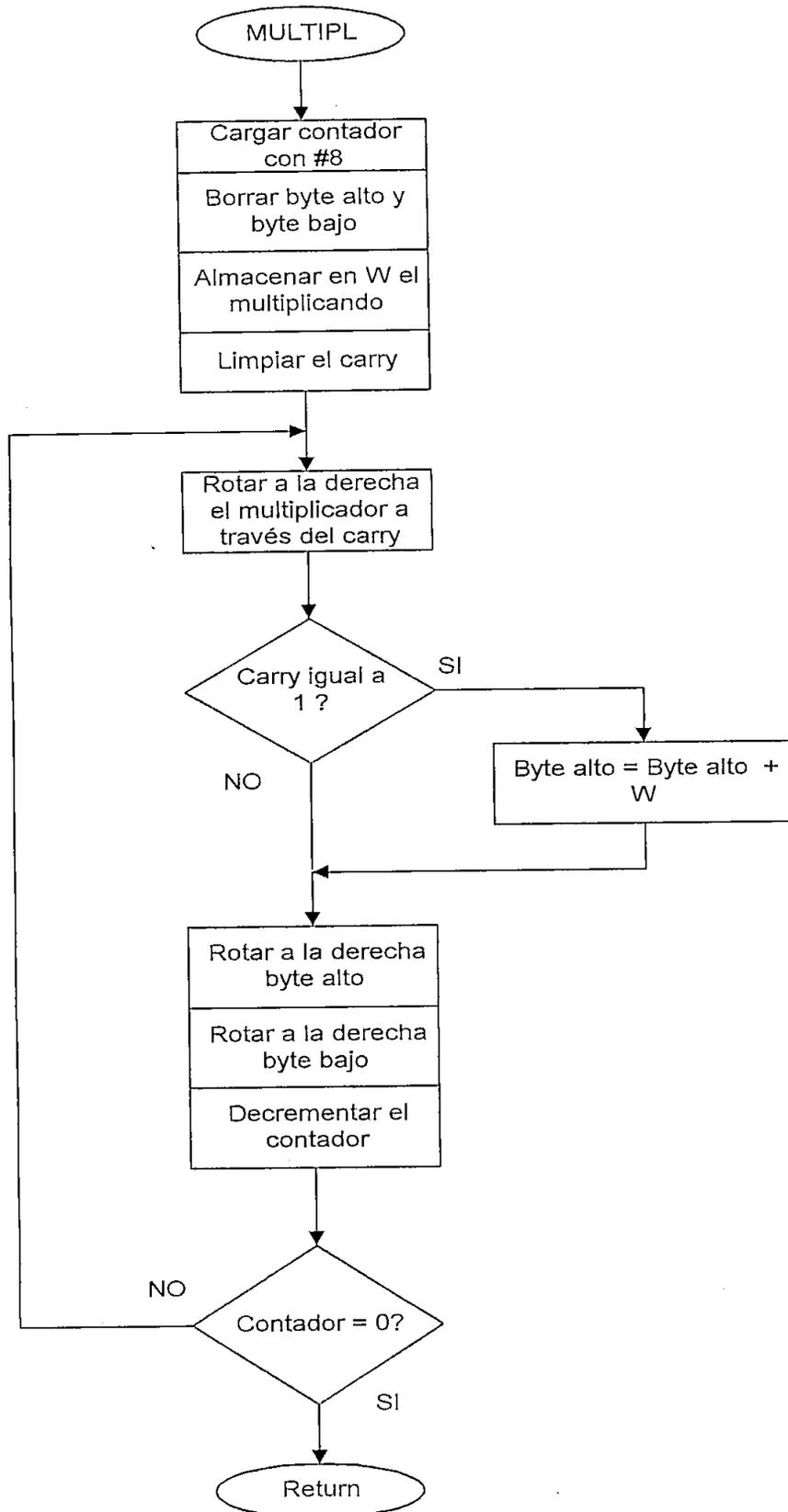


Figura 3.21 Subrutina Multipl

3.3.10 SUBROUTINA DIVI_16

El diagrama de flujo correspondiente se observa en la Figura 3.22.

Efectúa la división de un número de 3 bytes para uno de 1 byte, se realizan restas sucesivas entre el **dividendo** (24 bits) y el **divisor** (8 bits). Si no existe llevada (**carry**⁴=1) se incrementa en uno el cociente menos significativo y si existe desborde (**Z**⁵=1) se aumenta en una unidad el cociente más significativo; lo descrito continua hasta cuando se presente una llevada (**carrier**) en cada resta, en otras palabras el dividendo es menor que el divisor.

⁴ carry = acarreo en la suma y la resta se representa con la letra C y ocupa el bit 2 del registro de estado o status del PIC16F870

⁵ Z, representa el cero y se activa (Z=1) cuando en una operación lógica _ matemática el resultado sea cero, y ocupa el bit 0 del registro de estado o status del PIC16F870.

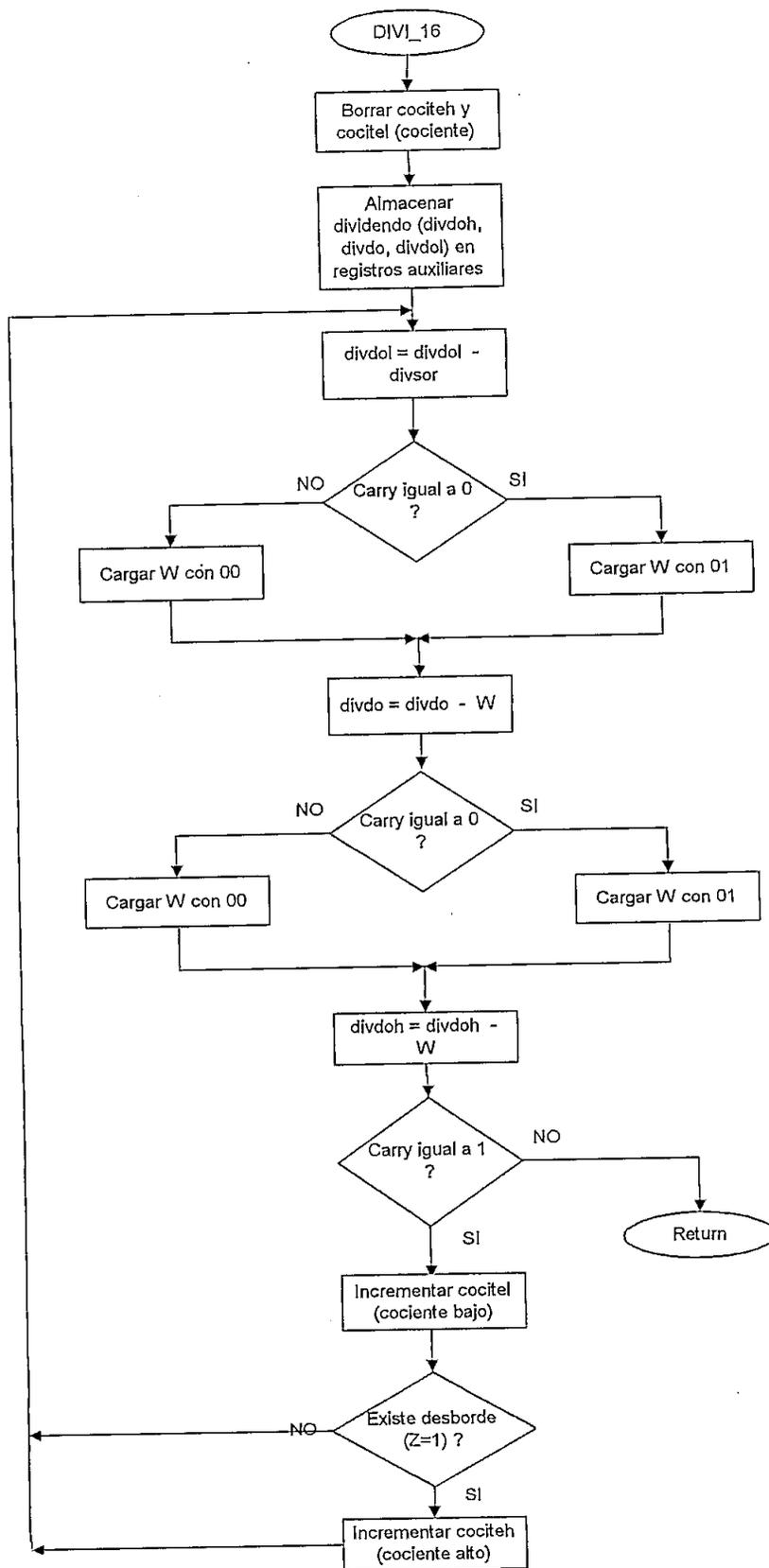


Figura 3.22 Subrutina Divi 16

3.3.11 SUBROUTINA RESTAR

En general permite realizar la resta de dos números de **n** bits, el valor de **n** se almacena en el registro **count**. Esta subrutina facilita la conversión de código hexadecimal a código decimal o BCD y también la resta entre logaritmos naturales de los tiempos correspondientes a la región lineal de la curva tiempo vs temperatura.

El diagrama de flujo se presenta en la Figura 3.23.

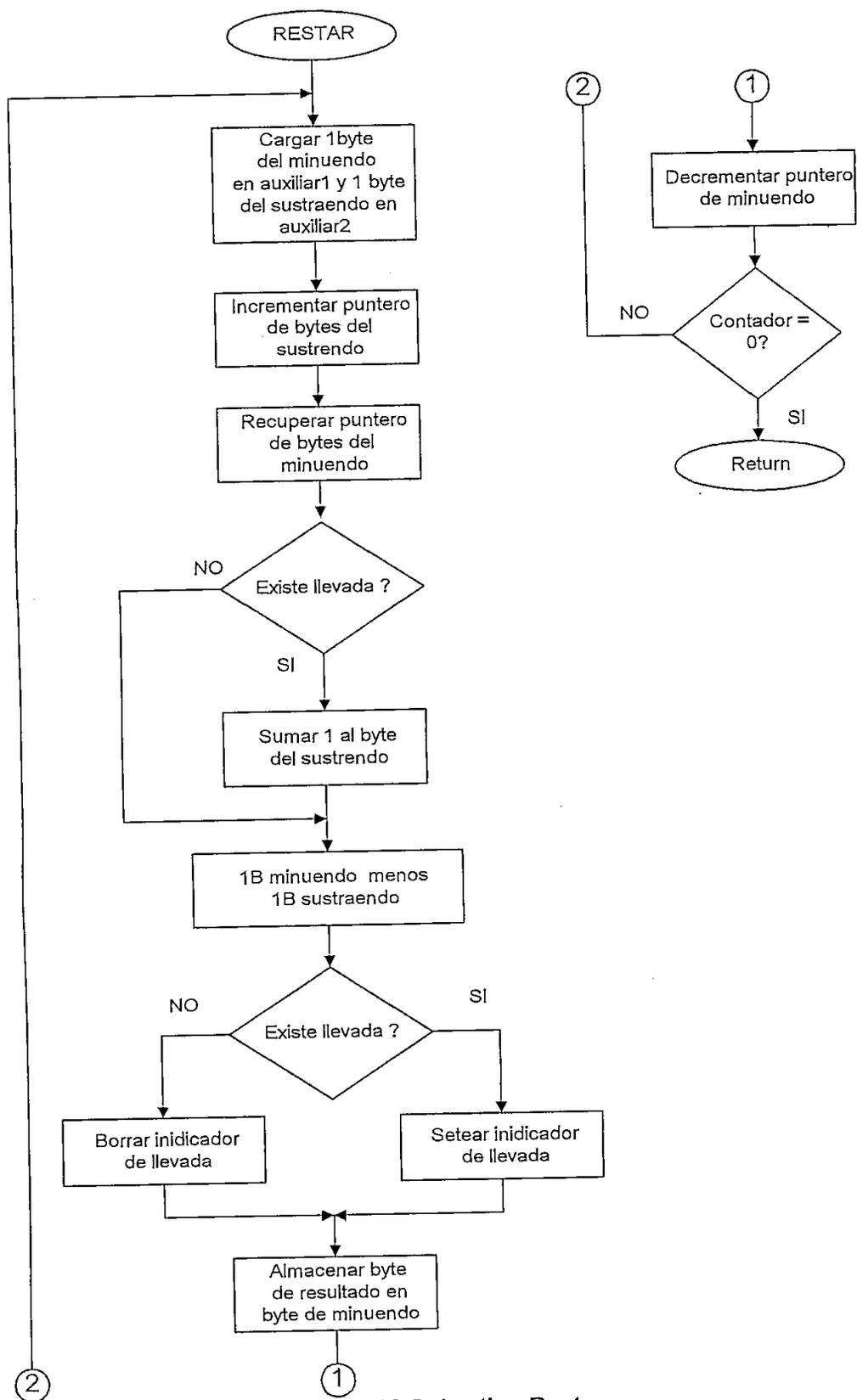


Figura 3.23 Subrutina Restar

3.3.12 SUBROUTINA REST_32

Esta subrutina realiza la conversión de binario a decimal, mediante restas sucesivas. Con la ayuda de la subrutina descrita anteriormente (subrutina **Restar**) el minuendo se carga mediante la subrutina BCD. Existe un registro auxiliar (**aux5**) el cual se incrementa de acuerdo al número de veces que le contiene el número decimal, el mismo que está almacenado en tres registros de 8 bits cada uno.

Mediante direccionamiento indirecto se accede a la respuesta de termoconductividad en código hexadecimal guardado en localidades de memoria RAM, además se almacena en las mismas direcciones el resultado de las restas hasta que el minuendo (cantidad hexadecimal) sea menor que el sustraendo (decimal transformado a binario).

Al finalizar las restas sucesivas, el resultado se recupera desde los registros auxiliares y como se indicó anteriormente, se graba en el mismo minuendo para realizar las próximas restas con el número correcto.

El diagrama de flujo se observa en la Figura 3.24.

