

**BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES  
TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA**

**ALVARO ISRAEL BERMÚDEZ ROCA**

**ANDRÉS RICARDO BOGOTA DURAN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2008**

**BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES  
TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA**

**ALVARO ISRAEL BERMÚDEZ ROCA**

**ANDRÉS RICARDO BOGOTA DURAN**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR**

**EDGAR BARRIOS**

**DOCENTE FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2008**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Bucaramanga, Junio 10 de 2007

## CONTENIDO

	Pág.
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
<b>2. CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS</b>	<b>3</b>
2.1 Por función	3
2.1.1 Elementos primarios	3
2.1.2 Sensor	3
2.1.3 Transmisor	4
2.1.4 Transductor	5
2.1.5 Convertidores	5
2.1.6 Elementos finales de control	5
<b>2.2 MEDICIÓN DE LA VARIABLE TEMPERATURA</b>	<b>5</b>
2.2.1 Efectos físico químicos relacionados con la medición de la temperatura	6
2.2.2 Efecto seebeck	6
2.2.3 Efecto peltier	7
2.2.4 Efecto thomson	8
2.2.5 Indicadores locales de temperatura	8
2.2.5.1 Termómetros líquidos	9
2.2.5.2 Termómetros bimetálicos	9
2.3 Elementos primarios de temperatura	10
2.3.1 Termopozos	10
2.3.2 Termopares	11
2.3.2.1 Medidas con termopares	14
2.3.2.2 Amplificadores para termopares compensado	16
2.3.2.3 Códigos de colores de los termopares	17
2.3.3 Termorresistencias	18
2.3.3.1 Termoresistencia a dos hilos	19
2.3.3.2 Termoresistencia a tres hilos	20
2.3.3.3 Termoresistencia a cuatro hilos	21
2.3.4 Circuito integrado Lm-35	21

2.3.5 Termistor	22
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>24</b>
3.1 Selección de elementos	24
3.1.1 Selección entre termopares, termoresistencia, termistores o sensor IC	24
3.1.2 Calibración de instrumentos de temperatura	25
3.1.3 Calibrador de bloque metálico	25
3.1.5 Calibrador de baño de arena	25
3.1.5 Calibrador de baño de líquido	25
3.1.6 Hornos de temperatura	25
<b>3.2 DISEÑO DEL MODULO DE PRUEBAS</b>	<b>26</b>
3.2.1 Descripción general del modulo	26
3.2.2 Tanque de calentamiento	27
3.3.3 Resistencia de calentamiento	29
3.4.4 Termostato	30
3.5.5 Termopozos	31
3.6.6 Termómetro bimetalico	32
3.7.7 RTD o pt-100	32
3.8.8 Termocupla tipo k	33
3.8.9 Termistor NTC	34
3.8.9.1 Circuito integrado Lm-35	34
3.9 Acople de los materiales y diseño metodológico	34
3.9.1 Acople del sistema	35
<b>4. ELABORACIÓN DE PRUEBAS</b>	<b>39</b>
4.1 Calentamiento del tanque	39
4.2 RTD o Pt-100	39
4.3 Termocupla tipo K	43
4.4 Circuito integrado Lm-35	45
4.5 Termistor PTC	47
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>51</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diferentes tipos de termopares.	12
Tabla 2. Características de resistencia a condiciones externas de los termopares.	12
Tabla 3. Errores limites de los termopares de acuerdo a la norma ISA 96.1	13
Tabla 1. Principales características de las termoresistencias	18
Tabla 5. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Bimetálico)	40
Tabla 6. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Alcohol)	41
Tabla 7. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Teóricamente)	42
Tabla 8. Temperatura Vs. Voltaje de Salida AD (594) mV	43
Tabla 9. Temperatura Vs. Voltaje de Salida AD (594) mV (Teóricamente)	44
Tabla 10. Temperatura Vs. Voltaje (mV) de Salida Lm-35	45
Tabla 11. Temperatura Vs. Voltaje (mV) de Salida Lm-35 (Teóricamente)	46
Tabla 12. Temperatura Vs. Resistencia, en un termistor	48

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de bloques de un transmisor	4
Figura 2. Efecto Seebeck	7
Figura 3. Efecto Peltier	7
Figura 4. Efecto Thomson	8
Figura 5. Termómetro de Mercurio y alcohol	9
Figura 6. Termómetro bimetálico	10
Figura 7. Termopozos	11
Figura 8. Relación mV vs temperatura de los diferentes termopares	13
Figura 9. Comportamiento de físico de la medición directa de la FEM de un termopar	14
Figura 10. Forma de medir directa la FEM con voltímetro	15
Figura 11. Diagrama de pines de AD594	16
Figura 12. Comportamiento de la FEM utilizando el CI AD594	17
Figura 13. Código de colores de los termopares en diferentes países	17
Figura 14. Configuración de termoresistencia a dos hilos	20
Figura 15. Configuración de termoresistencia a tres hilos	20
Figura 16. Conexión a 4 hilos	21
Figura 17. Diagrama de pines Lm-35	22
Figura 18. Termistor	23
Figura 19. Estructura funcional del modulo	27
Figura 20. Vista superior del modulo	28
Figura 21. Resistencia de calentamiento	29
Figura 22. Termostato	30
Figura 23. Termopozos	31
Figura 24. Termómetro bimetálico	32
Figura 25. Pt-100	33
Figura 26. Termocupla tipo K	34
Figura 27. Diseño metodológico utilizado para la elaboración del modulo	34
Figura 28. Vista superior del modulo	35
Figura 29. Vista superior del modulo real	35
Figura 30. Vista frontal del modulo	36
Figura 31. Vista frontal del modulo real	36
Figura 32. Vistas laterales del modulo	37
Figura 33. Vistas laterales del modulo real	37
Figura 34. Vista trasera del modulo	38
Figura 35. Vista trasera del modulo real	38
Figura 36. Vistas del Modulo.	38

Figura 37. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos. (Termómetro de bimetálico)	40
Figura 38. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos. (Termómetro de alcohol)	41
Figura 39. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos, con datos de fabricante.	42
Figura 40. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Termocupla tipo K	44
Figura 41. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Termocupla tipo K con datos de fabricante.	44
Figura 42. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Lm-35	46
Figura 43. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Lm-35 con datos de fabricante.	47
Figura 44. Grafica de temperatura Vs. Resistencia, Termistor PTC.	48



## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Anexo A	12
Anexo 2. Anexo B	16
Anexo 3. Anexo C	18
Anexo 4. Anexo D	22
Anexo 5. Anexo E	23

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA

**AUTOR(ES):** ALVARO ISRAEL BERMÚDEZ ROCA  
ANDRÉS RICARDO BOGOTA DURAN

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** EDGAR BARRIOS

### RESUMEN

En la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, trabajamos diferentes sensores como LM35, termistor, termocuplas o RTD, pero los estudiantes al medir procesos térmicos casi nunca saben que sensor es apropiado para utilizar. Por tanto se construyó un banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores de temperatura, así los estudiantes o cualquier interesado puede utilizar el modulo y obtener los comportamientos que presentan estos sensores. El sistema está integrado por un tanque con su respectiva resistencia de calentamiento de 1000W a 110V, obteniendo un rango de temperatura de 0° a 100°C. En las paredes del tanque se ubican 4 termopozos para acoplar los sensores. Además se tiene un termómetro bimetálico y uno de alcohol que brinda la temperatura de referencia para obtener la exactitud de los sensores. El sistema no se limita a la academia, tiene una perspectiva industrial para la medición de otros líquidos diferentes al agua, ya que está fabricado para soportar temperaturas superiores a los 100°C y se tiene sensores que soportan altas temperatura. Es importante tener cuidado en la manipulación de los termopozos y sensores, ya que al ser elementos superconductores térmicos, se calientan demasiado.

**PALABRAS CLAVES:** Sensor, transductor, termopozo, RTD, termistor, sensor IC, termopar, Instrumentación, Transmisor.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## OVERVIEW OF WORK OF DEGREE

**TITLE:** BANK OF TESTING FOR THE CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF SENSORS FOR TEMPERATURE

**AUTHOR (S):** ALVARO ISRAEL BERMUDEZ ROCA  
BOGOTA RICARDO ANDRES DURAN

**FACULTY:** Faculty of Electrical Engineering

**DIRECTOR (A):** EDGAR BARRIOS

### ABSTRACT

At the Universidad Pontificia Bolivariana - Seccional Bucaramanga, various sensors are working as LM35, thermistor, or RTD termocuplas, but students to measure thermal processes almost never know that sensor is suitable for use. So we built a test bench for the characterization of different types of temperature sensors, and students or anyone interested can use the module and get the behaviors presented by these sensors. The system is composed of a tank with its own heating pad of 1000W to 110V, with a temperature range of 0 to 100 ° C. On the walls of the tank are located 4 termopozos to attach the sensors. In addition there is a bimetallic thermometer and an alcohol that provides the reference temperature for the accuracy of the sensors. The system is not confined to academia, has an industrial perspective for measuring other liquids other than water, as it is manufactured to withstand temperatures above 100 ° C and has sensors that support high temperature. It is important to be careful in handling the termopozos and sensors, as to be elements thermal superconductors, it was too warm.

**KEY WORDS:** Sensor, transducer, termopozo, RTD, thermistor, IC sensor, thermocouple, Instrumentation, Transmitter.

**V ° B ° DIRECTOR OF WORK OF DEGREE**

## INTRODUCCIÓN

En la instrumentación electrónica existen varios tipos de sensores, los cuales sirven para medir procesos térmicos. En algunos sensores su implementación requiere de una gran inversión de dinero, además cuentan con diferentes características dadas por el fabricante, que muchas veces no se puede probar en un laboratorio. De hay la duda al momento de elegir un sensor para medir un proceso térmico. Por esta razón se decidió crear un banco de pruebas para la caracterización de diferentes tipos de sensores de temperatura, para observar el comportamiento de varios sensores en tiempo real y decidir cual es el adecuado para el uso que se necesita.

Durante el desarrollo del trabajo de grado se resalta la importancia de la variable temperatura, así como la necesidad de que esta pueda ser sensada y procesada de una manera efectiva, tanto en un ámbito académico como industrial.

En el banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores, se usaron termopozos en sus paredes para proteger el elemento primario y además simular un proceso industrial obteniendo los comportamientos de cada sensor.

Una de las características importante de este modulo es que además de la Pt-100 y la termocupla tipo K, se acoplo un Ci Lm35 y un termistor, ya que son económicos, tienen buena respuesta y lo más importante es que son de los más usados por lo estudiantes y gente del común.

Durante el desarrollo del documento, se abarcan dos aspectos, el marco teórico y el desarrollo metodológico; en el marco teórico se realiza una descripción de los aspectos relacionados con sensores, transductores, tipos de mediciones, generalidades de la variable temperatura, con el objetivo que el lector tenga un enfoque conceptual que le ayude a comprender con mayor facilidad el proyecto realizado. En la sección del desarrollo metodológico se abarca el proceso de elaboración, diseño y ejecución del banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores de temperatura, se cuenta con un completo registro fotográfico del proceso.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Construir un banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores, utilizando termopozos y rango de medida entre 20 a 100 °C.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Profundizar en el conocimiento de la tecnología de medición de temperatura.
- Estudiar los métodos de protección del elemento primario de temperatura con la utilización de termopozos.
- Estudiar el comportamiento de cada sensor y obtener las diferencias entre cada uno de ellos, para poder elegir al momento de necesitar uno.
- Adaptar sensores de IC a termopozos manteniendo el aislamiento eléctrico y basándonos en estrictas normas ya establecidas.

## 2. CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS

Los instrumentos de medición y control tienen, por lo general, una estructura compleja, su funcionamiento se basa en determinados parámetros, para entender claramente su función se deben clasificar de la manera más acertada y adecuada. Por lo general se clasifican en; **Por función del instrumento y otra por variable de proceso a medir**. En el desarrollo de este capítulo se hablara de la clasificación de los instrumentos.

### 2.1 Por función

La clasificación de un elemento por función se hacen en referencia al tipo de acción que ejecute, si está en contacto directo con la variable, si transmiten la variable, si transforma la señal, si realiza alguna operación de control, etc.

#### 2.1.1 Elementos Primarios

Este tipo de instrumento está en contacto directo con el fluido o variable, de manera que utiliza o absorbe la energía del medio controlado para proporcionar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada, es decir transforma en magnitudes que pueden ser tratadas, transmitidas, etc. Algunos ejemplos de este tipo de elementos son: placas de orificio y los elementos de temperatura (termopares o termorresistencias).

Es de vital importancia resaltar que elementos como los manómetros, termómetros, transmisores de presión, entre otros, poseen su elemento primario dentro de la estructura del instrumento.

#### 2.1.2 Sensor<sup>1</sup>

Instrumento que, primero, detecta el valor de una variable de proceso, y que supone un correspondiente estado inteligible o salida. El sensor también es conocido como un detector o elemento primario.

---

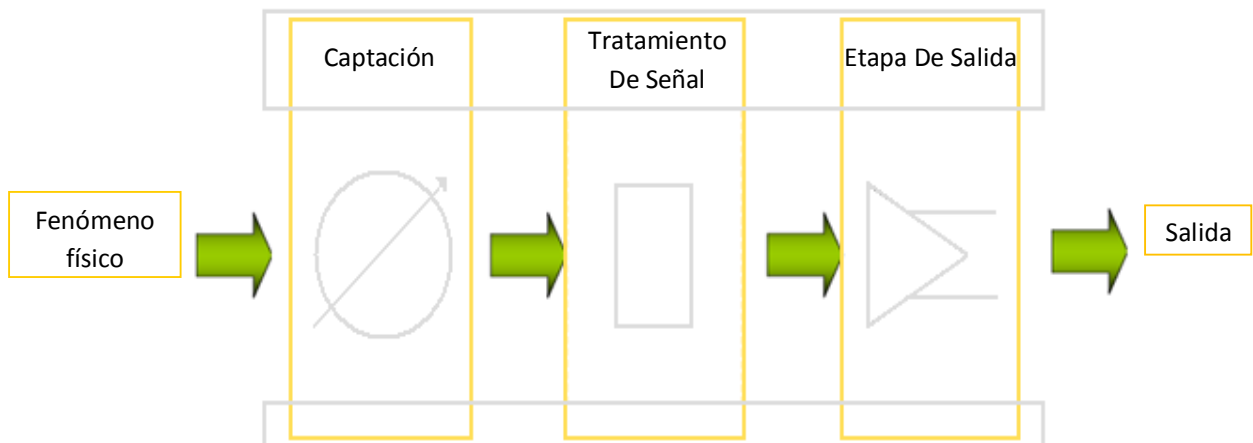
<sup>1</sup> Basado en el texto encontrado en: AMERICAN NATIONAL STANDARD, Instrumentation Symbols and Identification, reformado 13 de Julio de 1992. P. 13

### 2.1.3 Transmisor<sup>2</sup>

Es un dispositivo que detecta la variable del proceso por medio de un **sensor** y la transmite a distancia a un instrumento receptor. El sensor puede o no, estar integrado con el transmisor. La transmiten en forma de una señal, ya sea neumática (3-15 psi), electrónica (4-20 mA), pulsos, protocolarizada (hart) o bus de campo (Fieldbus Foundation, Profibus, etc.). Este tipo de instrumentos proporcionan una señal continua de la variable de proceso.

Figura 1. Diagrama de bloques de un transmisor.

**TRANSMISOR = SENSOR/TRANSDUCTOR + ACONDICIONADOR**



Fuente: Mantilla Saavedra Juan Carlos. Instrumentación, Automatización y Control Industrial.

Existen básicamente dos tipos de transmisores, ciegos (sin indicación local) y con indicador local incorporado.

Los transmisores con indicador local captan la variable del proceso y la visualizan en una escala visible localmente. Dentro de los indicadores locales, se tiene: manómetros (presión), termómetros (temperatura), rotámetros (caudal), etc.

Por lo general estos instrumentos no contiene la electrónica asociada, aunque por lo general, dentro de este grupo se encuentran los indicadores electrónicos conectados a los transmisores, estos pueden ser analógicos o digitales.

<sup>2</sup> Basado en el texto encontrado en: AMERICAN NATIONAL STANDARD, Instrumentation Symbols and Identification, reformado 13 de Julio de 1992. P. 13

#### 2.1.4 Transductor<sup>3</sup>

Un término general para un dispositivo que recibe información en forma de una o más cantidades físicas, modifica la información y / o su forma, en caso necesario, produce una señal de salida resultante. Dependiendo de la solicitud, el transductor puede ser un elemento primordial, transmisor, de relevo, convertidor u otro dispositivo. Debido a que el término "transductor" no es específico, así como su uso para aplicaciones específicas, no se recomienda.

#### 2.1.5 Convertidores

Este elemento recibe un tipo de señal de un instrumento y la modifican a otro tipo de señal. Un ejemplo muy común, son los convertidores de señal neumática a electrónica, de mV a mA, de señal continua a tipo contacto, etc. Su uso se encuentra estrechamente ligado a la necesidad de homogeneización de los sistemas de control, es decir, que todo el sistema maneje un mismo tipo de señal para todo el proceso, sin importar que tipo de señal arroje los sensores, etc.

#### 2.1.6 Elementos finales de control

El funcionamiento de estos elementos, radica en realizar una acción en particular sobre alguna parte del proceso, es decir, reciben un tipo de señal procedente de un controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. Un ejemplo muy particular de estos elementos son las válvulas de control, servomotor o variador de frecuencia; otro tipo de instrumentos cada vez menos utilizados son los registradores y controladores locales.

### 2.2 Medición de la variable temperatura

La medición de la temperatura es una de las acciones más utilizadas en los procesos industriales; la trasmisión de la variable temperatura produce una serie de efectos, los cuales serán descritos durante este capítulo, se hablara de los diferentes elementos utilizados para la medición de la temperatura, así como las técnicas utilizadas para la calibración de estos instrumentos.

---

<sup>3</sup> Basado en el texto encontrado en: AMERICAN NATIONAL STANDARD, Instrumentation Symbols and Identification, reformado 13 de Julio de 1992. P. 13



Las limitaciones de las diferentes tecnologías de medición están estrechamente entrelazadas con la precisión requerida, velocidad de respuesta, condiciones del proceso, etc.

La medición de la temperatura a diferencia de otras variables, posee una inercia bastante elevada; entre la medición de la temperatura y el proceso, es necesario instalar un termopozo, vaina o thermowell como sistema de protección, de asilamiento entre el sensor y el proceso. Este elemento debe diseñarse de acuerdo a las especificaciones mecánicas del proyecto.

#### 2.2.1 Efectos físico-químicos relacionados con la medición de la temperatura.

Elementos de medición como termocuplas, termorresistencias, etc. Funcionan en base a fenómenos físicos-químicos que dan origen a magnitudes eléctricas en proporción a la temperatura medida, dicho efectos son estudiados a continuación.

#### 2.2.2 Efecto Seebeck<sup>4</sup>

El efecto Seebeck, fue descubierto por el físico alemán *Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831)*, este descubrimiento hace referencia a la producción de electricidad en un circuito eléctrico compuesto por conductores de diferente índole, mientras que estos tienen diferentes temperaturas. Los conductores son conectados en serie, la diferencia de temperatura produce un flujo de electrones en los conductores, este flujo tiene su origen en el área de mayor temperatura y se dirige hacia el área de menor temperatura.

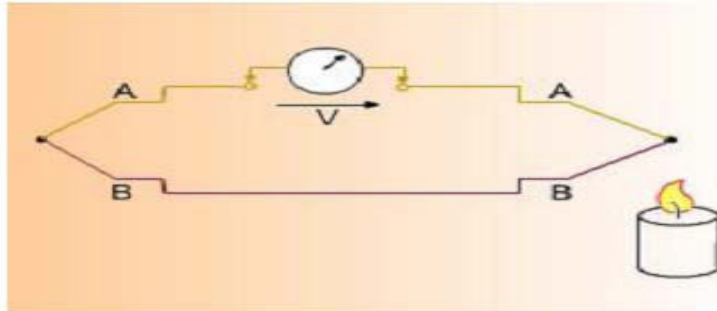
En el punto de contacto de los conductores se produce una diferencia de potencial. La magnitud de la tensión-corriente producida depende del tipo de material de los conductores, la temperatura de contacto más no depende de la temperatura que se distribuye a lo largo del conductor.

La termoelectricidad permite evaluar los termopares por el coeficiente de Seebeck para diferentes materiales con un rango desde +43 hasta -38 mV/grado, la unión de dos aleaciones diferentes entregan un voltaje directo, propiedad eléctrica muy importante. En la figura 1 se observa una explicación del efecto.

---

<sup>4</sup> Basado en el texto encontrado en: Medición de temperatura: sensores termoelectricos, Edwin Jhovany Álzate Rodríguez. José William Montes Ocampo. Mayo de 2007

Figura 2. Efecto Seebeck



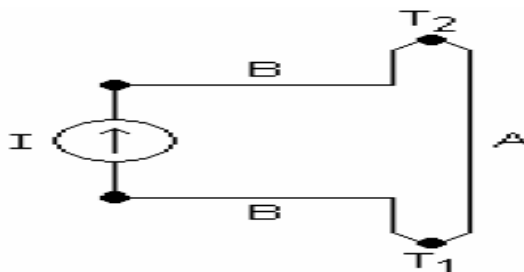
Fuente: medición de temperatura: sensores termoelectricos, Edwin Jhovany Álzate Rodríguez. José William Montes Ocampo. Mayo de 2007. Universidad tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

### 2.2.3 Efecto Peltier<sup>5</sup>

Este efecto se fundamenta en el calentamiento o enfriamiento de una junta dos metales diferentes A y B, al pasar corriente por la unión. Este efecto, sólo depende del tipo de metal y de la temperatura  $T_1$  y  $T_2$  de las uniones.

La circulación de la corriente a través del circuito puede emitir o absorber calor en la juntura de los mismos, dependiendo de la dirección de la corriente. La cantidad de calor absorbida o emitida en la juntura resulta proporcional a la corriente eléctrica mediante el coeficiente Peltier. En la figura 2 se observa un esquema del funcionamiento del efecto Peltier.

Figura 3. Efecto Peltier



Fuente: medición de temperatura: sensores termoelectricos, Edwin Jhovany Álzate Rodríguez. José William Montes Ocampo. Mayo de 2007. Universidad tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

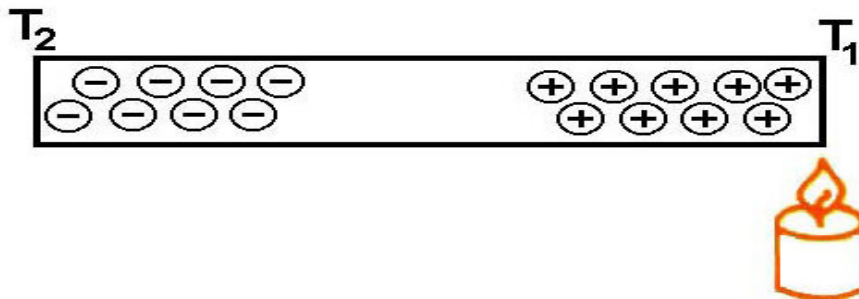
<sup>5</sup> Basado en el texto encontrado en: Medición de temperatura: sensores termoelectricos, Edwin Jhovany Álzate Rodríguez. José William Montes Ocampo. Mayo de 2007

## 2.2.4 Efecto Thomson<sup>6</sup>

Este efecto describe la absorción o liberación de calor por parte de un conductor, el cual se encuentra sometido a una variación de temperatura, esta variación ocasiona la circulación de una corriente. Al circular la corriente del punto más caliente hacia el frío se está liberando calor, es decir la cantidad de calor asociada es proporcional a ambos, el gradiente térmico y la corriente circulante, a través del coeficiente Thomson.

La liberación de calor se produce cuando la corriente y el flujo de calor circulan en la misma dirección.

Figura 4. Efecto Thomson



Fuente: Mediciones de Temperatura, Termocuplas. Universidad de Buenos Aires. Portal <http://laboratorios.fi.uba.ar/lscm/termocuplas01.pdf> Visitado en Agosto 10 de 2008

## 2.2.5 Indicadores locales de Temperatura (termómetros)

Los termómetros son los elementos de mayor difusión industrial para la medición de la temperatura, en especial los termómetros *bimetálicos*. Este elemento, basa su funcionamiento en la diferencia de coeficiente de dilatación existente entre dos metales diferentes y unidos; la unión mecánica de una aguja al bimetálico, hace que por efecto del cambio de temperatura se desplace. La precisión de este instrumento suele ser del 1%, y los rangos de temperatura en que opera se encuentran entre  $-200$  y  $500$  °C.

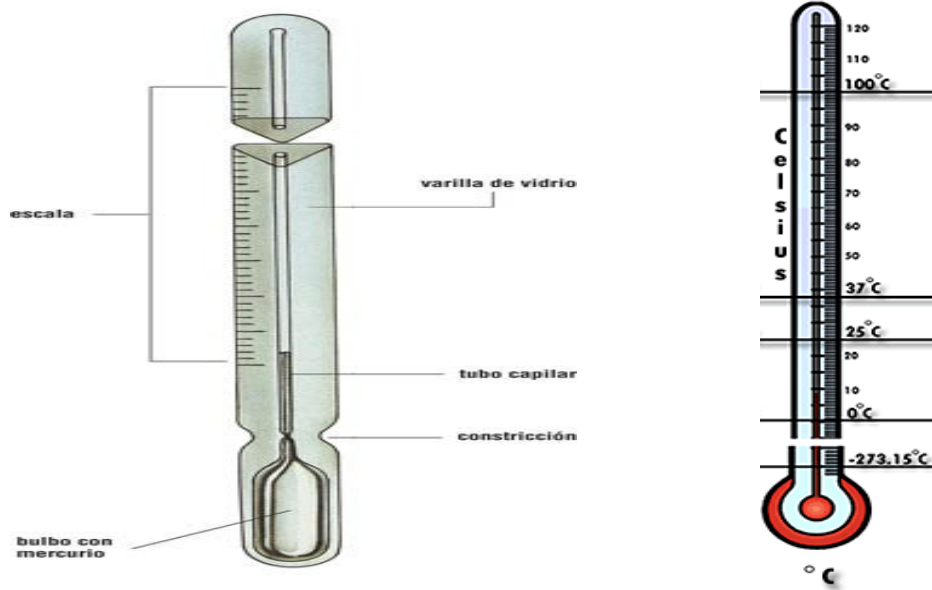
<sup>6</sup> Basado en el texto encontrado en: Medición de temperatura: sensores termoeléctricos, Edwin Jhovany Álzate Rodríguez. José William Montes Ocampo. Mayo de 2007

### 2.2.5.1 Termómetros de líquido<sup>7</sup>

Este tipo de termómetro es el más conocido por el común, y se utilizan líquidos como el alcohol y el mercurio (único metal en estado líquido), son empleados para tomar la temperatura de personas.

El termómetro de mercurio tiene un rango de funcionalidad desde los  $-39^{\circ}\text{C}$  (punto de congelación) hasta los  $357^{\circ}\text{C}$ , la medición se realiza de forma directa, su campo de aplicación se limita porque no presentan gran precisión para finalidades científicas e industriales.

Figura 5. Termómetro de Mercurio y alcohol



Fuente: <http://images.google.com.co/imgres?imgurl=http://www.todomonografias.com/images> y <http://www.visionlearning.com/library/modules/mid48/Image/VLObject-318-021121021101.gif>. Junio 2008.

### 2.2.5.2 Termómetros bimetalícos

Son utilizados para la medición directa de la temperatura, el elemento de medida de este termómetro es una hélice bimetalíca de respuesta rápida, la hélice está fabricada a partir de dos láminas soldadas en frío, cada lamina tiene diferentes coeficientes térmicos de expansión, las laminas en función de la

<sup>7</sup> Basado en el texto encontrado en: R. Pallás. Sensores y acondicionamientos de señal. Editorial MArcombo junio 2008.

temperatura se tuercen, este movimiento es trasferido a la aguja indicadora. En la Figura 7 se observa un termómetro bimetalíco.

Figura 6. Termómetro bimetalíco



Fuente: <http://www.google.com.co/search?hl=es&q=termometro+bimetalico+0+a+120&meta>. Junio 2008.

### 2.3 Elementos primarios de temperatura.

Este tipo de elementos son transductores que convierten la energía térmica en otra o en un movimiento, para la trasmisión de la medición de la temperatura se requiere de los siguientes elementos:

- Termopozo
- Elemento primario
- En algunos casos, un convertidor de temperatura.

Las termoresistencias y los termopares son dos tipos de elementos primarios, sin importar el elemento, al adicionar un convertidor, este tendrá la función de estandarizar las señales, ya sea 4 – 20mA, etc.

#### 2.3.1 Termopozos<sup>8</sup>

Son accesorios que cumplen con la función de proteger el elemento primario de temperatura, bien sea termopar, RTD o termistor, del daño mecánico o químico que pueda ocasionar el proceso, pero incrementan la dinámica del sensor al introducir una resistencia térmica adicional.

---

<sup>8</sup> Especialización en automática. Curso de sensores, Castrillon Hernández Fabio, Vásquez C. Juan Miguel, Vásquez M. Rafael Esteban. Diapositiva 1 y 2. 10 de junio de 2008.

Se fabrican a partir de materiales resistentes a la temperatura y la corrosión, con alta conductividad térmica para disminuir la resistencia térmica y que soporten la temperatura máxima del proceso.

Figura 7. Termopozos



Fuente: Especialización en automática. Curso de sensores

### 2.3.2 Termopares<sup>9</sup>

Los termopares se utilizan extensamente, ya que ofrecen una gama de temperaturas mucho más amplia y una construcción más robusta que otros tipos. Además, no precisan alimentación de ningún tipo y su reducido precio los convierte en una opción muy atractiva para grandes sistemas de adquisición de datos. Sin embargo, para superar algunos de los inconvenientes inherentes a los termopares y obtener resultados de calidad, es importante entender la naturaleza de estos dispositivos.

Los termopares son transductores que suministran un voltaje, entre 0 y 100 milivoltios aproximadamente, proporcional a la temperatura medida, de acuerdo a su principio de funcionamiento basado en el efecto Seebeck<sup>10</sup>.

Los termopares constituyen uno de los transductores más utilizados para la medición de temperaturas en la industria.