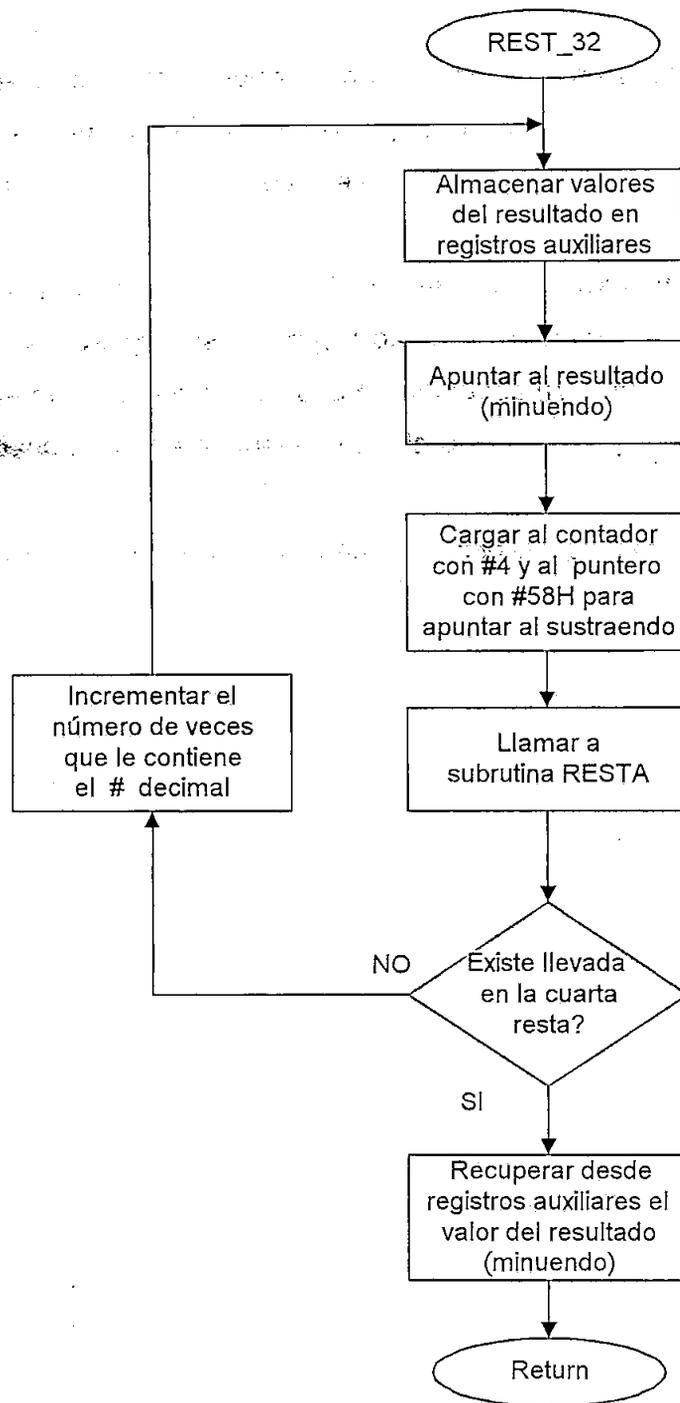
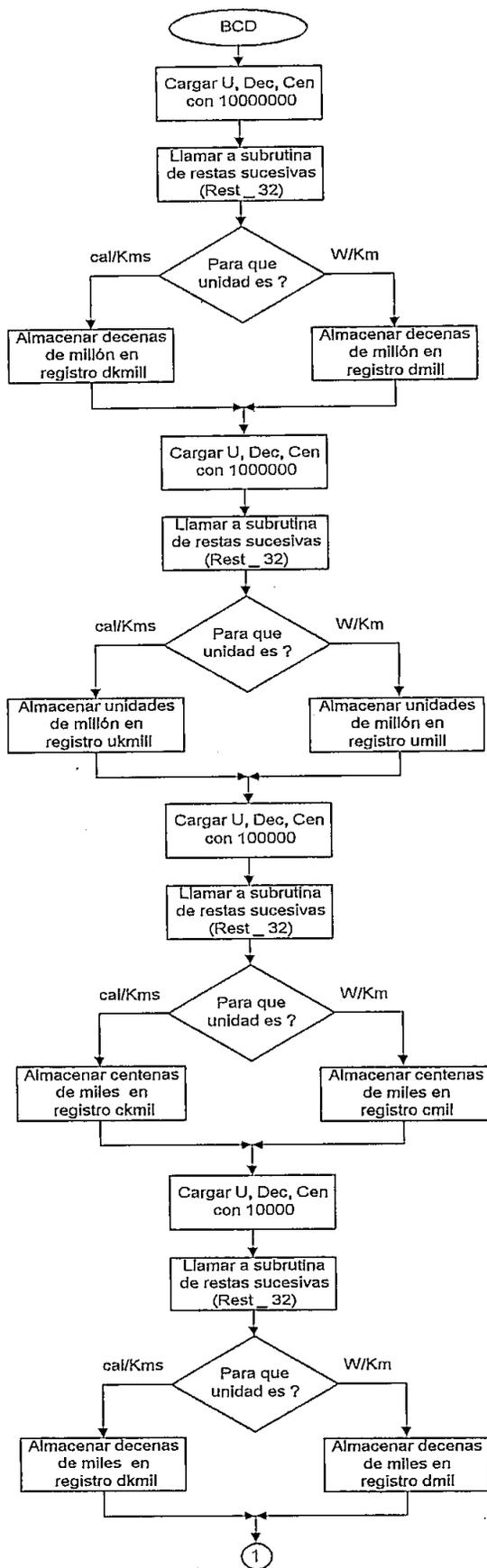


Figura 3.24 Subrutina Rest_32



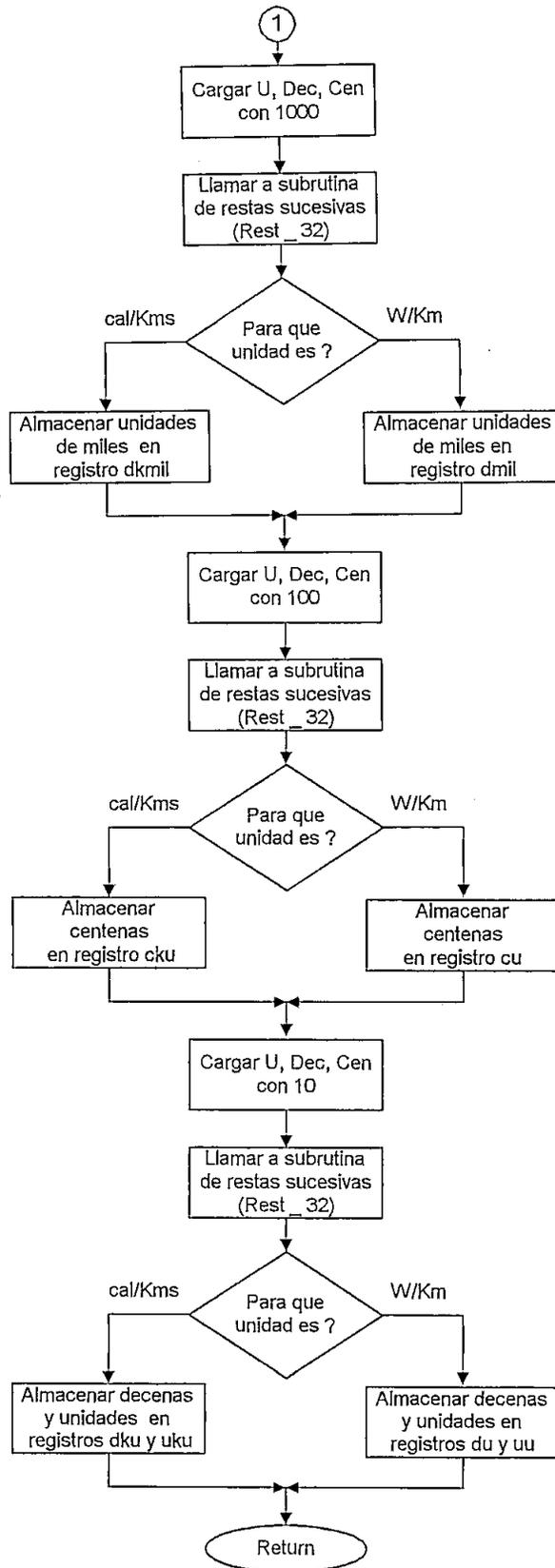


Figura 3.25 Subrutina BCD

4.1 INTRODUCCIÓN

Antes de mostrar resultados de las pruebas de funcionamiento del módulo, es importante determinar experimentalmente como se comportan los componentes más relevantes. En primera instancia se analizará el correcto trabajo de la fuente de corriente y del acondicionador de termocupla tipo T con el amplificador de instrumentación. Las pruebas se encaminan a observar la buena operación del medidor de termoconductividad.

4.2 OPERACIÓN DE LA FUENTE DE CORRIENTE

Como se indicó en el Capítulo II, la fuente de corriente está construida con un regulador de voltaje (LM 338). A la salida se tiene una corriente constante en el tiempo igual a 0.9 A. Esta corriente circula a través de la niquelina (resistencia igual 6.6Ω) que se halla dentro de la vaina térmica. En la Figura 4.1 se puede observar el comportamiento de ésta parte del medidor con respecto al tiempo²² aproximadamente 30 minutos o 1800 segundos.

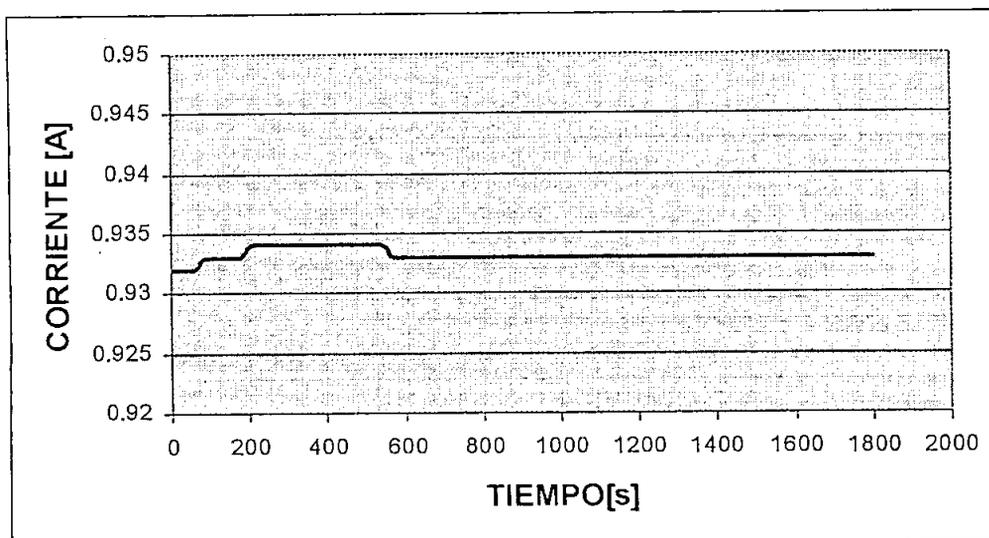


Figura 4.1 Gráfico de la salida de la fuente de corriente.

²² En Anexo 6 se observa las tablas de valores de tiempo y de corriente.

RESULTADOS

Medidor patrón de Temperatura [oC]	Acondicionador Vo [V]	Conversión del Vo Temperatura [oC]	ERROR [%]
21.40	0.98	19.60	-8.41121
25.10	1.20	24.00	-4.38247
31.60	1.40	28.00	-11.3924
35.40	1.60	32.00	-9.60452
40.30	1.95	39.00	-3.22581
46.20	2.25	45.00	-2.5974
47.90	2.35	47.00	-1.87891
50.10	2.45	49.00	-2.19561
55.50	2.75	55.00	-0.9009
60.70	3.05	61.00	0.494234
65.20	3.35	67.00	2.760736
70.20	3.65	73.00	3.988604
75.50	3.90	78.00	3.311258
80.10	4.05	81.00	1.123596
85.80	4.35	87.00	1.398601
88.00	4.50	90.00	2.272727

Tabla 4.2 Mediciones de la Segunda Prueba del voltaje de salida del acondicionador con respecto al medidor de temperatura referencial.

Con el ajuste el error disminuyó y es en general menor al 10 %.

4.4 OPERACIÓN DEL CONVERTOR A/D

El convertor del microcontrolador es de 10 bits con una resolución²⁷ de 0.9 mV, pero en el caso presente se despreció los dos bits menos significativos con el fin de obtener una conversión de 8 bits con una resolución de 3.9 mV. Con este voltaje el acondicionador funcionó en forma correcta y en general, el medidor de termoconductividad.

El voltaje de salida del acondicionador debe ingresar al convertor A/D interno del microcontrolador, a través de un seguidor de voltaje y un filtro pasa bajos

²⁷ Resolución = $1/2^n$

(coeficiente de Seebeck igual a $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y la termocupla que la norma especifica es la tipo T. Pero este error prácticamente se elimina en el cálculo del coeficiente de termoconductividad en la resta de temperaturas de la parte lineal. Por otro lado, otro problema es el ruido, que es eliminado al colocar un capacitor en la entrada del amplificador de instrumentación, que es recomendado en las hojas de especificaciones, así como se explica en el Capítulo II.

Un análisis general de los errores de todas las pruebas hechas hasta el momento permite deducir que el porcentaje de error no supera en la mayoría de las pruebas el 10 %. Puesto que la misma norma anticipa errores de esta magnitud y se puede considerar que el equipo se encuentra operando dentro de rangos adecuados.

4.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A LAS MUESTRAS DE SUELOS.

Todas las pruebas anteriores fueron necesarias para verificar el correcto funcionamiento de los componentes del sistema antes de proceder a probar todo el equipo, trabajando con muestras reales hasta determinar el coeficiente de termoconductividad de las mismas.

Para poder contrastar los resultados que presenta el medidor, se realizó pruebas en el Laboratorio de Energía de Ingeniería Mecánica, mediante el Aparato de Lees²⁸. También se determinó en forma manual, de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM D 5334 –92, la termoconductividad de las mismas muestras. Por último, se buscaron para referencia valores publicados en tablas de termoconductividad.

A continuación se describe las pruebas que se hicieron del sistema como tal:

²⁸ Explicación más detalla en Anexo 3

Prueba 1

En primera instancia se escogió un suelo de color café claro extraído de una zona montañosa, que de aquí en adelante se llamará Muestra 1, y se le sometió al aparato de Lees.

Los valores de temperatura, voltaje y corriente de ésta muestra se hallan en el Anexo 6. A continuación se presentan los valores de las tres temperaturas A, B y C respecto al tiempo, tomadas por los respectivos termómetros que forman parte del Aparato de Lees.

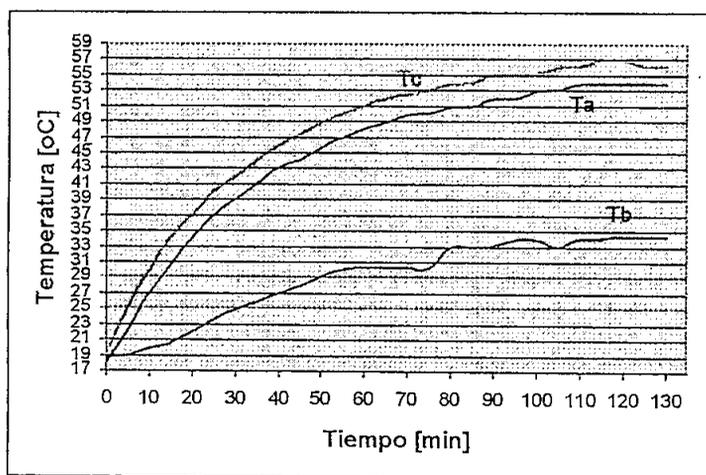


Figura 4.6 Temperaturas medidas en la Muestra 1

Al calcular la termoconductividad según lo explicado en el Anexo 3, se obtiene:

Resultados

	r A [m]	r B [m]	r C [m]	r X [m]	r Muestra [m]	Ta [°K]	Tb [°K]	Tc [°K]
	0.0205	0.0206	0.0206	0.0206	0.0207	326.8	307.2	329.2
ESPESOR	0.0125	0.0125	0.0127	0.0050	0.0099			
AREA	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013			

Resultados	h =	1.28843345 [W/m ² °K]
	Q =	2.19615 [W]
	λ =	0.62550748

Tabla 4.4 Resultado de prueba para la Muestra 1.