---

<sup>9</sup> Tomado del texto encontrado en: Mantilla Saavedra Juan Carlos. Instrumentación, Automatización y Control Industrial. Diapositiva 29.

<sup>10</sup> Para mayor información consultar el portal: [http://www.madrimasd.org/experimentawiki/feria/EI\\_efecto\\_Seebeck](http://www.madrimasd.org/experimentawiki/feria/EI_efecto_Seebeck) Visitado en Agosto 15 de 2008. Leer en el tema 3.1.1, pagina 5 de este documento

Tabla 2. Diferentes tipos de termopares.

<b>ANSI C96.1</b>			
<b>TERMOPAR</b>			
<b>TIPO</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>RANGO (°C)</b>
E	Cromel Cr	Constantan Co	0 a 900
J	Hierro Fe	Constantan Co	0 a 760
K	Cromel Cr	Alumel Al	-200 a 1260
R/S	Platino Rodio	Platino Pt	0 a 1600
T	Cobre Cu	Constantan Co	-40 a 350

Fuente: Mantilla Saavedra Juan Carlos. Instrumentación, Automatización y Control Industrial

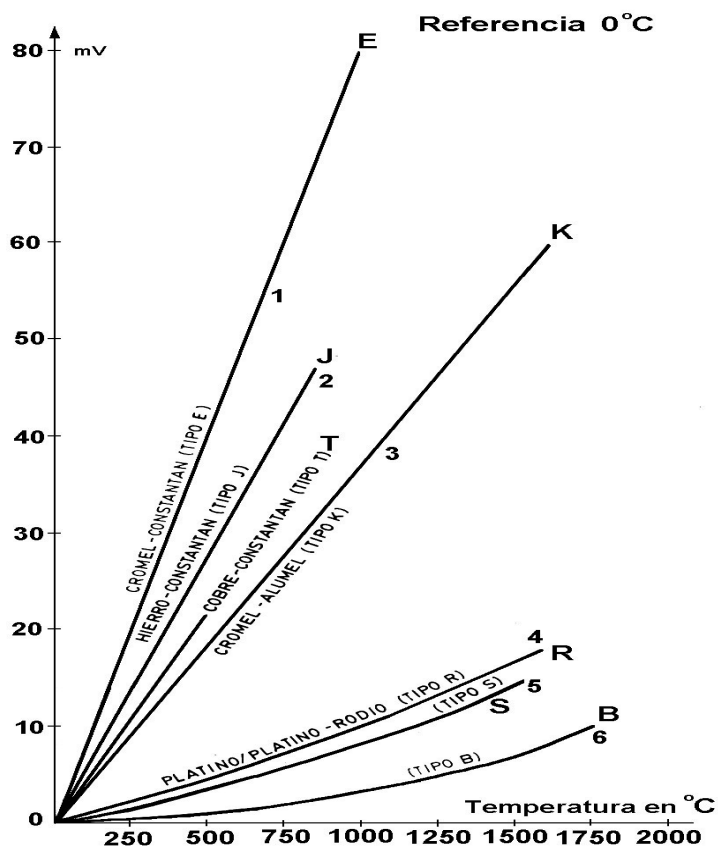
En la figura 9 se observa el comportamiento en mV que tiene los diferentes termopares en relación a la temperatura aplicada, de dicha grafica se observa que el termopar mas lineal e ideal es el tipo R (platino- Rodio). En la tabla 2 se observa el comportamiento de los termopares en relación a la corrosión.

Tabla 3. Características de resistencia a condiciones externas de los termopares

<b>Tipo de termopar</b>	<b>Resistencias a Atmosferas oxidantes</b>	<b>Resistencias a Atmosferas reductoras</b>	<b>Resistencia al azufre</b>	<b>Tipo de Protección</b>
B, R, S	Buena	Pobre		Tubo de cerámica
J	Buena, muy Buena	Pobre	Le afecta el azufre	
K	buena < 400° pobre > 700°	buena < 400°		Usarlo en atmosfera seca
T	Buena	Buena		
E	Buena	Pobre	mala	

Fuente: Anexo A.

Figura 8. Relación mV vs temperatura de los diferentes termopares



Fuente: Nota técnica 2, rev. b, <http://www.arian.cl>

En la tabla 3 se observa los límites de error de acuerdo a la norma ISA 96.1<sup>11</sup>

Tabla 4. Errores límites de los termopares de acuerdo a la norma ISA 96.1

Tipo de termopar	Estándar: El mayor error entre	Especial: el mayor error entre
T (0C a 350C)	+1C o +- 0,75% de la medida	+0,5C o +- 0,4% de la medida
K (0C a 1250)	+2.2C o +- 0,75% de la medida	+1.1C o +- 0,4% de la medida
S (0C a 1450C)	+1.5C o +- 0,25% de la medida	+0,6C o +- 0,1% de la medida

Fuente: Tomado de Instrumentación y Control de procesos. Juan Carlos Maraña, pág. 40

<sup>11</sup> Para mayor información consultar: [http://www.isa.cie.uva.es/ficheros/Instrumentacion\\_Control\\_Procesos.pdf](http://www.isa.cie.uva.es/ficheros/Instrumentacion_Control_Procesos.pdf) Visitado en Agosto 15 de 2008



De las tablas anteriores, medir 500° C con un termopar tipo K, éste puede introducir un error de +/- 3,75 °C si es de tipo estándar.

Los termopares suelen estar encapsulados en un tubo de material apropiado al entorno donde se va a efectuar la medida, normalmente de acero inoxidable.

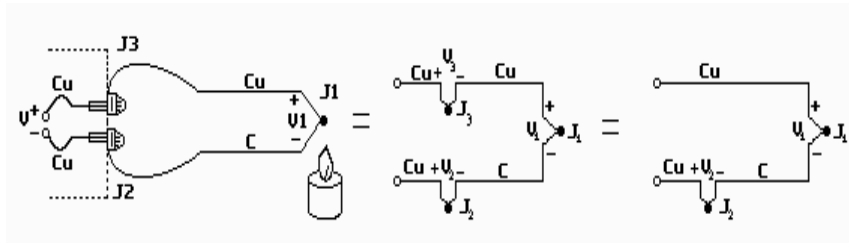
Al utilizar los termopares y al querer transmitir su señal a un convertidor de temperatura, se necesita un cable de extensión de termopares. Al cablear un termopar con un cable estándar de cobre o aluminio se esta “rompiendo” la continuidad del termopar. Se debe utilizar un cable de extensión del mismo tipo que el termopar, por ejemplo para un termopar del tipo “K”, el cable de instalación debe ser de “Cromo-Aluminio”. Llegado el caso de utilizar un convertidor, se debe utilizar el mismo concepto desde el elemento primario hasta el convertidor.

### 2.3.2.1 Medidas con termopares<sup>12</sup>

No se puede medir directamente la tensión de salida (mediante un voltímetro) de un termopar par porque los cables de conexión crean una nueva unión termoeléctrica. Lo que sucede al conectar un voltímetro a un termopar tipo **T** (Cobre-Constantan) es lo siguiente:

- El voltímetro leerá la tensión **V1** correspondiente al punto de medida de la unión **J1**, pero el hecho de conectar el voltímetro al termopar se han creado dos nuevas uniones: **J2** y **J3**.
- Como la unión **J3** es de dos metales iguales (Cobre-Cobre) no se crea tensión termoeléctrica según la ley de los metales homogéneos. Pero queda la unión **J2** formada por metales diferentes (Cobre-Constantan), que genera una tensión no deseada en oposición a **V1**. Figura 10.

Figura 9. Comportamiento de físico de la medición directa de la FEM de un termopar

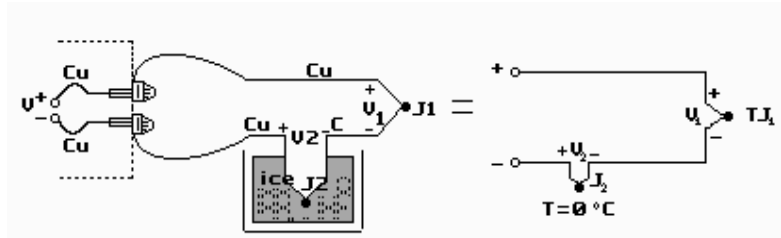


Fuente: <http://www.salle.url.edu/~se04635/20C%20Termopares.pdf>. Pág. 6. Junio de 2008

<sup>12</sup>Tomado del texto encontrado en: Adquisición y control automático de temperatura. Pag 6

- El voltaje medido por el voltímetro será proporcional a la diferencia de temperaturas de las uniones J1 y J2. Por tanto, no se puede conocer la tensión de la unión J1 si primero no conocemos la temperatura de la unión J2.
- Una manera de conocer la temperatura de la unión J2 es poniendo esta unión en un baño de hielo, forzando su temperatura a 0 °C y estableciendo J2 como unión de referencia.

Figura 10. Forma de medir directa la FEM con voltímetro



Fuente: <http://www.salle.url.edu/~se04635/20C%20Termopares.pdf>. Pág. 7. Junio de 2008

- En las dos uniones del voltímetro (Cobre-Cobre) no se crea tensión termoeléctrica, y la lectura  $V$  del voltímetro es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las uniones J1 y J2. La lectura del voltímetro esta dada por:

$$V = (V_1 - V_2) = a(T_{j1} - T_{j2})$$

Si se especifica  $T_{jn}$  en grados Celsius:

$$T_{j1} (^{\circ}\text{C} + 273.15) = T_{j1} (\text{K})$$

Se sustituye de la expresión anterior:

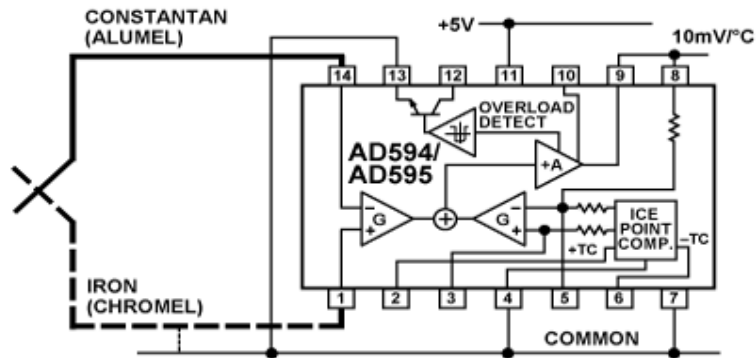
$$V = a [(T_{j1} + 273.15) - (T_{j2} + 273.15)] = a (T_{j1} - T_{j2}) = a (T_{j1} - 0) = a T_{j1}$$

- La tensión  $V_2$  igual a cero, ya que en realidad es la tensión de la unión a 0° C.
- Este método es muy exacto, ya que la temperatura del punto de hielo, a diferencia de otras temperaturas, se puede calcular con gran exactitud. El punto de hielo, como unión de referencia es el empleado por la National Bureau of Standards (NBS) para confeccionar las tablas de tensión-temperatura de los termopares, de manera que se puede convertir la tensión  $V$  en temperatura buscando los pares de valores correspondientes en estas tablas.

### 2.3.2.2 Amplificador para termopares compensado.

En el mercado existen CI que tienen amplificadores de instrumentación así como un circuito de compensación de la unión fría, uno de ellos es el *AD594*<sup>13</sup>, de Analog Device. En la figura 12 se observa el diagrama de pines de este CI.

Figura 11. Diagrama de pines de AD594



Fuente: Anexo B.

Como las características más representativas se encuentra:

- El circuito está calibrado a una temperatura de 25 °C para un termopar tipo J.
- A la temperatura de 25 °C la sensibilidad del termopar es 51,08  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .
- A la temperatura de 25 °C la ganancia del amplificador de instrumentación es 193,34.
- A la temperatura de 25 °C la tensión que el circuito entrega a su salida es de 250 mV dando 10mV/°C
- El circuito integrado introduce un *offset* en la salida del amplificador de 16  $\mu\text{V}$ , por tanto, la tensión exacta de salida para 25 °C es:

$$AD594output = (V_{termopar} + 16 \mu V) \cdot 193,34$$

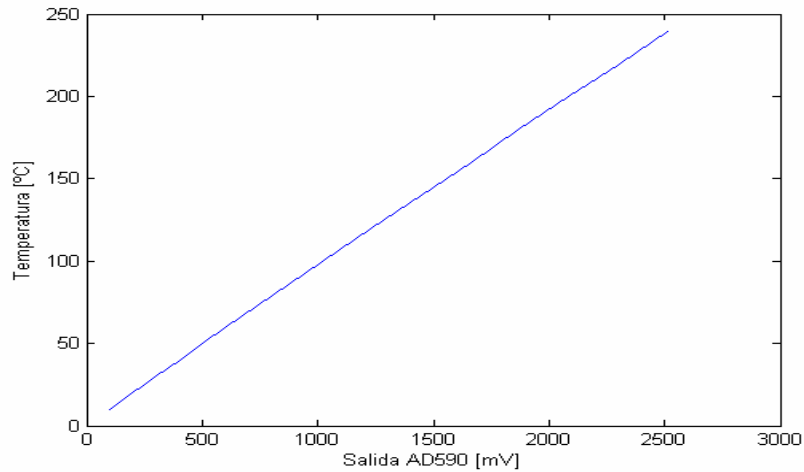
La tensión del termopar tipo J será por tanto:

$$V_{termopar} = (AD594output / 193,34) - 16 \mu V$$

<sup>13</sup> Para mayor información consultar: <http://www.analog.com/en/temperature-sensing-and-thermal-management/digital-temperature-sensors/ad594/products/product.html> Visitado en agosto 13 de 2008

Al implementar el CI en una termocuplas tipo J, y realizar las respectivas conexiones, se logró obtener un sistema lineal, encontrado así soluciones viables y sencillas para la implementación de los termopares en los procesos en que son requeridos.

Figura 12. Comportamiento de la FEM utilizando el CI AD594

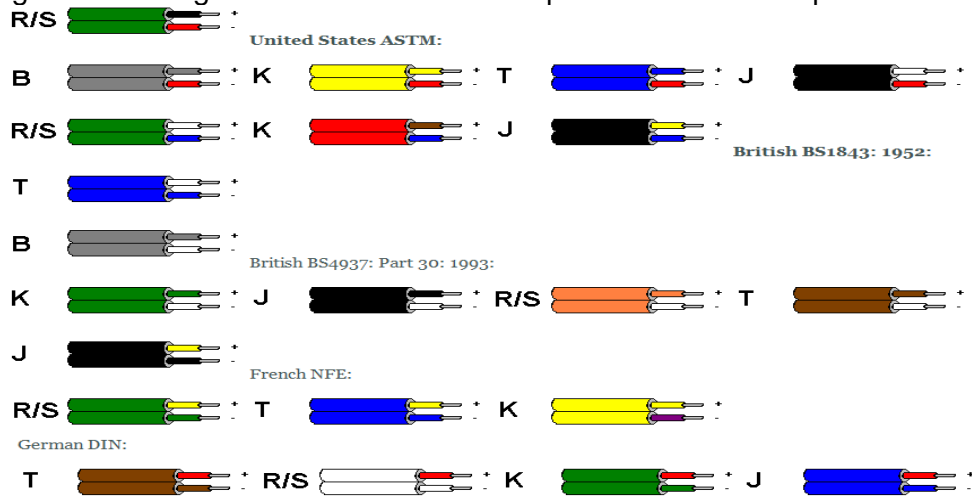


Fuente: <http://www.salle.url.edu/~se04635/20C%20Termopares.pdf>. Pág. 14. Junio de 2008

### 2.3.2.3 Código de colores de los termopares

Existen normas referentes al código de colores de las termocuplas, estas pueden observarse en la figura 13.

Figura 13. Código de colores de los termopares en diferentes países



Fuente: Mantilla Saavedra Juan Carlos. Instrumentación, Automatización y Control Industrial

### 2.3.3 Termoresistencia<sup>14</sup>

Las termoresistencia basa su funcionamiento en la variación de la resistencia a determinada temperatura, este tipo de medida es indirecta, ya que no se mide directamente la temperatura, se halla una relación de temperatura vs resistencia de salida, para ello se requiere un circuito de medida para inferir la temperatura partiendo de la resistencia. El circuito de mayor difusión y uso es el puente de *Wheatstone*. Es de vital importancia compensar la resistencia de los cables que forman la línea desde la termoresistencia al sistema de medida.

El platino y el níquel son los elementos de mayor uso en las sondas de resistencia, el platino es el elemento más adecuado desde el punto de vista de precisión y estabilidad, pero a su vez es el más costoso. La sonda de mayor uso es la Pt-100 (resistencia de 100 ohmios a 0 °C).

El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, pero posee como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura.

El cobre es barato y estable pero tiene el inconveniente de su baja resistividad. En la tabla 4 se observa las características de las termoresistencia dependiendo de su material de fabricación.

Tabla 5. Principales características de las termoresistencias

Material del element	Resistencia a 0°C (Ohms)	Coefficiente temperatura	Rango de uso (°C)	Especificación según Norma
Platino Pt-100	100	0.00385	-200 a 750	DIN
Platino Pt-100	100	0.003916	-100 a 550	SAMA
Platino Pt-1000	1000	0.00385	-100 a 200	DIN
Cobre Cu-10	10 (25°)	0.00427	-100 a 200	DIN
Níquel Ni-100	100	0.00672	-100 a 200	DIN

Fuente: Anexo C.

<sup>14</sup> Basado en el texto encontrado en: <http://www.monografias.com/trabajos3/transductores/transductores.shtml?relacionados>. 29 de mayo de 2008

Las termoresistencias de uso común son fabricadas con alambres finos soportados por un material aislante y luego encapsulados. El elemento encapsulado se inserta luego dentro de una vaina o tubo metálico cerrado en un extremo que se llena con un polvo aislante y se sella con cemento para impedir que absorba humedad.

La relación fundamental para el funcionamiento será así:

$$R_t = R_0 (1 + \beta t)$$

En la que:

$R_0$  = Resistencia en ohmios a 0°C.

$R_t$  = Resistencia en ohmios t °C.

$\beta$  = Coeficiente de temperatura de la resistencia.

Los materiales utilizados para los arrollamientos de termorresistencias son fundamentalmente platino, níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno.

Por lo general, las termorresistencias no se utilizan por encima de los 500 ° C debido a las desviaciones producidas.

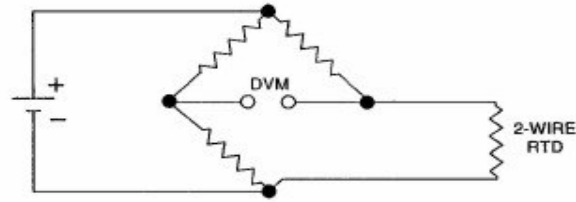
En el año 1871, William Siemens utilizó por primera vez una termorresistencia, y desde entonces han sufrido diversas modificaciones, se han creado estándares en distintos países: RC21-4-1966 de SAMA (Scientific Apparatus Makers Association) en los EE.UU; DIN 43760 - 1968 (Deutsches Institut für Normung e. V.) en Alemania, etc.

El alambre de platino es el material elegido con más frecuencia para las termorresistencias de uso industrial. Las termoresistencia son precisas y producen medidas altamente reproducibles. Su construcción permite disponer de ellos como elementos simples, dobles y, en casos muy especiales, hasta triples.

### **2.3.3.1 Termoresistencia a dos hilos**

En este tipo de configuración de dos hilos o bifilar, es necesario estimar la longitud del conductor del puente a la resistencia en el punto de toma del proceso, para poder calcular el valor de la resistencia. En la figura 15 se observa el esquema.

Figura 14. Configuración de termoresistencia a dos hilos



Fuente: [http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termorresistencias.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termorresistencias.htm)

Este sistema tiene la ecuación de equilibrio dada por la ecuación:

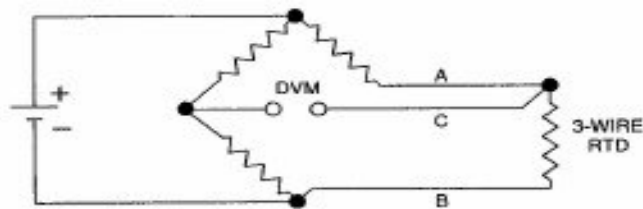
$$R1 / (R3 + K * a) = R2 / (x + K * b)$$

Al reemplaza uno de los elementos del puente, se produce un desbalance así como también cambios de resistencia. La salida se lee directamente o es usada para manejar otro circuito en el transmisor. Si la RTD se encuentra localizada a una distancia desde el transmisor y puente entonces esta conduce por los dos hilos cuando un material más económico es usado para conectar la RTD al puente. Una de las limitaciones de la RTD de dos hilos es que los hilos conductores añadidos a la resistencia del circuito pueden causar errores de lectura.

### 2.3.3.2 Termoresistencia a tres hilos

Para ayudar a eliminar el error introducido por los hilos conectores se usa comúnmente una RTD de tres hilos con este propósito los efectos de la resistencia de cada uno de los hilos conductores ( A y B ) son eliminados por el puente debido a que cada uno es la conexión opuesta del puente. El tercer hilo (C) es un conductor de equilibrio. Figura 16.

Figura 15. Configuración de termoresistencia a tres hilos

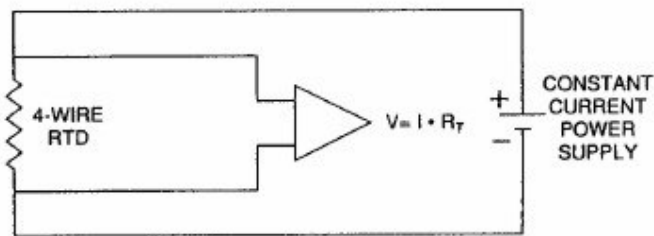


[http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termorresistencias.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termorresistencias.htm)

### 2.3.3.3 Termoresistencia a cuatro hilos

Al utilizar la conexión a cuatro hilos, se eliminan los efectos de los hilos conductores. Esta configuración no requiere puente de *Weasthone*, en esta configuración una corriente constante es conectada a dos de los hilos de la RTD, la caída de voltaje en la RTD es medida en los otros dos conductores, la caída de voltaje es independiente de los efectos de los hilos conductores.

Figura 16. Conexión a 4 hilos



[http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termorresistencias.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termorresistencias.htm)

### 2.3.4 Circuito integrado Lm-35

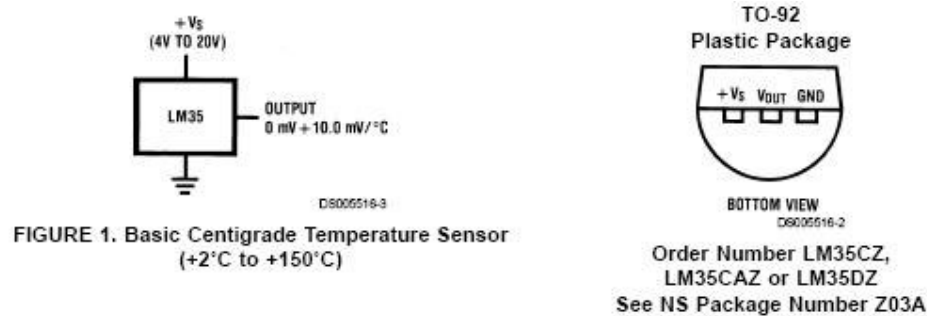
Los sensores de circuitos integrados resuelven el problema de la linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento. Son, además, relativamente económicos y bastante precisos a temperatura ambiente.

Sin embargo, los sensores de IC no tienen tantas opciones de configuraciones del producto o de gama de temperaturas, y además son dispositivos activos, por lo que requieren una fuente de alimentación.

Los sensores de IC forman parte de la tendencia hacia los "sensores inteligentes", que son unos transductores cuya inteligencia incorporada facilita las actividades de reducción y análisis de datos que el usuario debe realizar normalmente en el sistema de adquisición de datos.



Figura 17. Diagrama de pines Lm-35



Fuente: Anexo D.

El sensor de temperatura utilizado, es el circuito integrado LM35D de National Semiconductors.

Características principales.

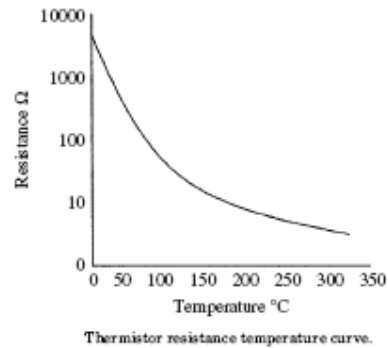
El circuito integrado LM35 es un sensor de temperatura cuya tensión de salida es linealmente proporcional con la temperatura en la escala Celsius (centígrado). Posee una precisión aceptable para la aplicación requerida, no necesita calibración externa, posee sólo tres terminales, permite el sensado remoto y es de bajo costo.

- Factor de escala : 10mV/°C ( garantizado entre 9,8 y 10,2mV/°C)
- Rango de utilización : -55°C < T < 150°C
- Precisión de : ~1,5°C (peor caso)
- No linealidad : ~0,5°C (peor caso)

### 2.3.5 Termistor

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado y que presentan una curva característica lineal tensión-corriente siempre que la temperatura se mantenga constante.

Figura 18. Termistor<sup>15</sup>



Fuente: anexo E.

La relación entre la resistencia y la temperatura viene dada por la expresión.

$$R_t = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

**R<sub>t</sub>**= Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T<sub>t</sub>.

**R<sub>0</sub>**= Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T<sub>0</sub>.

**β** = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

Hay que señalar que para obtener una buena estabilidad en los termistores es necesario envejecerlos adecuadamente.

Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que las sondas de resistencia y permiten incluso intervalos de medida de 1 °C (span). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de fracciones de segundo a minutos.

<sup>15</sup> <http://www.monografias.com/trabajos3/transductores/transductores.shtml?relacionados>. 29 de mayo de 2008

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Selección de elementos

Durante el desarrollo de este capítulo se realizará un análisis de las recomendaciones necesarias para la selección del algún tipo de sensor de temperatura.

##### 3.1.1 Selección entre termopares, termoresistencias, termistor o sensor IC

Durante la elaboración de cualquier proyecto donde se requiera de la medición de la temperatura, nace la pregunta, ¿Qué sensor se utiliza?

La respuesta a esta pregunta, es la base para la realización del banco de pruebas para la caracterización de los diferentes tipos de sensores de temperatura.

Hay conceptos a tener en cuenta como son las especificaciones del proyecto y necesidades del cliente, así como los criterios mínimos de diseño.

Medir la temperatura con un termopar, requiere medir además la temperatura de la junta fría, siendo ésta una fuente de posibles errores, además, se suele instalar el cable de extensión de termopares lo que suele dar un error adicional. Estos errores secundarios suelen ser más importantes que los del propio sensor.

La exactitud de una termoresistencia es mejor que la de un termopar, ya que no requiere de una compensación de una junta fría y no requiere de cables de extensión. Los termopares son propensos a tener, desviación permanente de una señal que se produce de forma muy lenta a lo largo de un cierto periodo de tiempo, producidos por la propia naturaleza de construcción.

La velocidad de respuesta es similar en ambos casos, siendo el costo del termopar más barato como equipo, aunque más caro como instalación cuando se requiere cable de compensación.

Los termistores poseen un tiempo de respuesta que depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor, sensibilidad mayor a la de una RTD o termopar. Otro inconveniente del termistor es su falta de linealidad, que exige un algoritmo de linealización para obtener unos resultados aprovechables.

Los sensores de IC resuelven el problema de la linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento, son económicos y bastante precisos. Su principal problema es que necesitan un sistema e alimentación.

### **3.1.2 Calibración de instrumentos de temperatura**

Los instrumentos de medición de temperatura requieren de una calibración para determinar que tan cierta son las lecturas realizadas por ellos, y llegado el caso que la calibración no sea efectiva, cambiar el instrumento, ya que este no tendría un funcionamiento óptimo y estaría afectado, poniendo en riesgo la integridad y efectividad del sistema.

### **3.1.3 Calibrador de bloque metálico**

Conformado por un bloque metálico calentado por resistencias con un controlador de temperatura de precisión ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) adecuado para aplicaciones de alta temperatura (-25 a  $1200^{\circ}\text{C}$ ). El control de temperatura se realiza con aire comprimido, permitiendo así, reducir la temperatura desde  $1200^{\circ}\text{C}$  a la ambiente en un lapso de tiempo de 10-15 minutos. Dentro del calibrador hay orificios de inserción para introducir un termopar patrón y la sonda de temperatura a comprobar.

### **3.1.4 Calibrador de baño de arena**

Tiene un depósito de arena muy fina que contiene tubos de inserción para la sonda de resistencia o el termopar patrón y para las sondas de temperatura a comprobar. La arena caliente es mantenida en suspensión por medio de una corriente de aire, asegurando así la distribución uniforme de temperaturas a lo largo de los tubos de inserción.

### **3.1.5 Calibrador de baño de líquido**

Consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido, con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un juego de resistencias calefactoras y sobre un refrigerador mecánico dotado de una bobina de refrigeración (este puede estar presente en algunos modelos y en otros no)

El agitador mueve totalmente el líquido, disminuye los gradientes de temperatura en el seno del líquido y facilita una transferencia rápida de calor; el termómetro patrón es de tipo laboratorio, con una gran precisión.

### **3.1.6 Hornos de temperatura**

Son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios (termopares, etc.) del instrumento a comprobar.

A pesar de que este sistema está conformado por indicador-controlador, un termopar de precisión y de un juego de resistencias de calentamiento, una calibración muy precisa dependerá del horno interno de crisole con sales específicas que funden a temperaturas determinadas.

## 3.2 DISEÑO DEL MODULO DE PRUEBAS

Durante el desarrollo de este capítulo, se describirá cada una de las fases elaboradas durante diseño y ejecución del **BANCO DE PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA**, se describen los elementos que constituyen el módulo, se presenta un diagrama esquemático, así como un registro fotográfico del módulo identificando en cada fotografía las piezas que compone el módulo. Con este proceso el lector estará en capacidad de idealizar el desarrollo metodológico ejecutado y el porqué de las actividades realizadas.