La letra "r" representa al radio de la muestra y de los discos del Aparato de Lees. Las temperaturas en la Tabla 4.4 anterior son las temperaturas en el estado estable, y el resultado del coeficiente de conducción térmica está dado en [W/°K*m].

Prueba 2

La Muestra 2 corresponde a un compuesto color café gris, extraído de una zona montañosa. De igual manera se realiza la medición de temperaturas mediante el Aparato de Lees. La Figura 4.7 presenta el resultado de los valores de temperatura medidos.

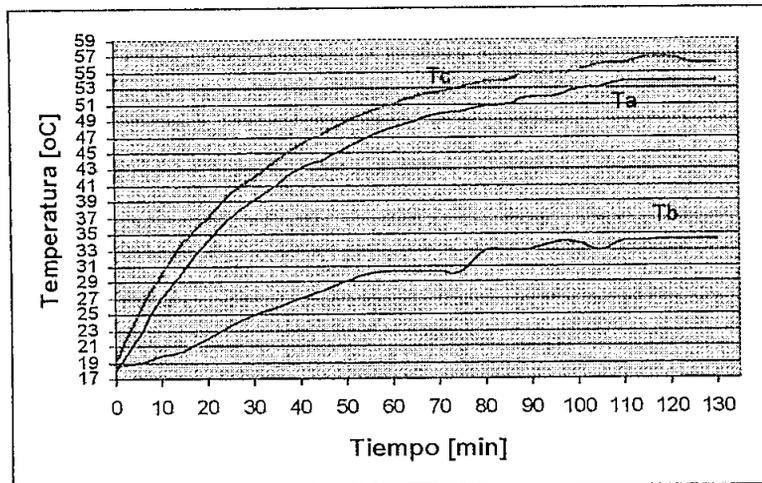


Figura 4.7 Temperaturas medidas en la Muestra 2

Resultados

	r_A [m]	r_B [m]	r_C [m]	r_X [m]	r_{Muestra} [m]	T_a [°K]	T_b [°K]	T_c [°K]
	0.0205	0.0206	0.0206	0.0206	0.0207	326.1	313	328.5
ESPESOR	0.0125	0.0125	0.0127	0.0050	0.0099			
AREA	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013			

Resultados	$h =$	1.26979984 [W/m ² °K]
	$Q =$	2.1762 [W]
	$\lambda =$	0.92346195

Tabla 4.5 Resultado de prueba para la Muestra 2.

De igual manera, la termoconductividad está dada en las unidades [W/°K*m] y "r" representa al radio de los discos y de la muestra.

Se indicó que otra opción para la contrastación fue medir la temperatura de la muestra en forma manual como el cálculo del coeficiente en cuestión, de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM D 5334 – 92.

Prueba 3

Primero se midió la temperatura para la Muestra 1. En la Figura 4.9 se puede ver la linealidad escogida y en base a esta se calculó el coeficiente.

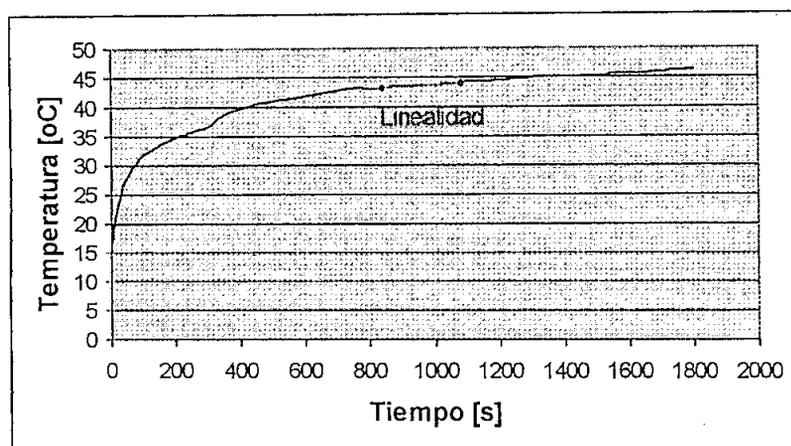


Figura 4.9 Temperaturas medidas en la Muestra 1

Resultados

La parte lineal que se muestra con color verde en la Figura 4.9 tiene como límites, para la temperatura: 43.2 °C y 44 °C; para el tiempo: 840 segundos y 1080 segundos. La resistencia de la níquelina es aproximadamente 6.6 Ω con una longitud de 0.25 m y la corriente es de 0.95 A. Si se aplica la Ecuación 1 del Capítulo 1, se obtiene un coeficiente de termoconductividad igual a:

$$\lambda = \frac{0.95^2 * 6.6}{4\pi * 0.25} * \frac{\text{Ln}\left(\frac{1080}{840}\right)}{44 - 43.2} = 0.595619 [W / ^\circ K * m]$$

Prueba 4

Para la Muestra 2 también se midió la temperatura igual que para la muestra anterior y con el mismo procedimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- KREITH, FRANK; Principios de transferencia de calor; 536.2 K92 esp.
- A. P. BASKAKOV; Termotecnia; editorial mir, traducción al español 1985.
- A. N. TIJONOV, A. A. SAMARSKY; Ecuaciones de la física matemática.
- J. MATHEWS, R. L. WALKER; Matemáticas para físicos.
- KERN DONALD; Procesos de transferencia.
- BENJAMÍN GEBHART; Heat transfer; McGraw-HILL
- BROWN AUBREY; Introduction to heat; Broing.
- DOROTHY S. MEYLER, D. G. SUTTON; Compendio de matemáticas y física; uteha méxico; 1965.
- DOOLITTLE, JESSE S; THERMODYNAMICS FOR ENGINEERS.
- YUNUS, A. CENGEL MICHAEL A. BOLES; Termodinámica; tomo I.
- INEN
- HALLIDAY, DAVID; Física; parte I; editorial continental; méxico;1973.
- ZEMANSKY, SEARS; Física general; ediciones aguilar; españa; 1981.
- www.hukseflux.com
- www.analogdevices.com
- www.ni.com
- www.bioingenieros.com
- www.omega.com
- www.google.com
- www.jameco.com
- www.microchip.com
- terralia@terralia.com
- www.control.com
- www.chemkeys.com
- www.nrel.gov/lab/pao/solar_energy.html
- www.sensycon.de

- www.eosdis.ornl.gov/FIFE/Datasets/Soil_Properties/Soil_Thermal_Cond_Data.html
- <http://mnroad.dot.state.mn.us/restools/restools.html>
- www.arqcon.com
- soporte@multivi.com
- www.sensorsmag.com
- www.controleng.com
- www.epanorama.net

ANEXOS

ANEXO 1

NORMA ASTM D 5334 – 92

LEEDOR TÉRMICO: dispositivo que produce una lectura digital de temperatura en grados centígrados a casi 0.1°K .

VOLTÍMETRO OHMETRO: dispositivo para leer voltaje y corriente a casi 0.01V y amperio.

TIMER: capaz de medir cerca de 0.1 s para un mínimo de 15 min .

EQUIPO: capaz de taladrar uno agujero de 2.3 mm de diámetro a una profundidad igual a la longitud de la aguja.

GRASA TERMICA: cualquier grasa conductora térmicamente con $\lambda > 50\text{ W / m}^{\circ}\text{K}$

EPOXICA TERMICA: cualquier epóxica conductora térmicamente con $\lambda > 50\text{ W / m}^{\circ}\text{K}$

Calibración estándar.

Un material con termoconductividad conocida (típicamente sílice fundida, $\lambda = 1.34\text{ w / m}^{\circ}\text{K}$ a 20°C). La norma de la calibración estará en la forma de un cilindro. El diámetro del cilindro debe ser por lo menos de 40 mm y la longitud será por lo menos 10 cm más largo que la sonda de la aguja. Un agujero debe ser taladrado a lo largo del eje del cilindro a una profundidad igual a la longitud de la sonda. El diámetro del agujero debe ser igual al diámetro de la sonda para que la sonda encaje herméticamente dentro del agujero.

5. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Muestras en reposo o tranquilas.

- Tubo de pared delgada o manejo de muestras: Cortar uno $200 \pm 30\text{ mm}$ ($8.0 \pm 1\text{ in}$) de sección larga de un tubo de muestra conteniendo una muestra de suelo tranquilo o en reposo (sin disturbios). La sección del tubo debería tener un diámetro mínimo de 51 mm (2.0 in).
- Pese la muestra en un tubo de muestreo o anillos cobrizos.

- Inserte la sonda de aguja térmica dentro de la muestra o empujando (pushing) la sonda dentro de un agujero pretaladrado (muestra densa) a una profundidad igual a la longitud de la sonda o empujando (pushing) la sonda dentro de la muestra (muestra floja). El cuidado debería tomarse para asegurar que el eje de la sonda térmica es totalmente embebido en la muestra y no parcialmente expuesto (mire nota 1).

NOTA 1.

Para proveer un mejor contacto térmico entre la muestra y la sonda, la sonda puede ser revestirse de una capa delgada de grasa térmica. Si un agujero es pretaladrado para la onda de aguja, el diámetro del agujero debería ser ligeramente menos que el diámetro de la sonda para asegurar un encaje ajustado.

Muestras removidas .

Compactar la muestra para densidad deseada o contenido de agua (en una pared delgada metálica o tubo plástico) usando una técnica apropiada de compactación. Para una guía adicional sobre los efectos de las varias técnicas de compactación en la termoconductividad la lectura referida es Mitchell et al. El tubo debería tener un diámetro mínimo de 51 mm (2 in) y una longitud de 200 ± 30 mm (8 ± 1 in).

Muestras de rocas suaves.

Inserte la sonda de aguja térmica dentro de la muestra o pretaladrando un agujero a una profundidad igual a la longitud de la sonda. (mire nota 1)

6. CALIBRACIÓN.

El aparato de sonda de aguja térmica debería ser calibrado antes de usarlo. El desempeño de calibración por comparar la determinación experimental de la termoconductividad de un material estándar conocido su valor.

Conduzca la prueba especificada en la sección 7 usando una calibración estándar como especificada en la calibración estándar.

La medida de termoconductividad de la especie de calibración debe estar de acuerdo dentro de una desviación estándar de una publicación de valores de termoconductividad, o con el valor de termoconductividad determinado por un método independiente.

7. PROCEDIMIENTO.

- Permitir que la muestra llegue al equilibrio con la temperatura de la habitación.
- Conectar el alambre calentador de la sonda térmica a la fuente de corriente constante.
- Conectar el elemento medidor de temperatura para la unidad de lectura.
- Aplicar una corriente constante conocida (por ejemplo 1 A) al alambre calentador tal que el cambio de temperatura sea menos que 10^{-3} K en 1000 s.
- Grabar las lecturas para 0, 5, 10, 15, 30, 45 y 60 s, entonces tomar lecturas a intervalos de 30 segundos para un mínimo de 1000 s. Una típica hoja de datos y un recolector de datos típico son los mostrados en las figuras 2 y 3 respectivamente.
- Apagar la fuente de corriente constante.
- Seleccionar una porción lineal de la curva (pseudo porción en estado estable) y dibujar una línea recta a través de puntos.

- Seleccionar tiempos t_1 y t_2 para puntos apropiados sobre la línea y leer las correspondientes temperaturas T_1 y T_2 .
- Remover a la muestra en forma circular.
- El desempeño de la prueba de contenido de humedad (ver método de prueba D 2216) sobre una representativa espécimen de la muestra.
- Limpiar el tubo de pared delgada y pesar.

8. CÁLCULOS.

Calcular la termoconductividad (λ) de un espécimen desde una porción lineal de la curva experimental mostrada en la figura 4, usando la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{2.30}{4 * \pi * (T_2 - T_1)} * \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \frac{Q}{4 * \pi * (T_2 - T_1)} * \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

Donde:

$$Q = \text{calor entrante (entrada de calor)} = \frac{I^2 * R}{L} = \frac{E * I}{L}$$

La derivación de la ecuación 1 es presentado por Carslaw y Jaeger (2) y adaptado para suelos por VanRooyen y Winterkom (3); VanHerzen y Maxwell (4); y Winterkom (5).

9. REPORTE.

Para cada grabación de la prueba de termoconductividad, reportar las siguientes observaciones:

- Hoja de datos de la prueba.

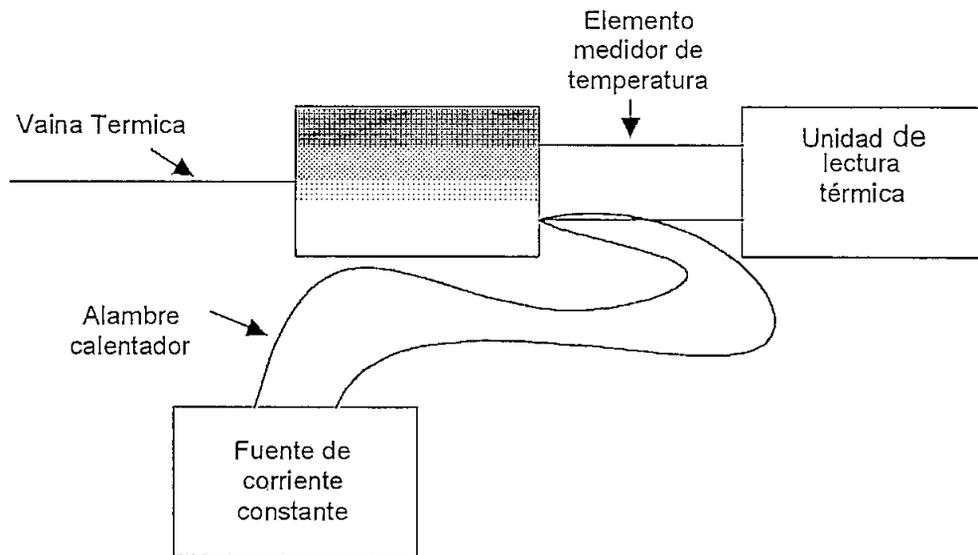


Figura 1. Montaje de la sonda térmica experimental.

- Número de orificios, muestra o número de tubos, profundidad de la muestra.
- Contenido de humedad inicial y densidad seca.
- Dibujo tiempo versus temperatura.
- Termoconductividad, y
- Descripción física de muestras incluyendo suelo o tipo. Si es roca, describir localización y orientación del aparente plano de debilidad y cualquier inclusión grande o no-homogeneidad.

ANEXO 2

LCD, CONVERSOR A/D, CODIGO ASCII

Lectura/Escritura se deberán seleccionar y habilitar las respectivas señales. Con 1 lógico se habilita y con 0 lógico se deshabilita. Esta señal es del tipo INPUT y será ingresada por el pin 6 del LCD.