### 3.2.1 Descripción general del módulo

El módulo es un sistema integrado conformado por un tanque con una resistencia de calentamiento de 1000W que opera a 120V AC; la operación conjunta del termostato y la resistencia permite obtener un rango de temperatura que oscila entre 0 y 100°C. En las paredes del tanque se encuentran 4 termopozos, en los cuales se acoplará una Pt-100 de tres hilos, una termocupla tipo K, un termistor Ptc y un circuito integrado Lm-35 adecuado de manera que se puedan acoplar los sensores y estos no sufran daños con el tiempo.

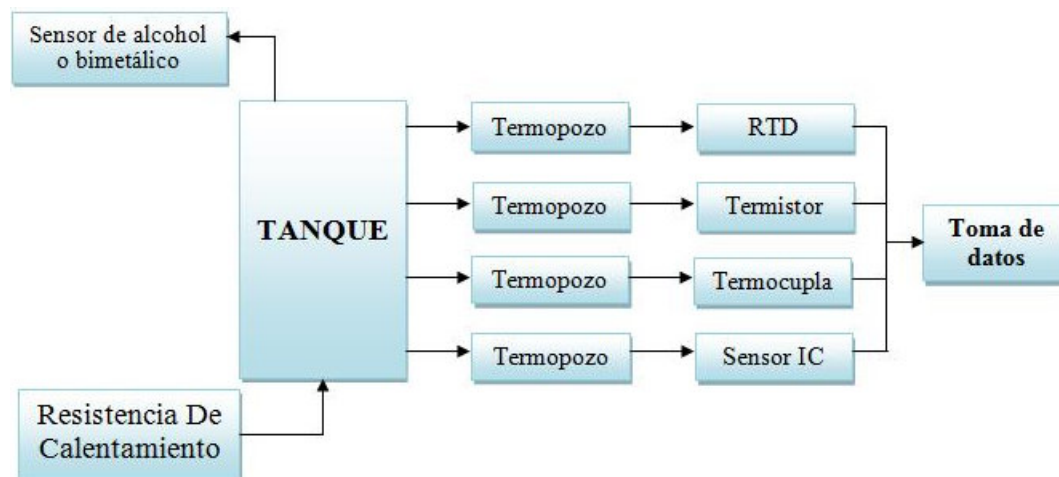
Se tiene un sensor bimetálico o uno de alcohol, el cual servirá como indicador de la temperatura de referencia, de manera que se pueda realizar una comparación con las medidas tomada de los sensores en las paredes del tanque.

El modulo consta de:

- 1 Tanque elaborado en acero inoxidable
- 1 Resistencia de calentamiento
- 1 Termostato
- 4 Termopozos
- 1 Termómetro bimetálico
- 1 Termómetro de alcohol
- 1 Pt-100 de tres hilos
- 1 Termocupla tipo K
- 1 Termistor NTC
- 1 Lm-35

La estructura funcional del módulo se observa en la figura 19

Figura 19. Estructura funcional del módulo



Para evitar que por las leyes de la transferencia de la termodinámica, la temperatura que se encuentre dentro del tanque sea transferida a la parte externa del módulo, entre laminas se utilizo un material aislante de temperatura. Este material es fibra de vidrio. (Figura 17).

### 3.2.2 Tanque de Calentamiento

Al pensar en el diseño del tanque se debía asegurar de usar un material resistente a altas temperaturas y a cambios bruscos de la misma, además de facilitar su manipulación y que antetodo ofrezca seguridad a las personas que lo manipulen. El tanque posee las siguientes características:

- Hecho en Acero inoxidable (Lamina # 14)
- Posee fibra de Vidrio
- Sus Medidas son 25cm de frente, por 18cm de largo y 18cm de altura.

Se escogió el acero inoxidable, ya que es un material muy seguro y que cumple con los requisitos necesarios como soportar altas temperaturas y de fácil manipulación en manos expertas. La lamina # 14 es la adecuada por su grosor para evitar la transmisión de calor al exterior.

La fibra de vidrio entre las paredes del tanque y el modulo evita que el calor del tanque se transfiera a la parte exterior del modulo, la cual es la manipulada por quien esté utilizando el módulo.

El tamaño del módulo está hecho teniendo en cuenta varios aspectos como son:

- La resistencia de calentamiento. Esto debido a que si el módulo es muy grande, se necesita una resistencia de mayor potencia. Además se piensa en utilizarlo en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana, por lo que tal vez en un futuro puedan adquirir más equipos de este tipo y la cantidad de potencia que sumarian seria demasiada, para lo que pueden suministrar estos laboratorios. Por este motivo se eligió un tamaño ideal en relación con el volumen de agua que se calentará. Una resistencia de 1000W, es ideal para estas condiciones.
- El espacio para ubicar los termopozos, el termostato y la resistencia de calentamiento. Además un tamaño en el que se pueda observar el proceso de la mejor manera.

Para la elaboración física del modulo se desarrollo una representación en **SOLID EDGE**, en conjunto con el sistema de acotado. A continuación se observa las gráficas elaboradas durante la etapa de diseño.

En la figura 20 se observa la vista superior, del modelo a escala.

Figura 20. Vista superior del modulo



### 3.3.3 Resistencia de calentamiento

La resistencia de calentamiento escogida para el módulo está diseñada teniendo en cuenta las medidas del tanque y la cantidad de agua a calentar. Aproximadamente para calentar hasta 100°C un litro de agua se necesitan 120W de potencia. El volumen de líquido aproximado que almacena el tanque es de 8.1 litros. Por esta razón la resistencia de calentamiento tiene las siguientes características:

- 16 cm de largo y doble vuelta
- 1000W de potencia y a 110V
- Aislamiento

Se diseñó de 16 cm, ya que la medida del tanque donde se colocó es de 18cm. Se alimenta de 110V para facilidad a la hora de obtener tomas de 110V en cualquier lugar y principalmente en los laboratorios de la universidad Pontificia Bolivariana.

Figura 21. Resistencia de calentamiento





#### 3.4.4 Termóstato

El termóstato brinda una variación en la cantidad de corriente que se suministra a la resistencia y de esta forma obtener las variaciones de temperatura ajustando la perilla del mismo. Las características técnicas del termóstato que se utilizó son las siguientes:

- Soporta hasta 16 Amp y 110V
- Rango de temperatura de 0° hasta 150°C

Como la potencia de la resistencia escogida es de 1000W y 110V de alimentación, entonces la corriente máxima que circula es de 9.09Amp, por tanto este termostato es ideal y soporta casi el doble de esta corriente.

En el rango de temperatura se encuentra se necesita que es de 0° hasta 100°C, que es el punto de ebullición del agua. De esta forma se garantiza que el termostato cumple con lo que se necesita para manejar la resistencia de calentamiento.

Figura 22. Termostato



Fuente: <http://www.iqsa.com/ctermostatos.htm>. Junio de 2008

### 3.5.5 Termopozos

Como es sabido los termopozos son supremamente conductores térmicos, además protegen el elemento primario del contacto directo con la variable a medir y de los daños que esta le pueda ocasionar. Las siguientes son las características técnicas:

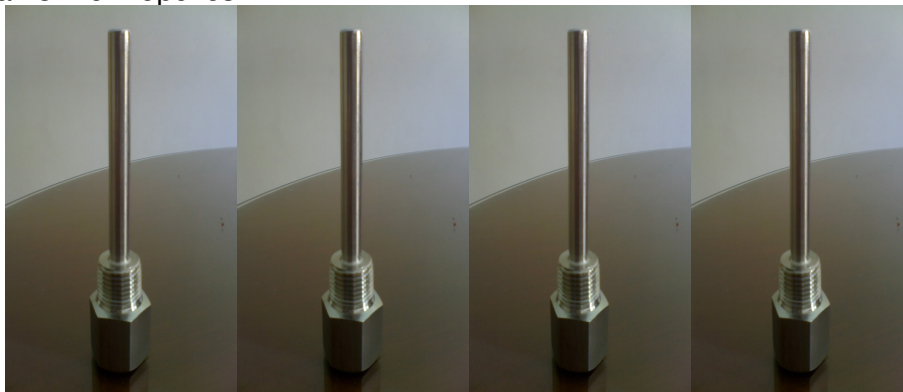
- Termopozo de 3/8" de Diámetro, 8cm de Largo, Conexión Interna y Externa Rosca de 1/2" NPT.

Estas medidas se toman dependiendo de las necesidades del fabricante para este caso lo más importante es que puedan alojar la Pt-100 y la termocupla tipo K.

Es necesario que el diámetro interno sea lo suficientemente grande como para que se pueda alojar un Lm-35 con un acople previamente realizado. Por esta razón se eligió de 3/8". Los 8cm de largo se escogieron porque el tanque es de 18 cm, de esta manera quedaran casi en el centro del tanque.

La rosca externa se seleccionó de 1/2" pulgada, ya que es una de las medidas más comunes y se adapta a las medidas del frente del tanque que son 25cm. También se ubicaron de tal manera que si en un futuro se desea colocar otro termopozo el espacio en el módulo este disponible.

Figura 23. Termopozos



### 3.6.6 Termómetro bimetálico

Esta clase de termómetros son los de mayor uso industrial, en este módulo su función será la de una medida de referencia con la cual se compararon los datos obtenidos por los otros cuatro sensores antes mencionados. Las especificaciones técnicas de este termómetro son las siguientes:

- Rango -10 hasta +110°C, medidas de 1°C
- Diámetro del dial 2", largo del tallo 200mm
- Totalmente en acero inoxidable

Debido a que el rango de mediciones del modulo es de 0° hasta 100°C, este termómetro posee un rango que sirve, además tiene una gran sensibilidad tanto de subida como de bajada. La visibilidad también es algo clave en este termómetro, ya que la medida se puede observar fácilmente y a distancia evitando accidentes con el agua caliente.

Figura 24. Termómetro bimetálico



### 3.7.7 RTD o Pt-100

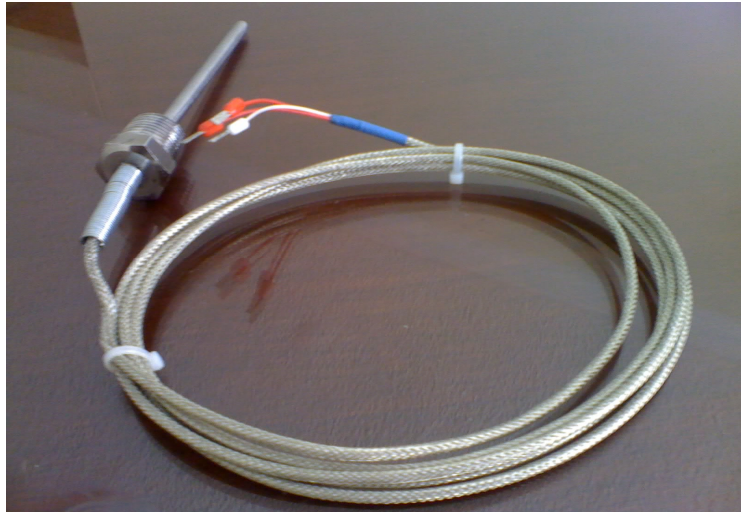
La Pt-100 escogida para nuestro banco de pruebas es de tres hilos. Consiste en un alambre de platino que a 0°C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Las características técnicas de esta son las siguientes:

- PT 100 de 3 Hilos, Bulbo de 1/4", Longitud de 8cm, Sin Cabezal, con Conexión al Proceso de 1/2" NPT, 2m de Cable.
- Rango de medición de -100° hasta 200°C

Se escogió con estas características, ya que es la que se adapta a las dimensiones del termopozo antes mencionado. Además es de las más usadas, también cumple con el rango de medición que se necesita.

Se eligió de tres hilos, ya que el modo de conexión es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

Figura 25. Pt-100



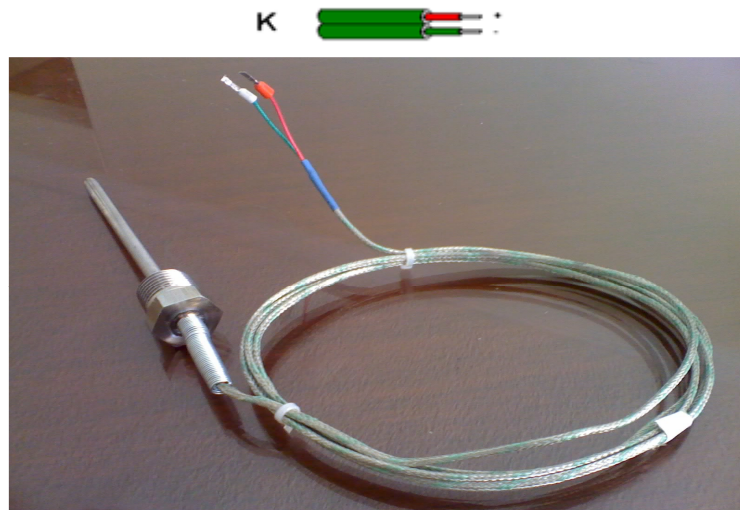
### 3.8.8 Termocupla tipo K

La termocupla elegida es del tipo K, ya que es muy común y usada, además que sus rangos de medida son altos. La termocupla tipo K es simplemente dos alambres de distinto material unidos. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, del orden de los milivoltios. Las especificaciones técnicas de la termocupla tipo K escogida son:

- Termocupla Tipo K, Bulbo de 1/4", Longitud de 8cm, Sin Cabezal, con Conexión al Proceso de 1/2" NPT, 2m de Cable.
- Rango de medición de -180° hasta 1370 °C

Esta termocupla se puede ver en la norma German DIN. Se adapta a nuestro rango de medición y se ajusta también a las especificaciones del termopozo escogido.

Figura 26. Termocupla tipo K



### 3.8.9 Termistor NTC

El termistor escogido posee un rango de medición desde  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta  $150^{\circ}\text{C}$ . Es muy económico y pequeño. Era necesario que su tamaño no superara los  $3/8''$  que es la medida del termopozo donde se acopló. El acoplamiento se realizó usando silicona térmica para transferir el calor y el recubrimiento del cable siliconado para el aislamiento eléctrico.

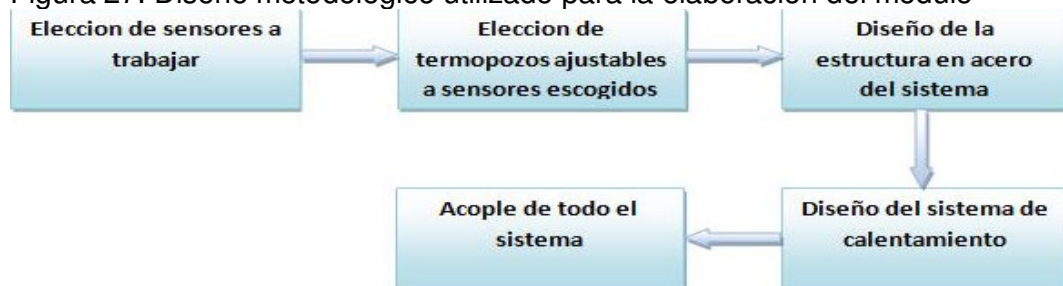
#### 3.8.9.1 Circuito integrado Lm-35

Este es otro de los sensores utilizados en el banco de pruebas. Para su acople se usó el mismo proceso del termistor. Este sensor es económico y entrega valores linealizados. Además tiene una gran sensibilidad y exactitud.

### 3.9 Acople de los materiales y diseño metodológico

Ya teniendo todos los elementos se realizó el acople de todos los elementos. Para la selección y proceso de elaboración del módulo se siguió un proceso metodológico el cual se observa en la figura 27.

Figura 27. Diseño metodológico utilizado para la elaboración del módulo



### 3.9.1 Acople del sistema

Para la elaboración física del modulo se desarrolló una representación en *SOLID EDGE*, en conjunto con el sistema de acotado. A continuación se observa, las graficas elaboradas durante la etapa de diseño y el proceso final de fabricación.

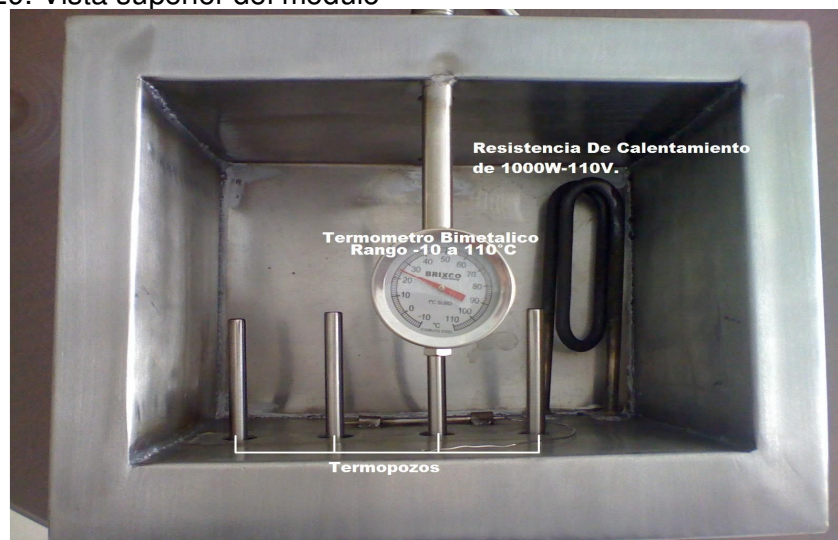
En la figura 28 se observa la vista superior, del modelo a escala.

Figura 28. Vista superior del modulo



En la figura 29 se observa la vista superior, del modelo real.

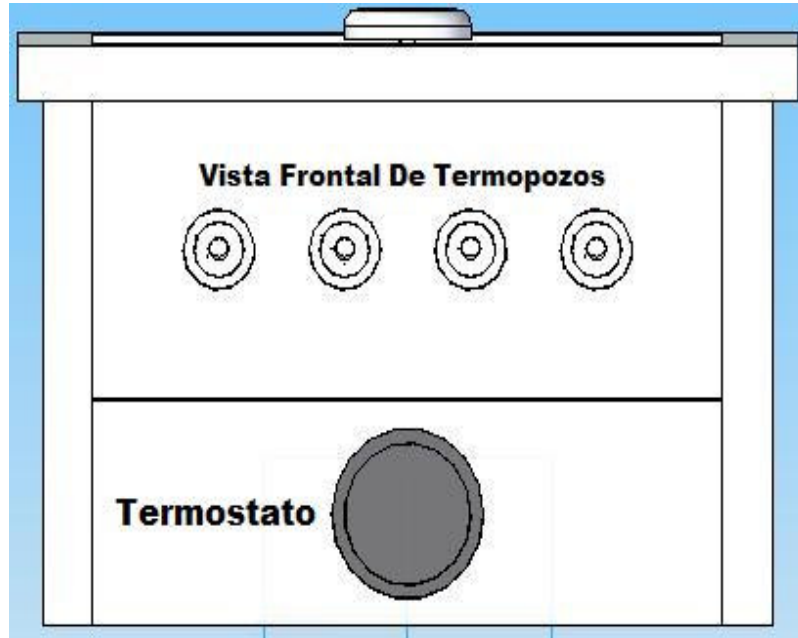
Figura 29. Vista superior del módulo





En la figura 30 se observa la vista frontal, del modelo a escala.

Figura 30. Vista frontal del módulo



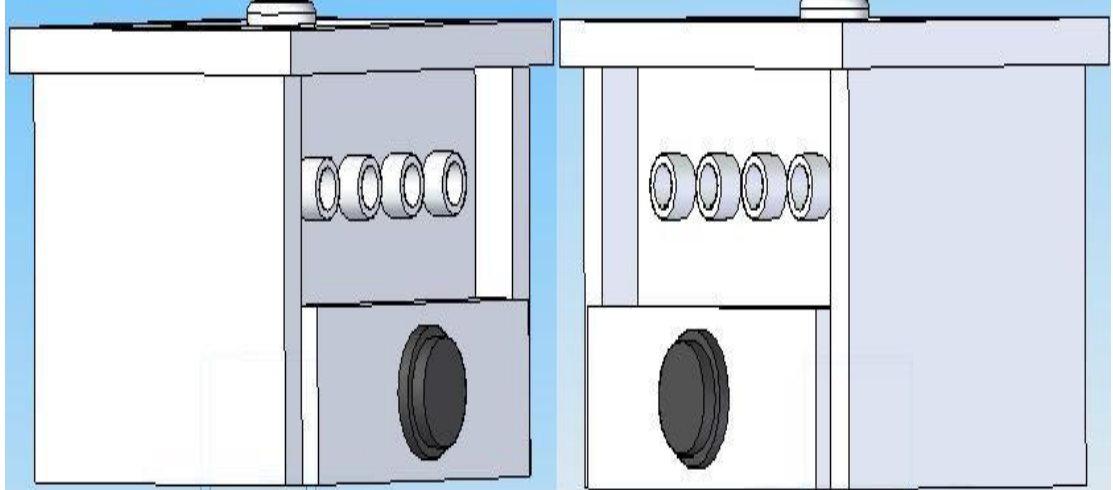
En la figura 31 se observa la vista frontal, del modelo real.

Figura 31. Vista frontal del módulo



En la figura 32 se observan las vistas laterales, del modelo a escala.

Figura 32. Vistas laterales del módulo



En la figura 33 se observa las vistas laterales, del modelo real.

Figura 33. Vistas laterales del módulo





En la figura 34 se observa la parte trasera, del modelo a escala.

Figura 34. Vista trasera del módulo



En la figura 35 se observa la parte trasera, del modelo real.

Figura 35. Vista trasera del módulo



Figura 36. Vistas del Módulo.



## 4. ELABORACION DE PRUEBAS

### 4.1 Calentamiento del tanque

Inicialmente se planteo que el liquido con el que se trabajaría es agua por este motivo los rangos de calentamiento son de 0°C hasta 100°C aproximadamente que es el punto de ebullición del agua. Al calentar el banco de pruebas con un volumen de agua aproximado a 7 litros de agua, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Tiempo de calentamiento hasta temperatura máxima: 22 minutos.
- Temperatura máxima 96°C.

El tiempo de calentamiento es ideal, ya que la persona que esté utilizando el módulo debe estar efectuando las tómas de medidas y si la temperatura sube muy rápido las mediciones no se van a poder realizar con muchos muestreos. Este tiempo se puede aumentar, ya que el termostato permite bajar la corriente que se le envía a la resistencia y de esta forma el calentamiento se hace más lento.

La temperatura máxima es de 96°C, debido a que a esta ya el agua empieza a hervir y se realiza el proceso de ebullición, que debería ser a 100°C. Este fenómeno ocurre porque el agua que a diario se maneja no es totalmente pura, posee ciertas impurezas y sales minerales que aceleran el proceso de ebullición de la misma.

### 4.2 RTD O Pt-100

En el proceso de calentamiento del banco de pruebas al realizar la toma de datos de la Pt-100 de tres hilos se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos Experimentales. Utilizando de referencia Termómetro bimetálico.

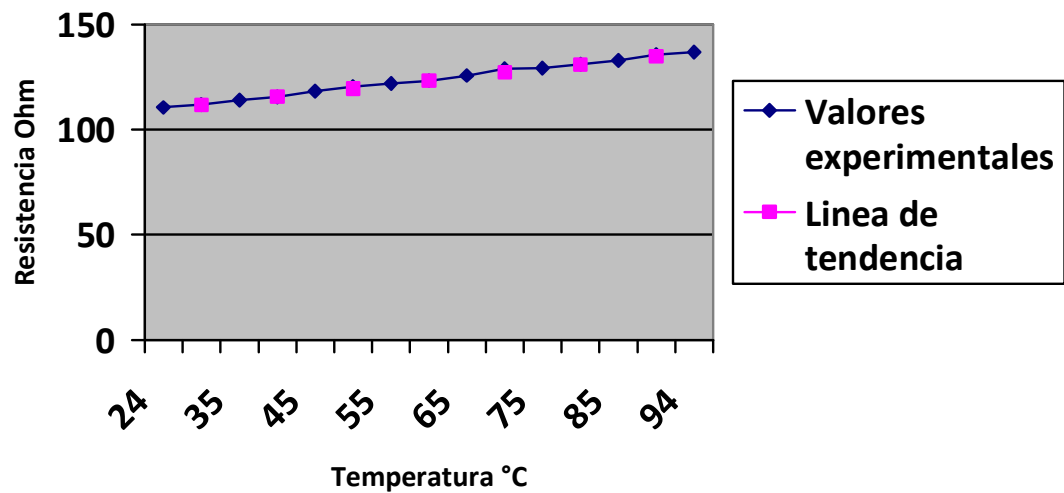
Los datos de la tabla 5 se tomaron teniendo en cuenta la lectura del termómetro bimetálico como referencia.

Tabla 5. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Bimetálico)

°C	R(Ω)
24	110.6
30	111.9
35	114.1
40	115.6
45	118.2
50	120.4
55	122
60	123.2
65	125.7
70	128.9
75	129.3
80	131.1
85	132.9
90	135.5
94	136.9

Figura 37. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos

### Temperatura Vs. Resistencia



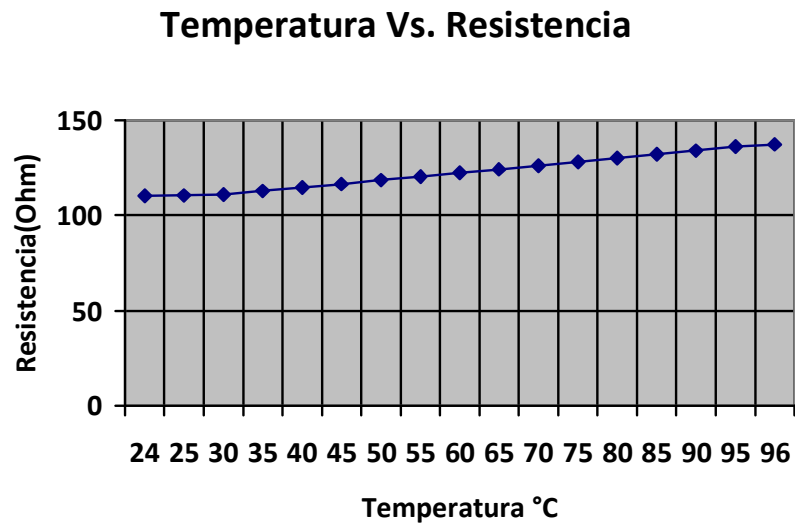
Datos Experimentales, Utilizando de referencia termómetro de alcohol.

Los datos de la tabla 6 se tomaron teniendo en cuenta la lectura del termómetro de alcohol como referencia.

Tabla 6. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Alcohol)

°C	R( $\Omega$ )
24	110.4
25	110.5
30	111.0
35	112.8
40	114.7
45	116.5
50	118.5
55	120.4
60	122.3
65	124.3
70	126.2
75	128.2
80	130.2
85	132.2
90	134.1
95	136.3
96	137.4

Figura 38. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos



Los datos teóricos del comportamiento de la Pt-100 los ofrece el fabricante y se especifica a continuación en la tabla 7.

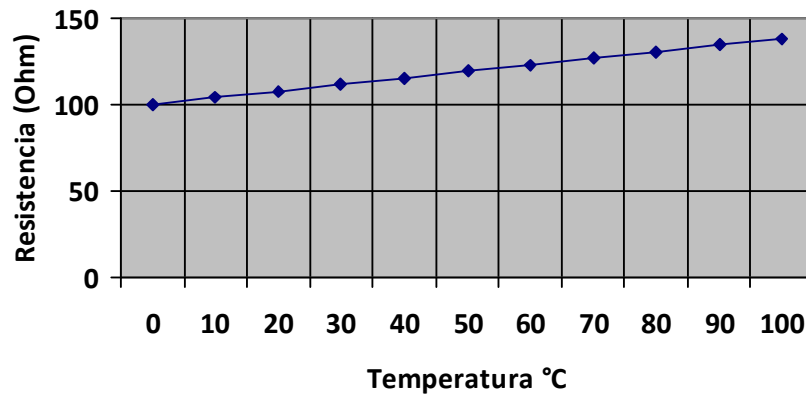
Tabla 7. Temperatura Vs. Resistencia en una Pt-100 (Teóricamente)

°C	R(Ω)
0	100.00
10	103.90
20	107.79
30	111.67
40	115.54
50	119.40
60	123.24
70	127.07
80	130.89
90	134.70
100	138.50

Fuente: Hoja técnica suministrada por el vendedor de la termocupla. Anexo C.

Figura 39. Grafica de Temperatura Vs. Resistencia, en la Pt-100 de tres hilos, con datos de fabricante.

### Temperatura Vs. Resistencia



Después de mucho análisis en las tomas de datos se observa que los datos obtenidos con el termómetro bimetalico son más precisos y se acercan a los datos por el fabricante. Los datos tomados con el termómetro de alcohol no son tan precisos debido a que este termómetro nos está marcando 2 grados más de la temperatura que ofrece el bimetalico.

De todas formas los datos obtenidos son verdaderamente exactos ya que están desviados por decimas. Además gracias al banco de pruebas se observó que

el incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico, de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

ESTA Pt-100 es un poco más costosa que la termocupla y la supera en mediciones de este de rangos (0° hasta 200°C), ya que posee una mejor precisión debido a que la termocupla viene para rangos más elevados lo que aumenta su error respecto a la Pt-100.

#### 4.3 Termocupla tipo K

Ya que la termocupla ofrece valores en milivoltios, los cuales no pueden ser leídos por un simple multímetro, se le acondiciono un amplificador para termopares compensado. AD (594)<sup>16</sup>

En el proceso de calentamiento del banco de pruebas al realizar la toma de datos con la termocupla tipo K se obtuvieron los siguientes resultados:

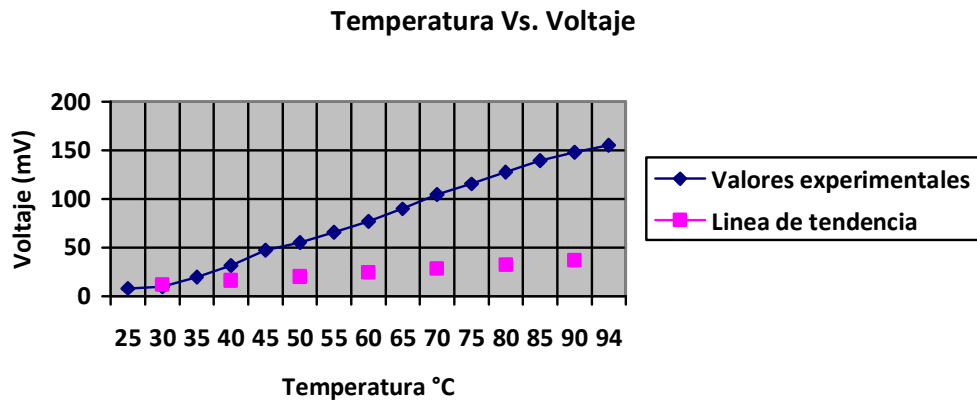
Los datos de la tabla 7 se tomaron teniendo en cuenta la lectura del termómetro bimetálico como referencia.