(D0 – D7) Líneas del bus de datos.- Estas líneas son del tipo THREE STATE, bidireccionales (INPUT/OUTPUT), corresponden a los pines desde el 7 al 14 del LCD, su función es transferir datos entre el microcontrolador y el LCD. Es importante notar que se usan todas las líneas porque la transferencia de datos escogida es de 8 bits.

(V_{DD} - V_S) Fuentes de voltaje.- V_{DD} corresponde a 5 [V], mientras que V_{SS} corresponde a 0 [V]. La alimentación es aplicada a los pines 2 y 1 del LCD respectivamente.

Voltaje de Ajuste del Contraste (V_o)- Este voltaje es aplicado en el pin 3 del LCD, su variación (incremento o decremento) provocará cambios en la gama del contraste. Máximo contraste al conectar en V_{SS} .

Es necesario tener como requisito inicial la elaboración subrutinas específicas para la operación del LCD; es decir, una subrutina para configurar los puertos del PIC para el manejo del LCD (UP_LCD), otra para iniciar el LCD (LCD_INI), otra para borrar el display (CLEAR), una para mostrar datos (LCD_DATO), para activar o desactivar el LCD (LCD_E), etc.

CONVERSOR A/D

Se usa el convertor análogo – digital interno que posee el PIC 16F870, tiene una resolución de 10 bits, constituye la interfaz entre la señal analógica proveniente del acondicionador de termocupla y la señal requerida por el microcontrolador para su adecuado procesamiento.

El microcontrolador posee 5 canales análogos a través del puerto A. Su configuración (reloj, justificación, canal, etc) se explicará en el siguiente capítulo.

La entrada análoga, carga a un capacitor sample and hold, cuya salida es la entrada en el convertor interno, entonces el convertor genera un resultado digital de este nivel analógico vía aproximaciones sucesivas; el resultado corresponde a un número de 10 bits, pero despreciando los dos bits menos significativos se tiene un convertor con 8 bits de resolución.

Los voltajes de referencia analógicos son seleccionables por software. El módulo del convertor A/D tiene cuatro registros, estos son:

ADRESH
ADRESL
ADCON0
ADCON1

La impedancia de la fuente afecta directamente al tiempo de carga requerido por el capacitor. La máxima impedancia recomendada para fuentes análogas es de 10 [K Ω], si la impedancia disminuye, el tiempo de adquisición también se decrementa.

La siguiente figura muestra la secuencia de conversión. El tiempo de adquisición (T_{AD}) es el tiempo que el capacitor holding del módulo A/D es conectado al nivel de voltaje externo, entonces existe un tiempo de conversión de 12 T_{AD} , la suma de

ANEXO 3

MAQUINA DE LEES

MAQUINA DE LEES

Se usa para determinar la termoconductividad de suelos, aislantes, materiales duros, etc.

Se necesita un amperímetro, 3 termómetros, la fuente de calor, discos de Cu (A, B, C) y disco de la muestra (S).

La forma en que van interconectados estos elementos se muestra en la Figura 1.

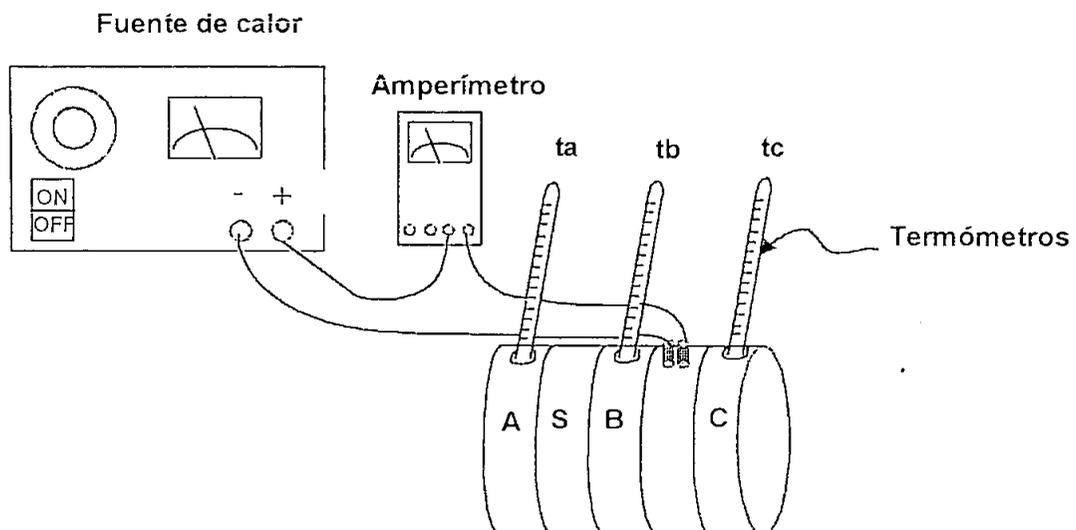


Figura 1. Conexión de la máquina de Lees

Para que la prueba tenga un resultado confiable, el voltaje se debe mantener constante en 6 voltios durante toda la prueba, para que exista un flujo de calor constante hacia los discos, el cual es introducido a través del disco sin nombre (Figura 1).

Es muy importante las dimensiones del disco de la muestra S; es decir, debe ser del mismo grosor y diámetro que los demás discos (A, B, C), si se excede al

diámetro correcto, el resultado no es muy confiable debido a que se forman una especie de aletas por la que se va disipando el calor al ambiente.

A continuación se describe los pasos a seguir para realizar la prueba, con la consideración de que ya se tiene el disco de la muestra:

1. Con la ayuda de la perilla colocada en el extremo izquierdo de la fuente de calor, ajustar en los terminales de la fuente de calor 6 voltios DC y apagar.
2. Colocar el disco de la muestra junto a los discos B y A.
3. Conectar un amperímetro en serie con los cables que llevan el calor.
4. Colocar tres termómetros, uno en el disco A, otro en el B y por último uno en el disco C.
5. Encender la fuente de calor.
6. Tomar medidas de las temperaturas A, B y C cada 5 minutos, hasta cuando se llegue al estado estable; es decir, que estas temperaturas tengan valores repetitivos o constantes. (aproximadamente 2 horas).

Una vez determinadas las temperaturas en estado estable, se procede a calcular la termoconductividad de la siguiente forma:

$$Q = I * V \quad \text{Ec. 1}$$

$$Q = ha_A t_A + ha_s \frac{t_A + t_B}{2} + ha_B t_B + ha_C t_C \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

h = Coeficiente de convección. $[W / m^2 * ^\circ K]$

$a_{A,B,S,C}$ = Area del disco A, B, C, S $[m]$

$t_{A,B,C}$ = Temperatura en estado estable. $[^\circ K]$

Igualando Ec. 1 y Ec. 2 y despejando el coeficiente de convección, se tiene:

$$h = \frac{I * V}{h a_A t_A + h a_S \frac{t_A + t_B}{2} + h a_B t_B + h a_C t_C} \quad \text{Ec.3}$$

$$Q_S = \frac{K \pi r^2 (t_B - t_A)}{e_S} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

Q_S = Cantidad de calor que pasa a través de la muestra S [W]

K = Coeficiente de conducción térmica. [W / m °K]

e_S = Espesor de la muestra S [m]

r = Radio del disco de la muestra. [m]

Pero también es igual a:

$$Q_S = Q_{B-S} + Q_{S-A} \quad \text{Ec. 5}$$

La cantidad de calor que atraviesa B y pasa a S (Q_{B-S}), es:

$$Q_{B-S} = h a_S \frac{t_A + t_B}{2} + h a_A t_A \quad \text{Ec. 6}$$

La cantidad de calor que atraviesa S y pasa a A (Q_{S-A}), es:

$$Q_{S-A} = h a_A t_A \quad \text{Ec.7}$$

Aplicando la Ecuación 5 e igualando a la 4, se despeja el coeficiente de conductividad térmica:

$$Q_S = \frac{K \pi r^2 (t_B - t_A)}{e_S} = h a_S \frac{t_A + t_B}{2} + h a_A t_A + h a_A t_A$$

$$K = \frac{h e_S}{\pi r^2 (t_B - t_A)} \left(a_S \frac{t_A + t_B}{2} + 2 a_A t_A \right) \quad \text{Ec.8}$$

Con esta relación se determina la termoconductividad de la muestra S.

ANEXO 4

APLICACIONES

APLICACIONES

1. AISLAMIENTO TÉRMICO

Para disminuir las pérdidas de calor resulta necesario hacer el aislamiento térmico de muchas obras, unidades, conductos, cubriendo sus paredes con una capa de material que tienen baja conductividad térmica ($\lambda < 0.2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$). Tales materiales se llaman *aisladores térmicos*, por lo que la mayoría de estos se encuentran conformados o agregados a unos aglutinantes de una base fibrosa, polvorosa o porosa rellena con el aire con el fin de obtener las placas, los bloques, los ladrillos de aislamiento térmico.

En todos los tipos de aislamiento térmico el coeficiente de conductividad térmica siempre es más alto que el del aire que llena los poros, pero hay propiedades aún mejores y las poseen los materiales de aislamiento térmico por el vacío de capas múltiples y los de polvos y el vacío, por lo que la transferencia de calor mediante la conductividad térmica a través del aire se reduce en los aisladores térmicos de ésta índole por medio de crear un alto vacío, y para reducir la transferencia de calor por radiación sirve o bien el polvo, o bien una serie de capas de hojas metálicas con un grado pequeño de radiación integral que cumplen el papel de pantallas.

El tipo de aislamiento térmico se elige según la temperatura y las propiedades físico-químicas de los calor portadores, y cada aislador térmico tiene una temperatura límite completamente determinada t_{lim} , a la cuál éste todavía conserva sus propiedades.

El aislamiento térmico contra altas temperaturas para los hornos de diferente tipo se hace de capas múltiples, puesto que los aisladores térmicos que tienen temperatura límite alta, son, por lo general, caros y poseen alta conductividad térmica. El espesor de la capa interior del aislador térmico se hace tal que la

temperatura en su superficie exterior no supere la temperatura límite del material siguiente más barato y de conductividad térmica menor. Luego se define el espesor de la capa siguiente, es decir, el cálculo se realiza sucesivamente, empezando por el aislador térmico interior que es el más resistente a altas temperaturas.

1.1 ELECCIÓN DE UN AISLADOR TÉRMICO PARA LAS TUBERÍAS

La espuma rígida de poliuretano (PUR) producida " in situ " puede ser empleada para el aislamiento térmico en construcción dentro de un rango de temperatura entre -50°C y $+120^{\circ}\text{C}$ en servicio continuo.

Los principales campos de aplicación del PUR " in situ", son los siguientes:

- Aislamiento térmico de superficies en la construcción industrial (suelos, paredes, techos, perfiles de acero, depósitos, etc.).
- Aislamiento térmico de superficies en la construcción habitacional (losas, complejos de techumbres, muros, etc.).
- Aislamiento térmico e impermeabilización de cubiertas.
- Aislamiento térmico de instalaciones de climatización y frío.
- Aislamiento térmico de conducciones de calefacción y similares.

Esta espuma se caracteriza fundamentalmente, por su bajo coeficiente de conductividad térmica ($\text{W} / \text{m}^{\circ}\text{C}$). No importa si es aplicado por inyección, rellenando con el material líquido una cavidad, o por proyección, dejando que se expanda libremente sobre una superficie; el resultado siempre será una espuma rígida de baja densidad y con un coeficiente de aislamiento térmica inmejorable.

PUR = Poliuretano rígido

Tablero	Conductividad Térmica
-	cal/m ² °C hr
Aglomerado	0.09
Contrachapado	0.10
MDF	0.10
Hormigón	1.00
Acero	39.00
Aluminio	172.00

Tabla 1 Conductividad Térmica de materiales de construcción

La energía que llega al suelo a través de la radiación solar, penetra en él en función de sus propiedades térmicas, capacidad calorífica, conductividad térmica, difusividad térmica etc., que a su vez dependen de las características físicas del propio suelo, y de su contenido de humedad, y sufre una serie de pérdidas por radiación, conducción, convección y evaporación. Por la noche el suelo tiene un proceso de enfriamiento, de modo que la temperatura a lo largo del tiempo describe una curva cíclica parecida a una senoide.

En el caso de que el suelo esté húmedo y acolchado con una lámina de polietileno, el balance de energía se modifica, debido por una parte a que la humedad aumenta la conductividad y sobre todo la difusividad térmicas; haciendo posible un calentamiento más rápido hacia el interior, y por otra, hay una reducción de la radiación solar incidente debido a la transmitancia y reflexión de la lámina plástica, y una disminución notable de pérdidas caloríficas por conducción y convección, y sobre todo una eliminación de pérdidas de calor latente de evaporación a causa de la barrera impuesta por el acolchado. Asimismo las

pérdidas nocturnas por radiación calorífica al cielo, se hacen menores por la condensación del agua en la superficie interna del plástico.

El resultado es que un suelo en estas condiciones de elevado contenido de humedad y acolchado, consigue elevar progresivamente su temperatura, con diferencias que superan al suelo no solarizado en unos 10 °C.

1.2 DENTRO DEL CAMPO DE LA CONSTRUCCIÓN EXISTEN CIERTAS RECOMENDACIONES EN LO REFERENTE A AISLAMIENTO TÉRMICO.

Cuando las condiciones externas son distintas a aquellas que deseamos en el ambiente interior nos vemos obligados a calefaccionar, enfriar, humidificar o secar este espacio. La calidad de este ambiente contribuirá al grado de confortabilidad (o incófortabilidad) del diario vivir.

Se habla de aislamiento térmico cuando se busca que los materiales y el diseño constructivo frenen la pérdida o ganancia del calor de una vivienda.

Esto permite a las viviendas ahorro de energía, manutención de ambientes temperados y nulas condensaciones de humedad.

En los materiales se propaga por conducción, adquiriendo o cediendo calor en más o menos tiempo (inercia térmica) y ofreciendo mayor o menor resistencia (conductibilidad térmica).

El cambio térmico que se analiza es consecuencia de una diferencia de temperatura entre dos elementos o entre dos partes de un mismo elemento, lo que se conoce como conducción, por lo tanto existen factores que lo afectan, y son:

- **Diferencias de temperatura**

El flujo de calor será mayor mientras mayor sea la diferencia de temperatura que exista entre ambas caras del material.

- **Espesor del material**

El aislamiento es proporcional al espesor del material, es decir mientras más grueso sea éste mejor grado de aislamiento que proporciona.

- **Conductividad térmica del material**

La conductividad térmica es la propiedad que tienen los cuerpos homogéneos, tales como la madera, el ladrillo o la piedra, de conducir el calor, referida al espesor.

Así existen buenos conductores del calor (malos aislantes térmicos) y malos conductores del calor (buenos aislantes térmicos).