Tabla 8. Temperatura Vs. Voltaje de Salida AD (594) mV

<b>°C</b>	<b>Mv</b>
25	8.2
30	10
35	19.6
40	31.3
45	47.2
50	55.3
55	65.9
60	77
65	89.9
70	104.4
75	115.6
80	127.9
85	139.8
90	148.2
95	155.5

<sup>16</sup> Para mayor información consultar: <http://www.analog.com/en/temperature-sensing-and-thermal-management/digital-temperature-sensors/ad594/products/product.html> Visitado en agosto 13 de 2008

Figura 40. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Termocupla tipo K



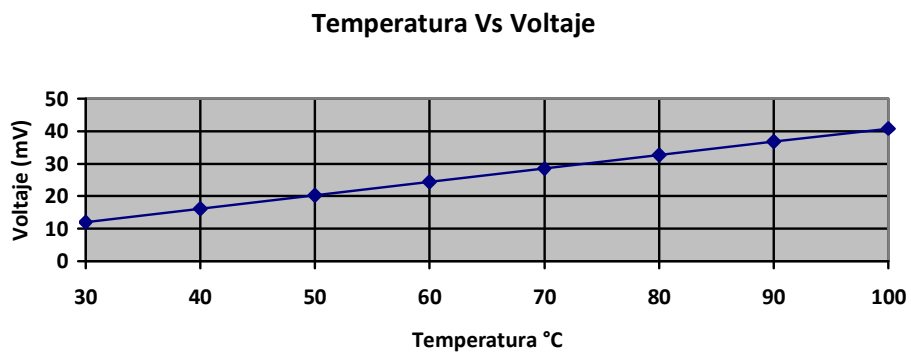
Los datos teóricos del comportamiento de la termocupla los ofrece el fabricante y se especifican a continuación en la tabla 9.

Tabla 9. Temperatura Vs. Voltaje de Salida AD (594) mV (Teóricamente)

°C	mV
30	12.03
40	16.11
50	20.22
60	24.36
70	28.50
80	32.66
90	36.81
100	40.95

Fuente: Hoja técnica suministrada por el vendedor de la termocupla. Anexo A

Figura 41. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Termocupla tipo K con datos de fabricante.



Luego de realizadas las mediciones se observa que la termocupla posee baja sensibilidad con respecto a la Pt-100, además su linealidad es baja por lo que hay que acondicionar la señal. En nuestro caso el acondicionamiento se realizo con un AD (594) que es un amplificado para termopares compensado que contiene un amplificador de instrumentación el cual entrega 10mV/°C.

La Termocupla tipo K presenta estabilidad, es robusta y versátil además de confiable.

Es un poco más económica que la Pt-100. Y una característica importante es que no requiere alimentacion. Solo el amplificador para termopares compensado es el que necesita alimentación de 5V.

#### 4.4 Circuito integrado Lm-35<sup>17</sup>

Este elemento también necesita alimentación externa de 5V, pero a diferencia de la termocupla no necesita acondicionamiento de señal, ya que funciona parecido al amplificador para termopares compensado.

En el proceso de calentamiento del banco de pruebas al realizar la toma de datos con el Lm-35 se obtuvieron los siguientes resultados:

Teniendo en cuenta la lectura del termómetro bimetalico como referencia.

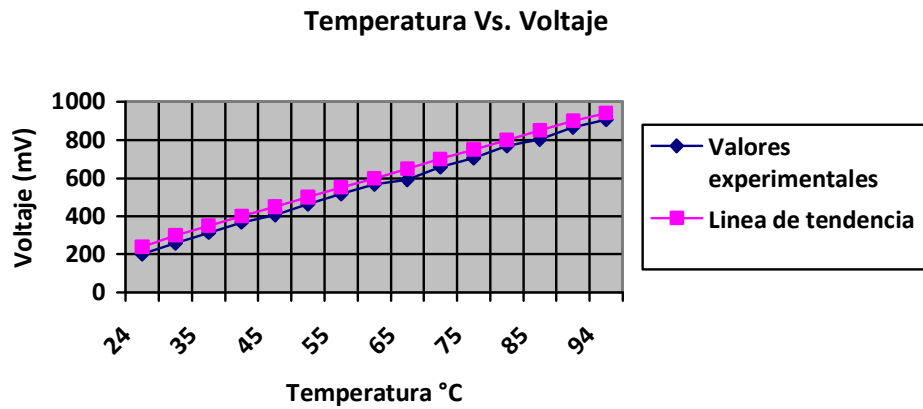
Tabla 10. Temperatura Vs. Voltaje (mV) de Salida Lm-35

°C	mV
25	202
30	259
35	314
40	368
45	407
50	464
55	516
60	567
65	590
70	659
75	705
80	769
85	803
90	866
94	907

<sup>17</sup> Para mayor información consultar: <http://www.ece.osu.edu/~passino/LM35.pdf>. junio de 2008



Figura 42. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Lm-35



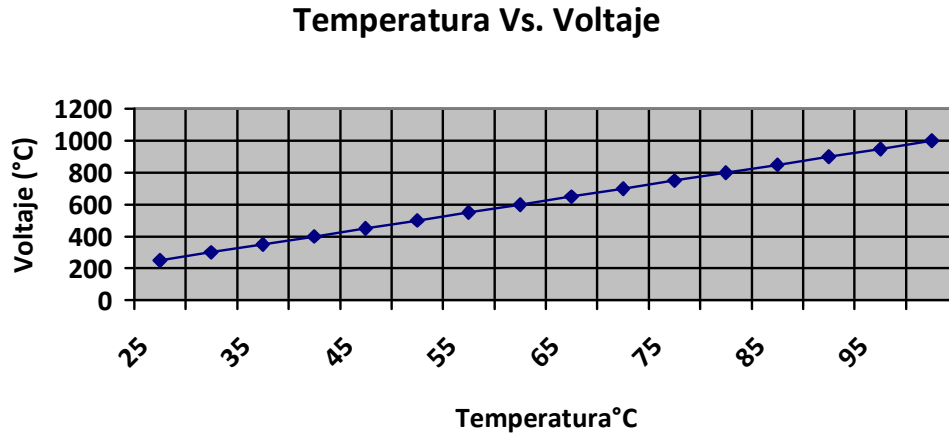
Los datos teóricos del comportamiento del Im-35 los ofrece el fabricante y se especifican a continuación en la tabla 11.

Tabla 11 Temperatura Vs. Voltaje (mV) de Salida Lm-35 (Teóricamente)

°C	mV
25	250
30	300
35	350
40	400
45	450
50	500
55	550
60	600
65	650
70	700
75	750
80	800
85	850
90	900
95	950
100	1000

Fuente: Hoja técnica suministrada por el vendedor de la termocupla. Anexo B.

Figura 43. Grafica de temperatura Vs. Voltaje, Lm-35 con datos de fabricante.



Observando las mediciones realizadas con el Lm-35 se puede concluir que posee una buena respuesta linealizada, además es muy sensible.

Una de sus mayores ventajas es su costo ya que es muy económico y además presenta linealización y fácil de conectar. Su precisión es de mas o menos 0.5.

Una de sus desventajas es que no viene aislado, por tanto se tuvo que adecuarlo a un termopozo para protegerlo del líquido, ya que no puede ser mojado porque sus pines están descubiertos y se puede dañar. Por esta razón se uso silicona térmica para que transfiera el termopozo al lm-35 y el recubrimiento de cabe siliconado los pines y evitar daños. Es importante saber que este tipo de recubrimiento siliconado viene especial para altas temperaturas.

#### 4.5 Termistor NTC

Este elemento presenta un comportamiento no lineal. En el banco de pruebas se puede tomar los datos de temperatura Vs. Voltaje.

En el proceso de calentamiento del banco de pruebas al realizar la toma de datos con el termistor se obtuvieron los siguientes resultados:

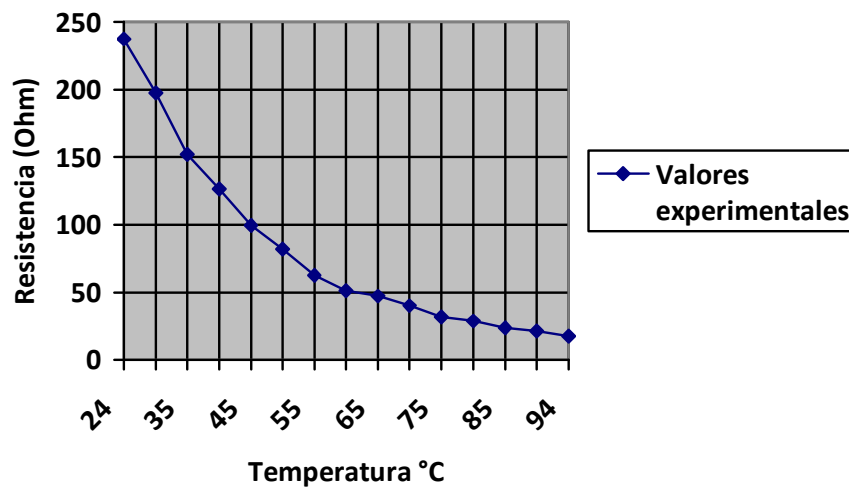
Teniendo en cuenta la lectura del termómetro bimetalico como referencia.

Tabla 12. Temperatura Vs. Resistencia, en un termistor

°C	R(Ω)
24	237.5
30	197.7
35	152
40	126.3
45	99.4
50	82.1
55	62.6
60	51.3
65	47.2
70	40
75	31.6
80	28.8
85	23.8
90	21.5
94	17.6

Figura 44. Grafica de temperatura Vs. Resistencia, Termistor PTC.

### Temperatura Vs. Resistencia



Este termistor posee variaciones mínimas, debido a una alta sensibilidad. Su rango de medida es de -50°C hasta 150°C.

Este tipo de dispositivo es económico, pero es poco confiable e inestable. Su masa térmica es muy pequeña esto lleva a errores.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se construyó un banco de calibración de sensores de temperatura en acero inoxidable en el cual se tienen 4 termopozos con sus respectivos sensores. Además una resistencia de calentamiento y un termostato para la simulación de un proceso térmico. También cuenta con un termómetro bimetálico, el cual será nuestro instrumento de medida patrón.
- Se logró obtener la medición de 4 sensores diferentes como son, Pt-100, termocupla tipo K, termistor y circuito integrado Lm-35 todas en tiempo real.
- Es recomendable tener cuidado al momento del calentamiento del banco de pruebas, ya que alcanza temperaturas de hasta 95 °C con agua en su tanque.
- El circuito integrado Lm-35 posee ventajas en su costo, ya que es muy económico. Además presenta linealización y fácil conexión. Su precisión es de más o menos 0.5 °C.
- La estructura se diseñó en un material resistente a altas temperaturas y además se agregó una fibra de vidrio entre sus laminas de aceros para evitar que se caliente en el exterior y de esta manera evitar que las personas que lo manipulan no se quemen.
- Se observa que los termistores tienen mucha inestabilidad y son poco confiables. Su principal ventaja es su bajo costo, pero no es linealizado por lo que toca acondicionar la señal.
- Los termopozos son un instrumento necesario, ya que aísla el sensor de la variable a medir y además por ser un material superconductor no hay pérdidas en la transferencia de temperatura.
- En el diseño exterior del módulo se dejó un espacio pensando si en un futuro se le quiere adecuar otro termopozo.
- Se comprobó que en una Pt-100, el incremento de la resistencia no es lineal pero sí creciente y característico de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.
- El tiempo que tarda el módulo en alcanzar el punto de ebullición del agua es de aproximadamente 23 minutos ideal para ir tomando datos en

cada uno de los sensores. Además si se quiere que el tiempo sea mayor se puede graduar con la perilla del termostato.

- Se usó una resistencia de 1000W a 110V para no consumir tanta potencia y además que las conexiones de 110V se consiguen mas fácilmente que las de 220V.
- El termómetro bimetalico que se usó presenta una buena resolución y exactitud. Además nos da una mejor visibilidad en la medición que el de alcohol.
- Se observó en la termocupla tipo K la baja sensibilidad con respecto a la Pt-100, además su linealidad es baja por lo que hay que acondicionar la señal. En nuestro caso el acondicionamiento se realizo con un AD (594).
- Se recomienda tratar de aislar la resistencia de calentamiento del contacto directo del agua o construirla en acero inoxidable, ya que esta es altamente corrosiva para el metal del que esta echo la resistencia.
- Se logro acoplar el Lm-35 y termistor a los termopozos utilizados. Se uso silicona térmica para la transferencia y cable siliconado para el aislamiento electico de estos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

[1] R. Pallas Areny. Sensores y acondicionadores de Señal. Barcelona: Marcombo, 1993. Mayo de 2008

[2] A. Creus Sole. Instrumentación Industrial. Editorial Alfa Omega: Marcombo, Edición Séptima. Abril de 2008

[3] D. Albert Helfrick. Instrumentación y Electrónica Moderna y Técnicas De Medición. 29 de mayo de 2008

[4] Portal electrónico relacionado con software y electrónica. Fecha de visita 15 de mayo de 2008  
<http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/transductor1.htm>.

[5] National Semiconductor. Linear Applications Handbook. 15 de mayo de 2008

[6] Portal electrónico relacionado con software y electrónica. Fecha de visita junio de 2008.  
<http://www.tech-faq.com/lang/es/hyperterminal.shtml>

[7] Handbook of modern sensors, AIP Press. FIS (4) R. Julio de 2008

## ANEXO A. PDF TERMOPARES

La termocupla K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos.

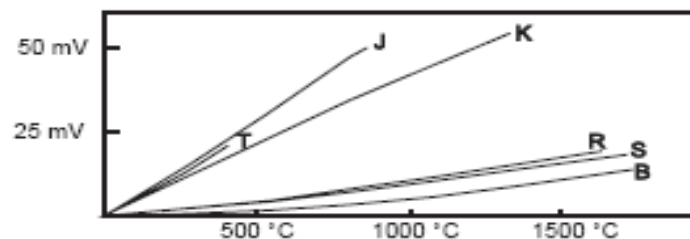
Las termocuplas R, S, B se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero)

Finalmente las tipo T eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los Pt100 (ver la nota técnica 4).

Tc	Cable + Aleación	Cable - Aleación	°C	Rango (Mín, Max) mV	Volts Max
J	Hierro	cobre/nickel	(-180, 750)	422	
K	Nickel/cromo	Nickel/aluminio	(-180, 1372)	54.8	
T	Cobre	cobre/nickel	(-250, 400)	20.8	
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09	
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	18.68	
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814	

### Linealización

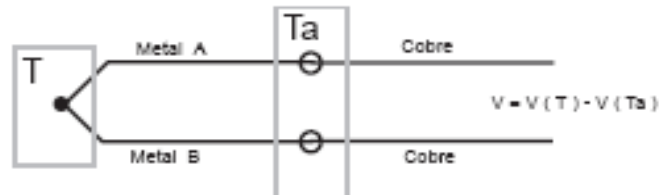
La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal (no es una recta), es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.