Ejemplos	
Malos aislantes térmicos	
Acero	45 Kcal /mh °C
Hormigón	1.5 Kcal /mh °C
Ladrillos	1.0 Kcal /mh °C
Buenos aislantes térmicos	
Tablero Aglomerado	0.060 Kcal /mh °C
Madera de balsa	0.045 Kcal /mh °C
Fibras minerales	0.035 Kcal /mh °C
A mayor valor, menor capacidad de aislamiento	

Tabla 2 Termoconductividad de buenos y malos aislantes térmicos, usados para la construcción

1.3 INERCIA TÉRMICA EN ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN

Si se somete a un edificio a una variación del flujo de calor en forma periódica (variación típica a lo largo del día), la inercia térmica produce un desfase de la onda de temperatura en el tiempo y una amortiguación de esta onda al atravesar un elemento constructivo. La inercia térmica de un edificio depende de la masa de los elementos que lo constituyen, de la conductividad térmica, de la capacidad calorífica específica y de la ubicación relativa de cada una de las capas que conforman el elemento.

Un elemento de la envolvente de un edificio constituido por una serie de capas almacena parte del calor que incide sobre la capa exterior del elemento en esta capa y el remanente pasa a la segunda capa, almacenándose en esta; el remanente, a su vez, pasa a la capa siguiente y así sucesivamente hasta alcanzar la capa en contacto con el aire interior.

La cantidad de calor almacenada en cada capa depende de su masa y de su capacidad calorífica específica, a mayor masa corresponde generalmente una capacidad calorífica elevada y por consiguiente una gran capacidad de almacenamiento energético. Las capas aislantes en contacto con el aire interior disminuyen el flujo de calor que llega al ambiente y limita a su vez el almacenamiento del exceso de calor interno en las capas vinculadas a este espacio, disminuyendo el efecto moderador de la temperatura interior deseable en climas con gran amplitud térmica a lo largo del día.

Contando con una inercia térmica adecuada, el desfase en la variación de la onda de calor puede llegar desde algunos minutos hasta varios días, siendo los valores usuales para el tipo de construcción típica en la región entre 2 y 8 horas, lo que significa que cuando exteriormente la temperatura comienza a disminuir en las capas interiores la temperatura comienza a aumentar.

En zonas de gran amplitud térmica se requieren elementos constructivos con un adecuado aislamiento y cierta inercia térmica de manera de asegurar confort interior durante las horas de mayor temperatura y radiación solar en el exterior y a la vez controlar el exceso de calor que generalmente se produce en estas zonas. Esta precaución combinada con una adecuada ventilación nocturna brindará edificios confortables con bajo consumo energético. Por lo tanto, el almacenamiento de energía será en forma de calor sensible o latente, es decir, el almacenamiento subterráneo de energía térmica.

Para el caso de almacenamiento de largo plazo, una de las técnicas utilizadas es el almacenamiento en subsuelo no saturado o rocoso (UTES: state of the art, 1994) empleando intercambiadores de calor en pozos o perforaciones verticales (BHE – Borehole Heat Exchanger). Mediante estos intercambiadores, energía térmica es inyectada o extraída del subsuelo y entregada a los consumidores ya sea en forma directa o a través de bombas de calor (Sanner, *et al*, 1998).

Es por tanto de suma importancia desarrollar métodos que permitan la optimización de estos sistemas antes de encarar su construcción. Una de las maneras de lograr este objetivo es mediante cálculo y simulación. Así, la conductividad térmica, λ , del subsuelo y la resistencia térmica, R_b , entre el fluido del portador de calor y la pared del pozo, son dos parámetros que afectan la eficiencia del depósito de calor y es por ende deseable su determinación paso necesario para encarar estudios de simulación y posterior toma de decisión respecto a la viabilidad técnica de un futuro proyecto de almacenamiento estacional de energía térmica acoplado al sistema de calefacción central del distrito.

2. APLICACIÓN SOBRE LA COMPACTACIÓN DEL ASFALTO

Los problemas asociados con el asfaltado del pavimento durante las condiciones de invierno son bien conocidos y en la práctica se evita en lo posible. Sin

El calor específico de los materiales de Isopor es independiente de la densidad aparente.

La estabilidad de forma a la temperatura (DIN 18 164) aumenta paralelamente a la densidad aparente y en proporción inversa a la carga. El material recién fabricado alcanza su plena estabilidad de forma a la temperatura después de un período de reposo. Los plásticos celulares no sometidos a carga soportan temporalmente temperaturas de hasta 100°C independientemente de la densidad aparente.

El contenido de humedad y la humedad atmosférica no influyen en las propiedades mecánicas de los materiales de Isopor.

Los suelos son generalmente no homogéneos aun si su estructura y composición no varía con la profundidad. En un período de clima seco las capas superiores están más secas que el subsuelo. La situación inversa ocurre en un período de lluvia.

Consecuentemente, las propiedades térmicas del suelo no son uniformes con la profundidad. De hecho, es bien conocido que dependen del contenido de humedad, la porosidad, la composición química y aún sobre la temperatura del suelo. También existe un flujo de humedad que está influenciado por los gradientes térmicos en el interior del suelo. Por lo tanto, el problema completo es uno acoplado, altamente complejo, que involucra tanto los flujos de calor y humedad y las propiedades termo físicas de los portadores de calor y de los aisladores térmicos dependen de las temperaturas, cuya mayoría al principio del cálculo no se conoce.

Tubos ISOLANT son fabricados en espuma de polietileno, un aislamiento térmico flexible de celda cerrada, totalmente impermeable al agua y al vapor, de muy baja conductividad térmica y alto poder termoaislante.

Las espumas ISOLANT, brindan un total aislamiento de termohidrófuga continua a conductos de calefacción y aire acondicionado, como así también a circuitos de refrigeración. Además, estos materiales no son higroscópicos, son imputrescibles, no corrosibles e inertes químicamente, no desprenden partículas ni fibras de ningún tipo y no anidan larvas, insectos, ni roedores. No contaminan el medio ambiente, no contienen freón y son reciclables.

3.1 TERMINACION EXTERIOR

Las espumas ISOLANT se presentan con terminación de film de polietileno, de film *aluminizado* o aluminio de alta resistencia. El primero le otorga mayor resistencia superficial. El aluminizado le brinda, además de resistencia superficial, el reflejo del calor radiante (no admite exposición solar), que es muy importante para evitar la ganancia de calor en refrigeración y aire acondicionado.

4. EN LO REFERENTE A LOS FRIGORÍFICOS

Un factor muy importante, que ha incidido en la elección de espesores de aislamiento (o sea, de las resistencias térmicas) inadecuados, es la falta de consideración de la relación de los precios actuales de la energía y de los materiales aislantes térmicos. Ello es aplicable en particular a la espuma rígida de poliuretano (PUR). Muchos espesores del aislante térmico aún corresponden a situaciones que regían en el pasado, cuando la energía era barata y los aislantes térmicos tenían precios considerablemente superiores a los actuales.

El tema de la refrigeración es un apartado sumamente importante en lo que a preservación de alimentos y acondicionamiento de aire se refiere. Ambos aspectos son de gran relevancia en el sostenimiento de la calidad de vida de la especie humana, pues le garantizan sobreponerse a condiciones climáticas adversas y conservar los alimentos por mayores períodos de tiempo.

Es por esta razón que la utilización de tubos de calor como fuentes de energía térmica para la operación de ciclos de refrigeración por absorción es una

alternativa de gran relevancia en el contexto actual, y lo será con mayor medida en el futuro no lejano.

5. DISIPADORES DE CALOR

Para que un disipador de calor cumpla de manera aceptable su función, el material a ser usado debe tener una buena **Conductividad térmica**, es decir, cuanto se demora el calor en pasar de un extremo del material a otro. Los materiales que mejor cumplen esta función son los metales, y muy especialmente los del grupo IB de la tabla periódica (Cobre, Plata y Oro), que además también son muy buenos conductores de la electricidad. Todos los demás metales tienen una conducción mediocre comparado a la de estos tres metales, pero hay uno que se destaca de los demás, es el Aluminio perteneciente al grupo IIIB de la tabla periódica y que en realidad es un metaloide, que tiene la mejor conductividad térmica del "resto" de los metales. Y a pesar de que las aleaciones normalmente no conducen bien el calor, existe una excepción, el metal más comúnmente usado en disipadores, principalmente de buena calidad como Alpha o Global Win, es una aleación de aluminio llamada Al6063, que tiene una conductividad mayor a la del aluminio puro.

Una buena conductividad térmica es necesaria para un buen disipador, pero también hay que pensar que esto va adherido a una fuente de calor (en el caso de computadores son los procesadores) y el disipador debe **ser liviano** para no crear una fuerza excesiva que podría arruinar el procesador. El metal más liviano entre los con mejor conductividad térmica es el Aluminio (y la aleación Al6063) y el más pesado es el oro.

6. EN AGUAS

La temperatura, es tal vez el factor que más influencia tiene en los lagos, pues determina la densidad, viscosidad y movimiento del agua. La temperatura juega un

ANEXO 5

CONDUCCIÓN Y DIFUSIÓN

CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por medio de la conducción se logra a través de dos mecanismos. El primero es la interacción molecular, en el cual las moléculas de niveles energéticos relativamente mayores (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles inferiores. Este tipo de transferencia sucede en los sistemas que tienen moléculas de sólidos, líquidos o gases y en los que hay un gradiente de temperatura.

El segundo mecanismo de transferencia de calor por inducción es el de electrones "libres", los cuales se presentan principalmente en los sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales. La facilidad que tienen los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; en consecuencia, se espera que los metales puros sean los mejores conductores de calor, hecho confirmado por la experiencia.

Se ha mencionado que la conducción es principalmente un fenómeno molecular que requiere de un gradiente de temperatura como fuerza motriz. Se atribuye a Fourier una expresión cuantitativa que relaciona el gradiente de temperatura con la naturaleza del medio conductor y la razón de la transferencia del calor:

$$\frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 1})$$

En que q_x es la razón del flujo de calor en la dirección de las "x" en Btu / hr; A es el área normal a la dirección del flujo de calor en ft²; dt/dx es el gradiente de temperatura en la dirección de las "x" en °F / ft; y "k" es la conductividad térmica de unidades Btu / hr- °F-ft²/ft. A la relación q_x / A , se le llama el flujo de calor direccional en "x". La expresión completa para el flujo de calor es:

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \nabla T \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde "q" es el vector de flujo de calor y ∇T es el gradiente de temperatura en forma vectorial. El signo negativo es necesario en las ecuaciones Ec.1 y Ec.2 debido a que el flujo de calor por conducción sucede en la dirección de un gradiente de temperatura decreciente. Estas ecuaciones son respectivamente las formas escalar y vectorial de la ecuación de la relación de Fourier, conocida en ocasiones como la primera ley de Fourier de la conducción del calor.

La conductividad " λ " es una propiedad de un medio dado, y las ecuaciones Ec.1 y Ec.2 son las relaciones de definición de esta cantidad.

La conductividad térmica es una propiedad importante de un material o medio. En gran parte, el valor de la conductividad determina la adaptabilidad de un material para un uso determinado.

DIFUSIÓN TÉRMICA

Considérese el sistema de la Figura. 1-a. El recipiente está lleno de una mezcla de moléculas que tienen masas y tamaños diferentes. Donde, los dos tipos de moléculas se distribuyen uniformemente en todo el volumen cuando la temperatura es uniforme.

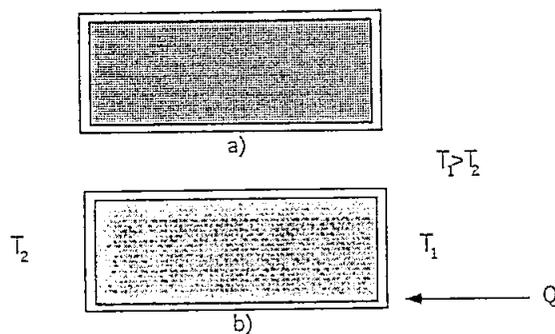


Figura. 1. Difusión térmica de moléculas no semejantes. (a) Distribución uniforme sin gradientes de temperatura; (b) gradientes de concentración resultantes de los gradientes de temperatura.

Ahora supóngase que se impone un gradiente de temperatura en el sistema, como se muestra en la Figura. 1-b. Como resultado de este gradiente de temperatura, se observa experimentalmente que las moléculas más livianas tienden a concentrarse en la región de más alta temperatura y las más pesadas, en la región de temperatura más baja.

El fenómeno que acaba de describirse se denomina *difusión térmica*, porque la difusión resulta de un gradiente térmico (de temperatura) en vez de un gradiente de concentración. El cálculo de las velocidades por difusión es complicado y está fuera del alcance del presente estudio; sin embargo, es posible dar una sencilla explicación cualitativa del mecanismo físico de ese efecto.

En el párrafo descrito de la difusión mutua de moléculas no semejantes, se ha establecido el hecho de que éstas moléculas influyen apreciablemente sobre la velocidad de transporte de masa.

La velocidad de transporte se gobierna por las velocidades a las cuales las moléculas salen de la colisión, las cuales, a su vez, dependen de la velocidad relativa de las moléculas antes del impacto. Sea la Figura. 1.2, la molécula 1 aumenta la cantidad de movimiento de la molécula 2, empujándola hacia la

derecha. Mientras más alta sea la velocidad relativa en el impacto, más rápidamente es empujada la molécula 2 hacia la derecha.

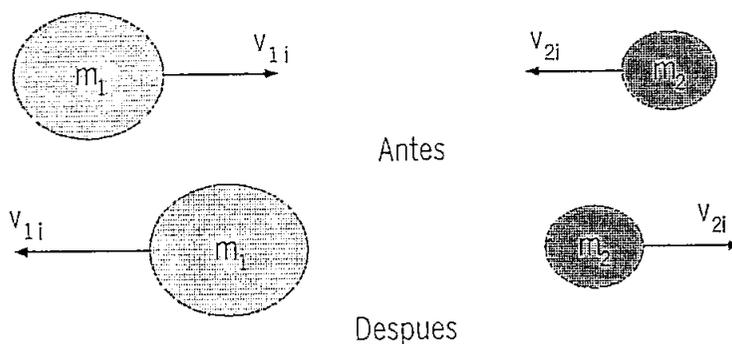


Figura. 1.2 Colisiones típicas para el análisis de la difusión térmica.

El anterior proceso de colisión puede relacionarse en el sistema de difusión térmica en la forma siguiente. En cualquier localización z en la mezcla gaseosa, todas las moléculas tienen la misma energía cinética media (puesto que T es uniforme en cualquier localización z), pero las moléculas más livianas tienen una velocidad media más alta que las moléculas más pesadas. Se ha visto que el mayor intercambio de cantidad de movimiento sucede en una colisión entre moléculas no semejantes que tengan la velocidad relativa más grande. Esta situación se encuentra cuando una molécula liviana de una región caliente choca con una molécula pesada de una región fría. Después de la colisión, la molécula liviana es devuelta hacia la región caliente y la molécula pesada, hacia la región fría. El efecto básico de la difusión térmica es, así, un resultado del hecho de que las colisiones de moléculas no semejantes, que tienen el mayor intercambio de cantidad de movimiento, son aquellas que tienden a forzar a las moléculas livianas a ir hacia la región caliente.

Es necesario hacer énfasis en que este modelo de difusión térmica es considerablemente simplificado, y que el tamaño molecular así como la masa molecular pueden influir en el proceso de difusión.

FUENTE DE CORRIENTE

RESISTENCIA DE LA NIQUELINA = 6.6Ω

Tiempo [s]	I[A]
0	0.932
5	0.932
10	0.932
15	0.932
20	0.932
25	0.932
30	0.932
45	0.932
60	0.932
90	0.933
120	0.933
150	0.933
180	0.933
210	0.934
240	0.934
270	0.934
300	0.934
330	0.934
360	0.934
390	0.934
420	0.934
450	0.934
480	0.934
510	0.934
540	0.934
570	0.933
600	0.933
630	0.933
660	0.933
690	0.933
720	0.933
750	0.933
780	0.933
810	0.933

Tiempo [s]	I[A]
840	0.933
870	0.933
900	0.933
930	0.933
960	0.933
990	0.933
1020	0.933
1050	0.933
1080	0.933
1110	0.933
1140	0.933
1170	0.933
1200	0.933
1230	0.933
1260	0.933
1290	0.933
1320	0.933
1350	0.933
1380	0.933
1410	0.933
1440	0.933
1470	0.933
1500	0.933
1530	0.933
1560	0.933
1590	0.933
1620	0.933
1650	0.933
1680	0.933
1710	0.933
1740	0.933
1770	0.933
1800	0.933

Promedio	0.9330882
----------	-----------

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD595CQ

Temp. [° C]	Voltaje [mV]	Temp. [° C]	Voltaje [mV]	Temp. [° C]	Voltaje [mV]
15.8	203	46.2	502	61.1	624
16.8	197	47.4	502	61.6	631
23.6	256	47.7	506	62.4	639
23.7	240	48	510	62.7	645
24.7	287	48.4	511	62.9	648
26	279	48.6	513	63	648
26.4	266	48.9	515	63.3	645
27.7	304	49.6	521	64.1	656
28.4	304	50.2	522	64.2	659
28.7	305	50.5	531	65	684
28.9	309	51.1	540	65.3	673
29.8	307	51.8	535	65.7	684
30.1	291	52.3	555	66.3	689
32.7	345	52.7	542	66.4	690
32.9	344	53.1	544	66.5	685
33.3	346	53.2	548	67.2	694
33.6	347	53.6	564	67.6	695
34	350	54.1	561	67.7	696
34.4	352	54.4	562	68.3	696
35.1	356	54.8	562	69.1	700
35.3	355	55.1	577	69.4	707
36.1	352	55.6	575	69.7	712
37.5	386	55.8	579	69.9	722
37.9	384	56.1	586	70.1	723
38	383	56.6	595	70.8	728
38.5	381	57.1	589	71.1	734
41.4	453	57.6	598	71.3	733
41.6	452	58.7	602	71.5	740
42.5	453	59.5	612		
42.9	442	60	613		
44.1	462	60.3	619		
45.7	504	60.7	623		

TABLA DE LA PRUEBA 1
ACONDICIONADOR DE TERMOCUPLA

Medidor patrón de Temperatura [° C]	Acondicionador Vo [V]	Conversión del Vo a Temperatura [° C]
21.40	0.98	19.60
22.50	1.00	20.00
23.50	1.05	21.00
24.16	1.10	22.00
24.92	1.15	23.00
25.10	1.20	24.00
26.90	1.25	25.00
28.40	1.30	26.00
29.60	1.35	27.00
31.60	1.40	28.00
31.70	1.45	29.00
33.10	1.50	30.00
33.70	1.55	31.00
35.40	1.60	32.00
35.50	1.65	33.00
36.70	1.70	34.00
38.00	1.75	35.00
39.40	1.90	38.00
40.30	1.95	39.00
41.90	2.00	40.00
42.50	2.05	41.00
43.10	2.10	42.00
44.10	2.15	43.00
44.70	2.20	44.00
46.20	2.25	45.00
46.60	2.30	46.00
47.90	2.35	47.00
50.10	2.40	48.00
50.10	2.45	49.00
50.20	2.50	50.00
50.60	2.55	51.00
51.90	2.60	52.00
53.10	2.65	53.00
54.00	2.70	54.00
55.50	2.75	55.00
56.20	2.80	56.00
56.90	2.85	57.00
58.00	2.90	58.00
58.50	2.95	59.00

Medidor patrón de Temperatura [° C]	Acondicionador Vo [V]	Conversión del Vo a Temperatura [° C]
59.50	3.00	60.00
60.70	3.05	61.00
61.50	3.10	62.00
62.20	3.15	63.00
62.30	3.20	64.00
63.70	3.25	65.00
64.50	3.30	66.00
65.20	3.35	67.00
65.90	3.40	68.00
66.70	3.45	69.00
67.70	3.50	70.00
68.30	3.55	71.00
68.90	3.60	72.00
70.20	3.65	73.00
70.80	3.70	74.00
71.90	3.75	75.00
72.50	3.80	76.00
74.60	3.85	77.00
75.50	3.90	78.00
78.30	3.95	79.00
79.00	4.00	80.00
80.10	4.05	81.00
81.10	4.10	82.00
81.80	4.15	83.00
83.10	4.20	84.00
83.70	4.25	85.00
84.80	4.30	86.00
85.80	4.35	87.00
86.50	4.40	88.00
87.30	4.45	89.00
88.00	4.50	90.00

TABLA DE LA PRUEBA 2
ACONDICIONADOR DE TERMOCUPLA

Medidor patrón de Temperatura [° C]	Acondicionador Vo [V]	Conversión del Vo a Temperatura [° C]
10.23	0.45	9.00
11.70	0.5	10.00
13.00	0.55	11.00
14.10	0.61	12.20
15.20	0.66	13.20
16.15	0.7	14.00
17.27	0.76	15.20
18.56	0.8	16.00
19.66	0.85	17.00
20.02	0.9	18.00
21.56	0.96	19.20
23.80	1.01	20.20
25.10	1.11	22.20
25.60	1.15	23.00
26.10	1.26	25.20
28.00	1.3	26.00
29.00	1.37	27.40
29.20	1.4	28.00
31.10	1.45	29.00
31.90	1.5	30.00
33.00	1.55	31.00
34.00	1.6	32.00
35.00	1.65	33.00
35.90	1.7	34.00
37.10	1.75	35.00
37.90	1.82	36.40
39.30	1.85	37.00
40.40	1.9	38.00
41.10	1.95	39.00
41.90	2.01	40.20
43.10	2.05	41.00
43.00	2.1	42.00
44.70	2.15	43.00
45.50	2.2	44.00
46.50	2.25	45.00
47.90	2.3	46.00
48.50	2.35	47.00
50.00	2.4	48.00
50.50	2.45	49.00

Medidor patrón de Temperatura [$^{\circ}$ C]	Acondicionador Vo [V]	Conversión del Vo a Temperatura [$^{\circ}$ C]
51.60	2.5	50.00
53.00	2.55	51.00
53.90	2.6	52.00
55.00	2.65	53.00
55.70	2.7	54.00
56.20	2.75	55.00
57.30	2.8	56.00
58.70	2.85	57.00
59.90	2.9	58.00
60.70	2.95	59.00
62.50	3	60.00
63.40	3.05	61.00
63.80	3.1	62.00
65.00	3.15	63.00
66.00	3.2	64.00
67.00	3.25	65.00
68.10	3.3	66.00
68.40	3.35	67.00
69.30	3.4	68.00
70.40	3.45	69.00
71.70	3.51	70.20
72.40	3.55	71.00
73.30	3.6	72.00
73.90	3.65	73.00
74.60	3.7	74.00
75.90	3.75	75.00
76.20	3.8	76.00
77.40	3.85	77.00
78.80	3.9	78.00
79.70	3.95	79.00
80.60	4	80.00
81.70	4.05	81.00
82.30	4.1	82.00
83.00	4.15	83.00
83.50	4.2	84.00
86.10	4.25	85.00
86.40	4.3	86.00
87.10	4.35	87.00
87.90	4.4	88.00
89.00	4.45	89.00
89.90	4.5	90.00
89.80	4.57	91.40

TABLA DE VALORES PARA LA MUESTRA 1 MEDIDO CON EL APARATO DE LEES

Muestra: # 1
 Volumen del recipiente: 40.26 [cm³]
 Peso: 3 [lb]
 Temperatura ambiente: 18 [°C]

TIEMPO [min]	TB [° C]	TA [° C]	TC [° C]	Voltaje[V]	Corriente [mA]
0	18.5	18	19	6.05	362
5	19	22	24.8	6.03	359
10	19.8	26.9	29.9	6.05	361
15	20.5	30.5	34	6.05	364
20	22	34	37	6.05	364
25	23.5	36.9	40	6.05	365
30	24.9	39	42	6.08	364
35	25.9	41	44	6.09	364
40	27	43	46	6.11	365
45	28	44	47.3	6.1	364
50	29	45.5	48.8	6.1	365
55	30	46.9	50	6.11	366
60	30.2	48	50.9	6.12	364
65	30.2	48.9	52	6.14	365
70	30.2	49.7	52.5	5.95	357
75	30.2	50	53	6	362
80	32.9	50.8	53.8	6.05	362
85	33	51	54	6.02	362
90	33.2	51.9	55	6.04	363
95	33.8	52	55	5.75	364
100	33.8	52.8	55.2	5.92	364
105	33	53	56	6.19	369
110	34	53.8	56.2	6.05	362
115	34.1	53.9	56.8	6.04	360
120	34.2	53.8	56.8	6.04	362
125	34.2	53.8	56.2	6	355
130	34.2	53.8	56.2	6.34	381

TABLA DE VALORES PARA LA MUESTRA 2 MEDIDO CON EL APARATO DE LEES

Muestra:	# 2
Volumen del recipiente:	40.26 [cm ³]
Peso:	2.85 [lb]
Temperatura ambiente:	25.97 [° C]

Tiempo [min]	Tb [° C]	Ta [° C]	Tc [° C]	V [V]	I [mA]
0	20	20	22	6.15	328
5	20.5	23.5	26	6.09	335
10	22	27	30	6.09	337
15	23.5	30	33	6.04	309
20	25	32	35	6.05	331
25	27	34.8	37.5	6.2	340
30	28.5	36.8	40	6.21	349
35	30	39	42	6.24	332
40	31	40	43	6.19	357
45	32.5	41.8	45	6.19	357
50	33.5	43	46.2	6.15	356
55	35	44.8	48	6.22	356
60	35.5	46	49	6.19	357
65	36.5	47	50	6.23	360
70	37.2	48	51	6.05	351
75	38	47	50	6.15	367
80	38	49	51	6.15	368
85	37.5	50	52.2	6.15	369
90	38.6	51	53.1	6.19	368
95	39	51.8	53.9	6.17	367
100	39.7	52.6	54.8	6.15	367
105	40	53	55	6.19	366
110	40	53	55	6.39	357
115	40.1	53.1	55	6.41	360
120	40	53.1	55.2	6.41	354
125	40	53.1	55.5	6.43	348

TABLA DE VALORES DE LA MUESTRA 1, MEDIDA MANUALMENTE

Muestra: M1
 Volumen del recipiente: 40.26 [cm³]
 Peso: 3 [lb]
 Temperatura ambiente: 18 [°C]

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Temperatura [°C]
0	14.81	870	43.3
5	15.3	900	43.4
10	18.5	930	43.5
15	20.9	964	43.6
30	24.9	990	43.7
45	27.3	1020	43.8
60	28.9	1050	43.9
90	31	1080	44
120	32.4	1110	44.2
150	33.4	1140	44.2
180	34.3	1170	44.3
210	35	1200	44.5
240	35.5	1230	44.6
270	36.1	1260	44.7
300	36.7	1290	44.8
330	37.8	1320	45
360	38.9	1350	45
390	39.6	1380	45.1
420	40	1410	45.1
450	40.4	1440	45.1
480	40.7	1470	45.2
510	41	1500	45.2
540	41.3	1530	45.3
570	41.5	1560	45.4
600	41.8	1590	45.5
630	42.1	1620	45.6
660	42.4	1650	45.5
690	42.7	1680	45.7
720	43	1710	45.8
750	43.1	1740	46
780	43.1	1770	46.1
810	43	1800	46.2
840	43.2		

* La porción de valores resaltados constituye la parte lineal escogida

TABLA DE VALORES DE LA MUESTRA 2, MEDIDA MANUALMENTE

Muestra: # 2
Volumen del recipiente: 40.26 [cm³]
Peso: 2.85 [lb]
Temperatura ambiente: 19 [°C]

Tiempo [s]	Voltaje [V]	Tiempo [s]	Voltaje [V]
0	0.724	510	3.287
5	1.01	540	3.352
10	1.566	570	3.349
15	1.919	600	3.349
30	2.372	630	3.385
45	2.649	660	3.395
60	2.586	690	3.42
90	2.795	720	3.406
120	2.896	750	3.441
150	2.828	780	3.454
180	2.955	810	3.455
210	2.97	840	3.514
240	2.944	870	3.513
270	2.995	900	3.511
300	3.022	930	3.581
330	3.068	960	3.489
360	3.028	990	3.528
390	3.139	1020	3.59
420	3.152	1050	3.528
450	3.222	1080	3.658
480	3.292		

La porción de valores resaltados constituye la parte lineal escogida

FEATURES

- Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
- Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
- Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
- Built-In Ice Point Compensation
- Wide Power Supply Range: +5 V to ± 15 V
- Low Power: <1 mW typical
- Thermocouple Failure Alarm
- Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
- Setpoint Mode Operation
- Self-Contained Celsius Thermometer Operation
- High Impedance Differential Input
- Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

PRODUCT DESCRIPTION

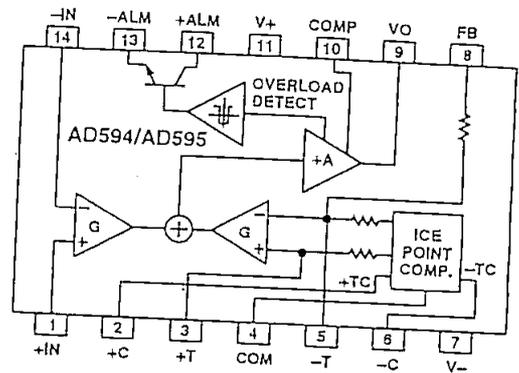
The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 μ A, but is also capable of delivering in excess of ± 5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications. The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of $\pm 1^\circ\text{C}$ and $\pm 3^\circ\text{C}$, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$, Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max										
ABSOLUTE MAXIMUM RATING													
+ V_S to - V_S			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	- $V_S - 0.15$		+ V_S	- $V_S - 0.15$		+ V_S	- $V_S - 0.15$		+ V_S	- $V_S - 0.15$		+ V_S	Volts
Differential Input Voltage	- V_S		+ V_S	Volts									
Alarm Voltages													Volts
+ALM	- V_S		- $V_S + 36$	- V_S		- $V_S + 36$	- V_S		- $V_S + 36$	- V_S		- $V_S + 36$	Volts
-ALM	- V_S		+ V_S	Volts									
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			Volts
TEMPERATURE MEASUREMENT (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C ¹			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature ²			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
AMPLIFIER CHARACTERISTICS													
Closed Loop Gain ³		193.4			193.4			247.3			247.3		
Input Offset Voltage		(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		
Input Bias Current		0.1			0.1			0.1			0.1		μV
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	μA
Common-Mode Range	- $V_S - 0.15$		- $V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		- $V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		- $V_S - 4$	- $V_S - 0.15$		- $V_S - 4$	mV
Common-Mode Sensitivity - RTO			10			10			10			10	Volts
Power Supply Sensitivity - RTO			10			10			10			10	mV/V
Output Voltage Range													mV/V
Dual Supply	- $V_S + 2.5$		+ $V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		+ $V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		+ $V_S - 2$	- $V_S + 2.5$		+ $V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		+ $V_S - 2$	0		+ $V_S - 2$	0		+ $V_S + 2$	0		+ $V_S - 2$	Volts
Usable Output Current ⁴		±5			±5			±5		±5		±5	mA
3 dB Bandwidth		15			15			15			15		kHz
ALARM CHARACTERISTICS													
$V_{CE(SAT)}$ at 2 mA		0.3			0.3			0.3			0.3		Volts
Leakage Current			±1			±1			±1			±1	μA max
Operating Voltage at -ALM			+ $V_S - 4$	Volts									
Short Circuit Current		20			20			20			20		mA
POWER REQUIREMENTS													
Specified Performance													
Operating ⁵		+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$			+ $V_S = 5$, - $V_S = 0$		Volts
Quiescent Current (No Load)		+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$			+ V_S to - $V_S \leq 30$		Volts
+ V_S		160	300		160	300		160	300		160	300	μA
- V_S		100			100			100			100		μA
PACKAGE OPTION													
TO-116 (D-14)		AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD		
Cerdip (Q-14)		AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ		

NOTES

¹Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.
²Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.
³Pin 8 shorted to Pin 9.
⁴Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.
⁵- V_S must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units.
 Specifications subject to change without notice.

INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 1.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN Fe-CuNi

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, $V_s = -5\text{ V}, +15\text{ V}$)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-.995	-189	-.777	-189
-10	-.501	-94	-.392	-94
0	0	0	0	0
10	.507	101	.397	101
20	1.019	200	.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	41.647	8058	30.799	7619
760	42.283	8181	31.214	7722
780	-	-	31.629	7825
800	-	-	32.455	8029
820	-	-	33.277	8232
840	-	-	34.095	8434
860	-	-	34.909	8636
880	-	-	35.718	8836
900	-	-	36.524	9035
920	-	-	37.325	9233
940	-	-	38.122	9430
960	-	-	38.915	9626
980	-	-	39.703	9821
1000	-	-	40.488	10015
1020	-	-	41.269	10209
1040	-	-	42.045	10400
1060	-	-	42.817	10591
1080	-	-	43.585	10781
1100	-	-	44.349	10970
1120	-	-	45.108	11158
1140	-	-	45.863	11345
1160	-	-	46.612	11530
1180	-	-	47.356	11714
1200	-	-	48.095	11897
1220	-	-	48.828	12078
1240	-	-	49.555	12258
1250	-	-	50.276	12436
			50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

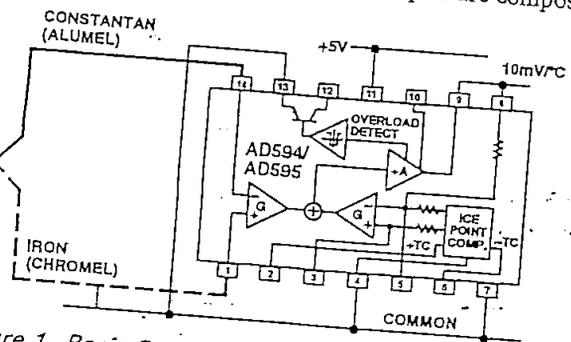


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

AD594/AD595

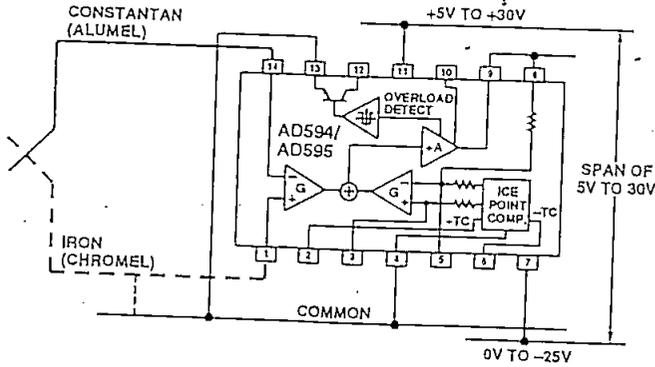


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

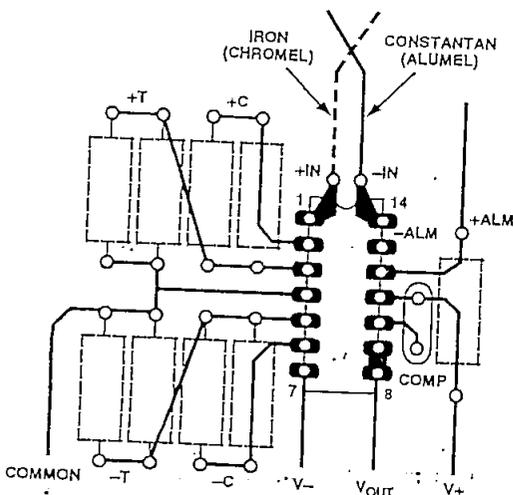


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

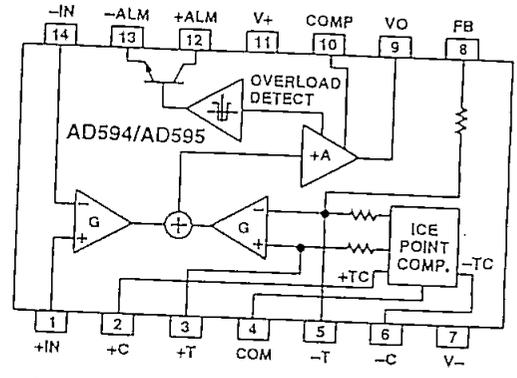


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μF capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

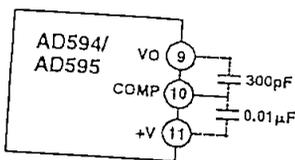


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

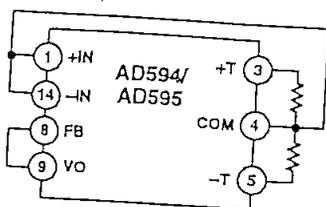


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 kΩ internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595
Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(\text{AD594}) = (60.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) / (51.7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 kΩ.

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 kΩ.

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

FAHRENHEIT OUTPUT

The AD594/AD595 may be configured to produce a voltage proportional to the temperature on a Fahrenheit scale. Conversion of temperature from a Celsius to Fahrenheit scale involves multiplying degrees Celsius by 9/5 and adding a 32 degree offset. The offset is produced by injecting a 200 nA/°C current into Pin 3 while increasing the feedback resistor to accommodate the gain of 9/5. Output calibration is as follows:

1. With the thermocouple disconnected, apply a 10 mV p-p, 100 Hz ac signal to Pins 1 and 14.
2. Adjust R_{GAIN} for a p-p output at Pin 9 of 3.481 V (AD594) or 4.451 V (AD595).
3. With the thermocouple connected and measuring 0°C, adjust R_{OFFSET} until the output at Pin 9 reads 320 mV.

The ideal transfer function based on a Fahrenheit output is:

$$\text{AD594 Output} = (\text{Type J Voltage} + 919 \mu\text{V}) \times 348.12$$

$$\text{AD595 Output} = (\text{Type K Voltage} + 719 \mu\text{V}) \times 445.14$$

This yields a higher output voltage swing over the useful range of the thermocouple therefore, requiring a higher power supply voltage to maintain a maximum output voltage 2.5 V below the supply.

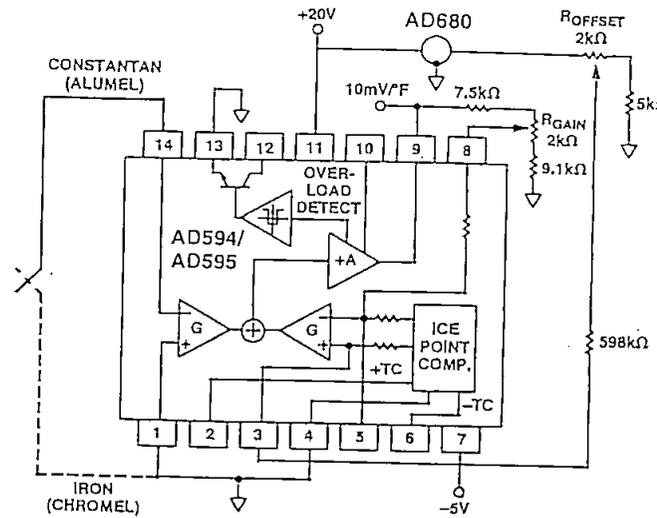


Figure 9. Fahrenheit Output

AVERAGE TEMPERATURE

By connecting a number of thermocouples in parallel to the AD594/AD595 input, an average junction temperature will be measured. As shown in Figure 10, a 300 Ω resistor is placed in series with one side of each thermocouple to limit the current circulating between the thermocouple branches. Based on a thermocouple temperature that is either higher or lower than the mean, a positive or negative voltage drop will be developed.

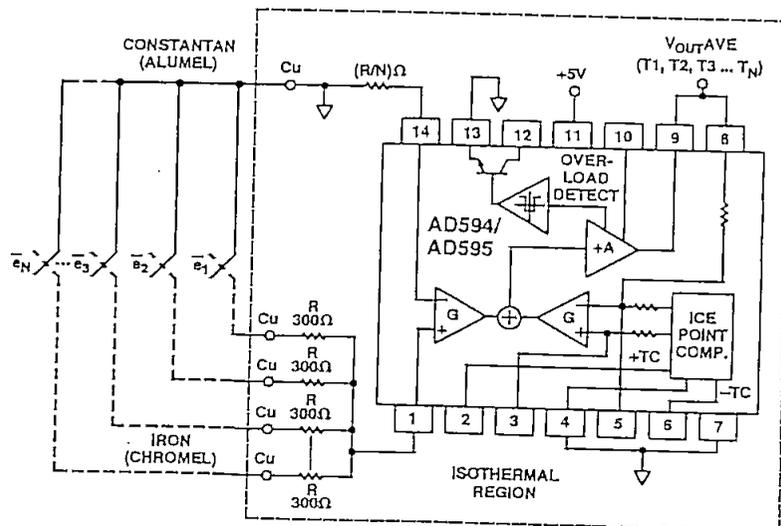


Figure 10. Measuring Average Temperature

AD594/AD595

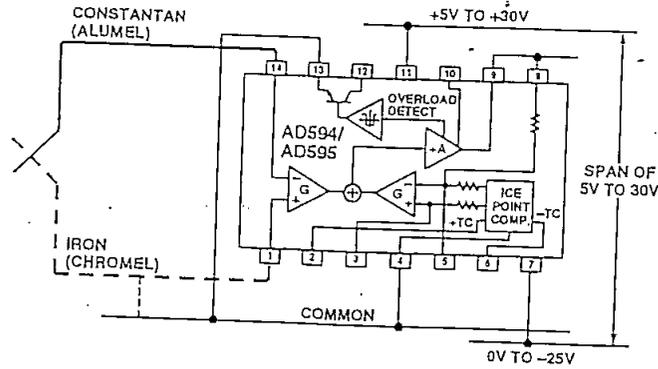


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

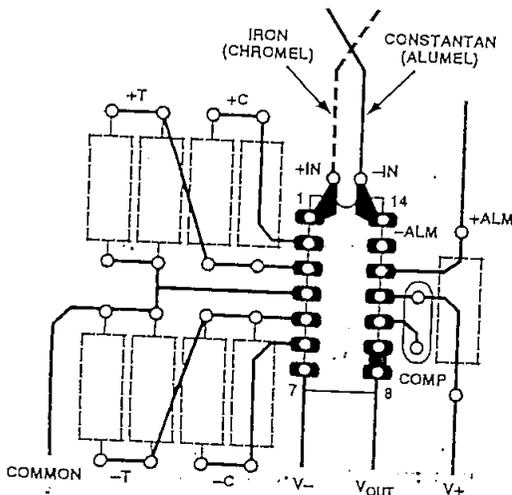


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

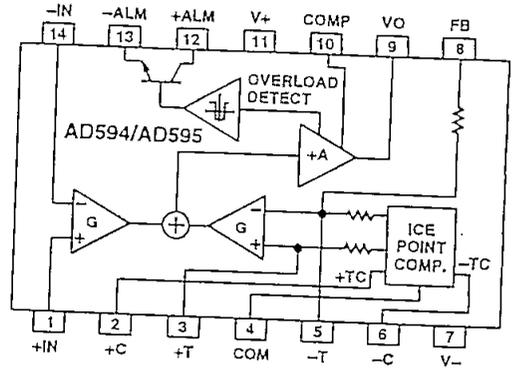


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μ F capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

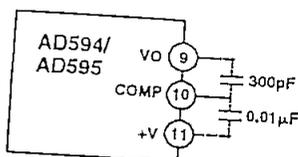


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

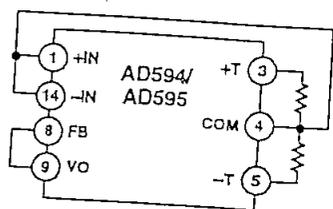


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 k Ω internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595
Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO and the initial output VO to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(\text{AD594}) = (60.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) / (51.7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 k Ω .

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 k Ω .

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

FAHRENHEIT OUTPUT

The AD594/AD595 may be configured to produce a voltage proportional to the temperature on a Fahrenheit scale. Conversion of temperature from a Celsius to Fahrenheit scale involves multiplying degrees Celsius by 9/5 and adding a 32 degree offset. The offset is produced by injecting a 200 nA/°C current into Pin 3 while increasing the feedback resistor to accommodate the gain of 9/5. Output calibration is as follows:

1. With the thermocouple disconnected, apply a 10 mV p-p, 100 Hz ac signal to Pins 1 and 14.
2. Adjust R_{GAIN} for a p-p output at Pin 9 of 3.481 V (AD594) or 4.451 V (AD595).
3. With the thermocouple connected and measuring 0°C, adjust R_{OFFSET} until the output at Pin 9 reads 320 mV.

The ideal transfer function based on a Fahrenheit output is:

$$\text{AD594 Output} = (\text{Type J Voltage} + 919 \mu\text{V}) \times 348.12$$

$$\text{AD595 Output} = (\text{Type K Voltage} + 719 \mu\text{V}) \times 445.14$$

This yields a higher output voltage swing over the useful range of the thermocouple therefore, requiring a higher power supply voltage to maintain a maximum output voltage 2.5 V below the supply.

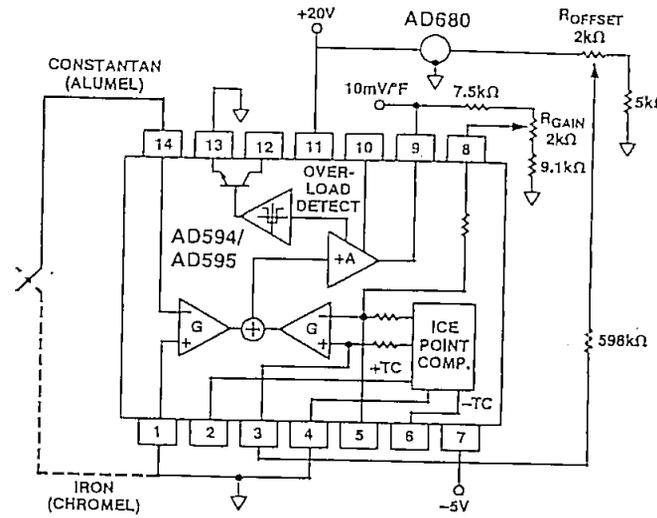


Figure 9. Fahrenheit Output

AVERAGE TEMPERATURE

By connecting a number of thermocouples in parallel to the AD594/AD595 input, an average junction temperature will be measured. As shown in Figure 10, a 300 Ω resistor is placed in series with one side of each thermocouple to limit the current circulating between the thermocouple branches. Based on a thermocouple temperature that is either higher or lower than the mean, a positive or negative voltage drop will be developed.

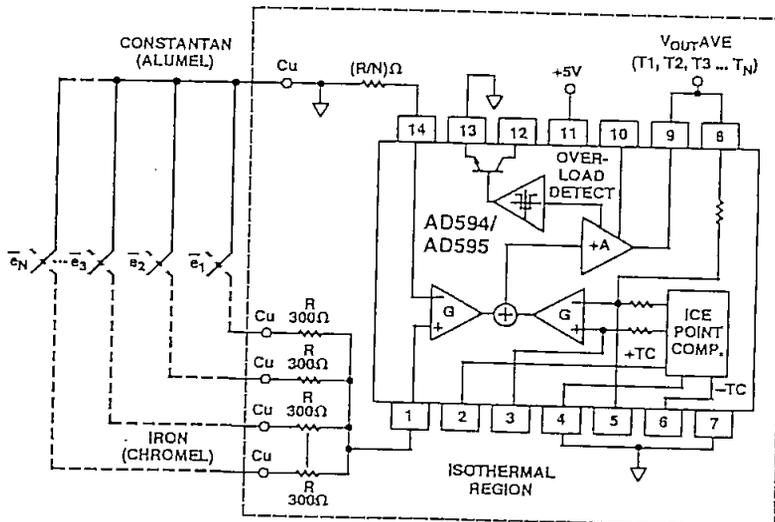


Figure 10. Measuring Average Temperature

AD594/AD595

THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T_1 and T_2 , in a repeatable way.

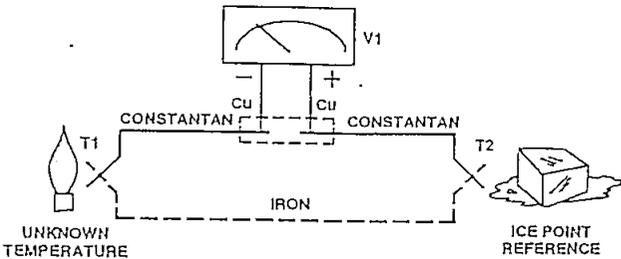


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

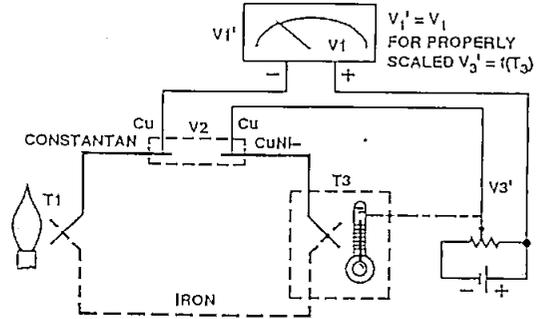


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

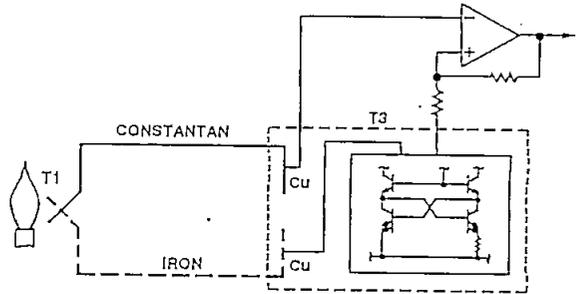


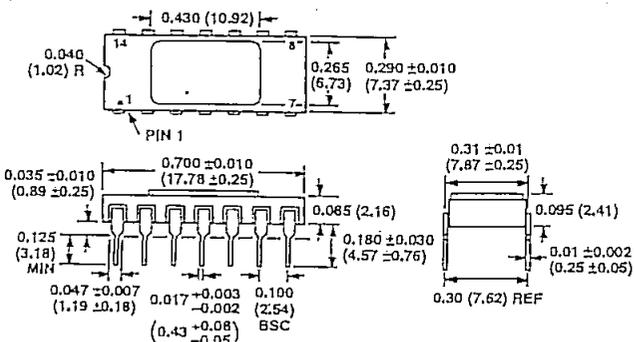
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

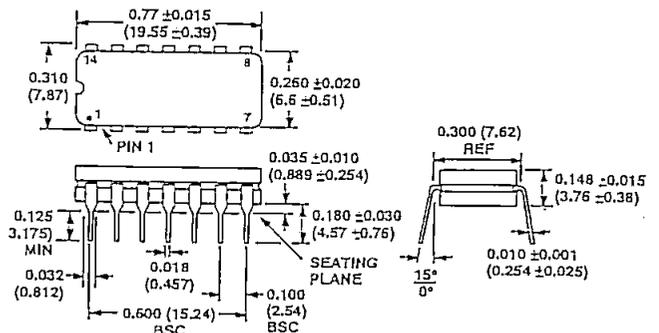
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

TO-116 (D) Package



Cerdip (Q) Package



2.0 MEMORY ORGANIZATION

There are three memory blocks in each of these PICmicro[®] MCUs. The Program Memory and Data Memory have separate buses, so that concurrent access can occur, and is detailed in this section. The EEPROM data memory block is detailed in Section 4.0.

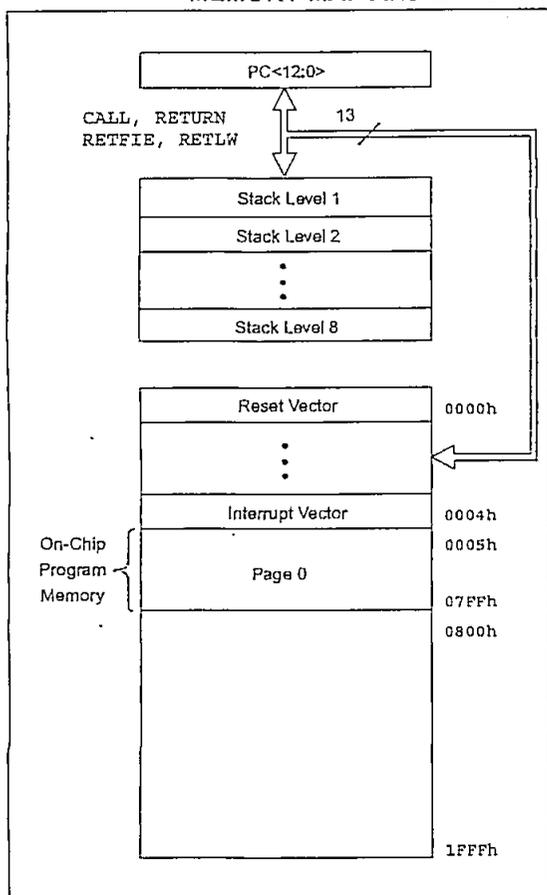
Additional information on device memory may be found in the PICmicro[™] Mid-Range Reference Manual, (DS33023).

2.1 Program Memory Organization

The PIC16F870/871 devices have a 13-bit program counter capable of addressing an 8K x 14 program memory space. The PIC16F870/871 devices have 2K x 14 words of FLASH program memory. Accessing a location above the physically implemented address will cause a wraparound.

The reset vector is at 0000h and the interrupt vector is at 0004h.

FIGURE 2-1: PIC16F870/871 PROGRAM MEMORY MAP AND STACK



2.2 Data Memory Organization

The data memory is partitioned into multiple banks which contain the General Purpose Registers and the Special Function Registers. Bits RP1 (STATUS<6>) and RP0 (STATUS<5>) are the bank select bits.

RP<1:0>	Bank
00	0
01	1
10	2
11	3

Each bank extends up to 7Fh (128 bytes). The lower locations of each bank are reserved for the Special Function Registers. Above the Special Function Registers are General Purpose Registers, implemented as static RAM. All implemented banks contain Special Function Registers. Some "high use" Special Function Registers from one bank may be mirrored in another bank for code reduction and quicker access.

Note: EEPROM Data Memory description can be found in Section 4.0 of this Data Sheet.

2.2.1 GENERAL PURPOSE REGISTER FILE

The register file can be accessed either directly, or indirectly through the File Select Register FSR.

PIC16F870/871

FIGURE 2-2: PIC16F870/871 REGISTER FILE MAP

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. ^(*)	00h	Indirect addr. ^(*)	80h	Indirect addr. ^(*)	100h	Indirect addr. ^(*)	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD ⁽²⁾	08h	TRISD ⁽²⁾	88h		108h		188h
PORTE ⁽²⁾	09h	TRISE ⁽²⁾	89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved ⁽¹⁾	18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved ⁽¹⁾	18Fh
T1CON	10h		90h		110h		190h
TMR2	11h		91h				
T2CON	12h	PR2	92h				
	13h		93h				
	14h		94h				
CCPR1L	15h		95h				
CCPR1H	16h		96h				
CCP1CON	17h		97h				
RCSTA	18h	TXSTA	98h				
TXREG	19h	SPBRG	99h				
RCREG	1Ah		9Ah				
	1Bh		9Bh				
	1Ch		9Ch				
	1Dh		9Dh				
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh				
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh				
	20h	General Purpose Register	A0h		120h	accesses A0h - BFh	1A0h
General Purpose Register	96 Bytes	32 Bytes	BFh	accesses 20h-7Fh			1BFh
			C0h				
			EFh				1EFh
		accesses 70h-7Fh	F0h	accesses 70h-7Fh		accesses 70h-7Fh	1F0h
	7Fh		FFh		17Fh		1FFh

Bank 0 Bank 1 Bank 2 Bank 3

 Unimplemented data memory locations, read as '0'.
^{*} Not a physical register.

Note 1: These registers are reserved; maintain these registers clear.
Note 2: These registers are not implemented on the PIC16F870.

2.2.2 SPECIAL FUNCTION REGISTERS

The Special Function Registers are registers used by the CPU and peripheral modules for controlling the desired operation of the device. These registers are implemented as static RAM. A list of these registers is given in Table 2-1.

The Special Function Registers can be classified into two sets; core (CPU) and peripheral. Those registers associated with the core functions are described in detail in this section. Those related to the operation of the peripheral features are described in detail in the peripheral feature section.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other resets (2)
Bank 0											
00h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
01h	TMR0	Timer0 module's register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
02h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
03h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxxx	000q quuu
04h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
05h	PORTA	PORTA Data Latch when written; PORTA pins when read								--0x 0000	--0u 0000
06h	PORTB	PORTB Data Latch when written; PORTB pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
07h	PORTC	PORTC Data Latch when written; PORTC pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
08h ⁽⁵⁾	PORTD	PORTD Data Latch when written; PORTD pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
09h ⁽⁵⁾	PORTE	RE2 RE1 RE0								--- -xxx	--- -uuu
0Ah ^(4,4)	PCLATH	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter								--0 0000	--0 0000
0Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
0Ch	PIR1	PSPIF ⁽³⁾	ADIF	RCIF	TXIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF		0000 -000	0000 -000
0Dh	PIR2	EEIF								---0 ---	---0 ---
0Eh	TMR1L	Holding register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Fh	TMR1H	Holding register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10h	T1CON	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON			--00 0000	--uu uuuu
11h	TMR2	Timer2 module's register								0000 0000	0000 0000
12h	T2CON	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0		-000 0000	-000 0000
13h											
14h											
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register1 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register1 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
17h	CCP1CON	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0			--00 0000	--00 0000
18h	RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x	0000 000x
19h	TXREG	USART Transmit Data Register								0000 0000	0000 0000
1Ah	RCREG	USART Receive Data Register								0000 0000	0000 0000
1Bh											
1Ch											
1Dh											
1Eh	ADRESH	A/D Result Register High Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON		0000 00-0	0000 00-0

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1:** The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2:** Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.
- 3:** Bits PSPIE and PSPIF are reserved on the 28-pin devices; always maintain these bits clear.
- 4:** These registers can be addressed from any bank.
- 5:** PORTD, PORTE, TRISD and TRISE are not physically implemented on the 28-pin devices, read as '0'.

PIC16F870/871

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (CONTINUED)

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other resets (2)	
Bank 1												
80h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000	
81h	OPTION_REG	RBP0	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111	
82h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000	
83h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	T0	PD	Z	DC	C	0001 1xxxx	000q quuu	
84h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu	
85h	TRISA	PORTA Data Direction Register								--11 1111	--11 1111	
86h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111	
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111	
88h ⁽⁵⁾	TRISD	PORTD Data Direction Register								1111 1111	1111 1111	
89h ⁽⁵⁾	TRISE	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	PORTE Data Direction Bits					0000 -111	0000 -111
8Ah ^(1,4)	PCLATH	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter								--0 0000	--0 0000	
8Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u	
8Ch	PIE1	PSPIE ⁽³⁾	ADIE	RCIE	TXIE	CCP1IE		TMR2IE	TMR1IE	0000 -000	0000 -000	
8Dh	PIE2									---0 ----	---0 ----	
8Eh	PCON									--- --qg	--- --uu	
8Fh	—	Unimplemented								—	—	
90h	—	Unimplemented								—	—	
91h	—											
92h	PR2	Timer2 Period Register								1111 1111	1111 1111	
93h	—											
94h	—											
95h	—	Unimplemented								—	—	
96h	—	Unimplemented								—	—	
97h	—	Unimplemented								—	—	
98h	TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	BRGH		TRMT	TX9D	0000 -010	0000 -010	
99h	SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	0000 0000	
9Ah	—	Unimplemented								—	—	
9Bh	—	Unimplemented								—	—	
9Ch	—	Unimplemented								—	—	
9Dh	—	Unimplemented								—	—	
9Eh	ADRESL	A/D Result Register Low Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu	
9Fh	ADCON1	ADFM				PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	0--- 0000	0--- 0000	

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
 Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.
- 3: Bits PSPIE and PSPIF are reserved on the 28-pin devices; always maintain these bits clear.
- 4: These registers can be addressed from any bank.
- 5: PORTD, PORTE, TRISD and TRISE are not physically implemented on the 28-pin devices, read as '0'.