"Compensación de cero"

El principal inconveniente de las termocuplas es su necesidad de "compensación de cero". Esto se debe a que en algún punto, habrá que empalmar los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre.

En ese punto se producirán dos nuevas termocuplas con el cobre como metal para ambas, generando cada una un voltaje proporcional a la temperatura de ambiente ( $T_a$ ) en el punto del empalme.



Antiguamente se solucionaba este problema colocando los empalmes en un baño de hielo a cero grados para que generen cero voltaje ( $T_a = 0$  y luego  $V(T_a) = 0$ ).

Actualmente todos los instrumentos modernos miden la temperatura en ese punto (mediante un sensor de temperatura adicional) y la suman para crear la compensación y obtener así la temperatura real.

El punto de empalme (llamado "unión ó juntura de referencia") es siempre en el conector a la entrada del instrumento pues ahí está el sensor de temperatura. De modo que es necesario llegar con el cable de la termocupla hasta el mismo instrumento.

La termocupla, hecha de metal A y metal B está sometida a una temperatura T. En los extremos de la termocupla se coloca un voltímetro con puntas de prueba de cobre a temperatura de ambiente  $T_a$ .

Recortando el circuito se encuentran el voltaje V que marca el voltímetro:

$$\begin{aligned} V &= V_{cuA}(T_a) + V_{A,B}(T) + V_{B,cu}(T_a) \\ V &= [V_{B,cu}(T_a) + V_{cuA}(T_a)] + V_{A,B}(T) \\ V &= V_{B,A}(T_a) + V_{A,B}(T) \\ V &= V_{A,B}(T) - V_{A,B}(T_a) \end{aligned}$$

El voltaje que nos interesa saber para conocer el valor de la temperatura T es  $V_{A,B}(T)$ , este se consigue despejándolo:

$$V_{A,B}(T) = V + V_{A,B}(T_a)$$

Luego conociendo  $T_a$  se busca en la tabla de la termocupla el valor de  $V_{A,B}(T_a)$  y se suma a V medido en el voltímetro con lo que se obtiene  $V_{A,B}(T)$ . Ahora con este valor se busca en la tabla el valor de T.

Los instrumentos para TC miden  $T_a$  en su conector y suman esta cantidad  $V_{A,B}(T_a)$  automáticamente para hacer la compensación de cero.



TERMOCUPLA °C	K milivolts									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-270	-6.458									
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.371	-6.377	-6.382	-6.388	-6.394	-6.399
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.253
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.796	-5.813	-5.829	-5.845	-5.860	-5.876
-180	-5.550	-5.569	-5.587	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.712
-170	-5.354	-5.374	-5.394	-5.414	-5.434	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.249	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333
-150	-4.912	-4.936	-4.959	-4.983	-5.006	-5.029	-5.051	-5.074	-5.097	-5.119
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.743	-4.768	-4.792	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889
-130	-4.410	-4.437	-4.463	-4.489	-4.515	-4.541	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644
-120	-4.138	-4.166	-4.193	-4.221	-4.248	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384
-110	-3.852	-3.881	-3.910	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.053	-4.082	-4.110
-100	-3.553	-3.584	-3.614	-3.644	-3.674	-3.704	-3.734	-3.764	-3.793	-3.823
-90	-3.242	-3.274	-3.305	-3.337	-3.368	-3.399	-3.430	-3.461	-3.492	-3.523
-80	-2.920	-2.953	-2.985	-3.018	-3.050	-3.082	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211
-70	-2.586	-2.620	-2.654	-2.687	-2.721	-2.754	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887
-60	-2.243	-2.277	-2.312	-2.347	-2.381	-2.416	-2.450	-2.484	-2.518	-2.552
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.102	-2.137	-2.173	-2.208
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739
0	-0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353
0	-0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Nota Técnica 2, rev. b, <http://www.asian.cl>

8

## ANEXO B. AMPLIFICADOR PARA TERMOPARES COMPENSADO. (AD594)



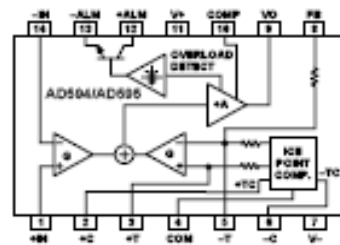
## Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

### AD594/AD595

#### 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-Braced DIP or Low Cost CerDip

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



#### 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 µA, 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

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 ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-braced 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.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

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

Model	AD594A		AD594C		AD595A		AD595C		Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b>									
$+V_2$ to $-V_2$		36		36		36		36	Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_2 - 0.15$	$+V_2$	$-V_2 - 0.15$	$+V_2$	$-V_2 - 0.15$	$+V_2$	$-V_2 - 0.15$	$+V_2$	Volts
Differential Input Voltage	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	Volts
<b>Alarm Voltages</b>									
+ALM	$-V_2$	$-V_2 + 36$	$-V_2$	$-V_2 + 36$	$-V_2$	$-V_2 + 36$	$-V_2$	$-V_2 + 36$	Volts
-ALM	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	$-V_2$	$+V_2$	Volts
Operating Temperature Range	-55	+125	-55	+125	-55	+125	-55	+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite		Indefinite		Indefinite		Indefinite		
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT</b>									
Specified Temperature Range 0°C to +50°C									
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>		<b>±3</b>		<b>±1</b>		<b>±5</b>		<b>±1</b>	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>		<b>±0.85</b>		<b>±0.25</b>		<b>±0.85</b>		<b>±0.25</b>	°C/°C
Gain Error		<b>±1.5</b>		<b>±0.75</b>		<b>±1.5</b>		<b>±0.75</b>	%
Nominal Transfer Function		10		10		10		10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>									
Closed Loop Gain <sup>3</sup>	193.4		193.4		247.3		247.3		
Input Offset Voltage	(Temperature in °C) × 51.78 $\mu$ V/°C		(Temperature in °C) × 51.78 $\mu$ V/°C		(Temperature in °C) × 40.44 $\mu$ V/°C		(Temperature in °C) × 40.44 $\mu$ V/°C		$\mu$ V
Input Bias Current	0.1		0.1		0.1		0.1		$\mu$ A
Differential Input Range	-10	+30	-10	+30	-10	+30	-10	+30	mV
Common-Mode Range	$-V_2 - 8.15$	$-V_2 - 4$	$-V_2 - 8.15$	$-V_2 - 4$	$-V_2 - 8.15$	$-V_2 - 4$	$-V_2 - 8.15$	$-V_2 - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity—RTD	18		18		18		18		mV/V
Power Supply Sensitivity—RTD	18		18		18		18		mV/V
<b>Output Voltage Range</b>									
Dual Supply	$-V_2 + 2.5$	$+V_2 - 2$	$-V_2 + 2.5$	$+V_2 - 2$	$-V_2 + 2.5$	$+V_2 - 2$	$-V_2 + 2.5$	$+V_2 - 2$	Volts
Single Supply	0	$+V_2 - 2$	0	$+V_2 - 2$	0	$+V_2 - 2$	0	$+V_2 - 2$	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>	±5		±5		±5		±5		mA
3-dB Bandwidth	15		15		15		15		MHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>									
$V_{COMMON}$ at 2 mA	0.5		0.5		0.5		0.5		Volts
Leakage Current	<b>±1</b>		<b>±1</b>		<b>±1</b>		<b>±1</b>		$\mu$ A max
Operating Voltage at -ALM	$+V_2 - 4$		$+V_2 - 4$		$+V_2 - 4$		$+V_2 - 4$		Volts
Short-Circuit Current	20		20		20		20		mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>									
Specified Performance									
Operating <sup>5</sup>	$+V_2 = 5, -V_2 = 0$		$+V_2 = 5, -V_2 = 0$		$+V_2 = 5, -V_2 = 0$		$+V_2 = 5, -V_2 = 0$		Volts
Quiescent Current (No Load)	$+V_2$ to $-V_2 \pm 50$		$+V_2$ to $-V_2 \pm 50$		$+V_2$ to $-V_2 \pm 50$		$+V_2$ to $-V_2 \pm 50$		Volts
$+V_2$	100	500	100	500	100	500	100	500	$\mu$ A
$-V_2$	100		100		100		100		$\mu$ A
<b>PACKAGE OPTION</b>									
TO-116 (D-14)	AD594AD		AD594CD		AD595AD		AD595CD		
Canpkg (Q-14)	AD594AQ		AD594CQ		AD595AQ		AD595CQ		

## NOTES

<sup>1</sup> Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7  $\mu$ V/°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.

<sup>2</sup> Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

<sup>3</sup> Via 8 shown in Pin 6.

<sup>4</sup> Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 k $\Omega$  resistor at output voltage below 2.5 V.

<sup>5</sup>  $-V_2$  must not exceed -14.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from these 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 51.70  $\mu$ V/°C, while for a type K it is 40.44  $\mu$ V/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7  $\mu$ V/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44  $\mu$ V/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16  $\mu$ V for the AD594 and 11  $\mu$ V 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,  $V_S = -5V, +15V$ )

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV	Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454	500	27.388	5100	20.640	5107
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370	520	28.511	5517	21.483	5318
-160	-6.821	-1333	-5.141	-1288	540	29.642	5736	22.346	5529
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152	560	30.782	5956	23.188	5740
-120	-5.426	-1046	-4.135	-1021	580	31.933	6179	24.050	5950
-100	-4.632	-893	-3.553	-876	600	33.096	6404	24.902	6161
-80	-3.785	-729	-2.920	-719	620	34.273	6632	25.751	6371
-60	-2.892	-555	-2.240	-552	640	35.464	6862	26.589	6581
-40	-1.960	-375	-1.527	-375	660	36.671	7095	27.448	6790
-20	-0.985	-189	-0.777	-189	680	37.893	7332	28.288	6998
-10	-0.501	-94	-0.392	-94	700	39.130	7571	29.128	7206
0	0	3.1	0	2.7	720	40.382	7813	29.965	7413
10	3.07	101	3.97	101	740	41.647	8058	30.799	7619
20	1.039	200	0.798	200	750	42.283	8181	31.216	7722
25	1.277	250	1.000	250	760	-	-	31.629	7825
30	1.536	300	1.203	300	780	-	-	32.485	8029
40	2.055	401	1.611	401	800	-	-	33.277	8232
50	2.585	503	2.022	503	820	-	-	34.095	8434
60	3.115	606	2.436	606	840	-	-	34.909	8636
80	4.186	813	3.266	810	860	-	-	35.718	8836
100	5.268	1022	4.095	1015	880	-	-	36.524	9035
120	6.359	1233	4.919	1219	900	-	-	37.325	9235
140	7.457	1445	5.733	1420	920	-	-	38.122	9430
160	8.560	1659	6.539	1620	940	-	-	38.915	9626
180	9.667	1873	7.338	1817	960	-	-	39.705	9821
200	10.777	2087	8.137	2015	980	-	-	40.488	10015
220	11.887	2302	8.938	2213	1000	-	-	41.269	10209
240	12.998	2517	9.740	2413	1020	-	-	42.048	10400
260	14.108	2732	10.540	2614	1040	-	-	42.817	10591
280	15.217	2946	11.341	2817	1060	-	-	43.585	10781
300	16.325	3160	12.142	3022	1080	-	-	44.353	10970
320	17.432	3374	12.939	3227	1100	-	-	45.118	11158
340	18.537	3588	13.734	3434	1120	-	-	45.883	11345
360	19.640	3801	14.524	3641	1140	-	-	46.642	11530
380	20.743	4015	15.312	3849	1160	-	-	47.395	11714
400	21.846	4228	16.100	4057	1180	-	-	48.145	11897
420	22.949	4441	16.881	4266	1200	-	-	48.892	12078
440	24.054	4655	17.665	4476	1220	-	-	49.635	12258
460	25.161	4869	18.450	4686	1240	-	-	50.375	12436
480	26.272	5084	19.238	4896	1250	-	-	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

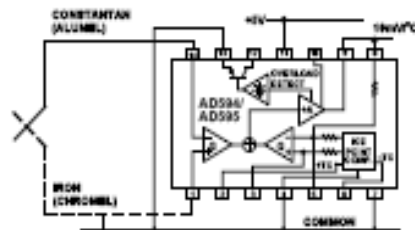


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

#### 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  $\bar{V}$ -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  $\bar{V}$ . 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.

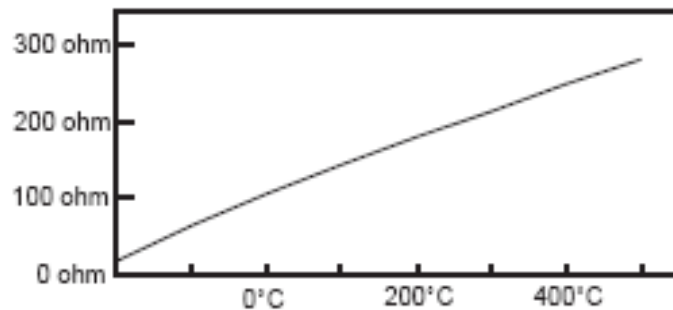
By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

## ANEXO C. TERMORRESISTENCIA O RTD Pt-100

### Nota técnica 4 :

#### Pt100, su operación, instalación y tablas.

**Que es un Pt100 ?** Un Pt100 es un sensor de temperatura. Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.  
El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.



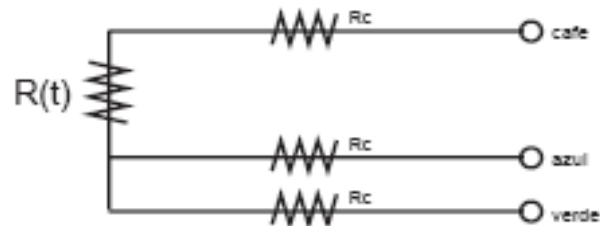
Un Pt100 es un tipo particular de RTD (Dispositivo Termo Resistivo)

Normalmente las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina) , en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

**Ventajas del Pt100** Por otra parte los Pt100 siendo levemente más costosos y mecánicamente no tan rígidos como las termocuplas, las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °).

### Con 3 hilos

El modo de conexión de 3 hilos es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

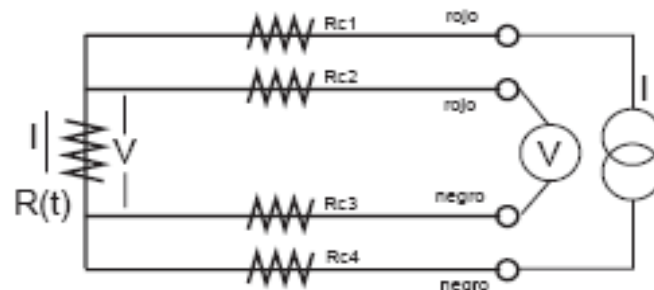


El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa (casi siempre) en el "puente de Wheatstone". Por supuesto el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión.

En el caso particular de los instrumentos ARIAN, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde con lo cual el instrumento mide  $2R_c$ . Luego mide la resistencia por los cables cafe y azul para finalmente restarle  $2R_c$  al valor medido y obtener  $R(t)$ .

### Con 4 hilos

El método de 4 hilos es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso.

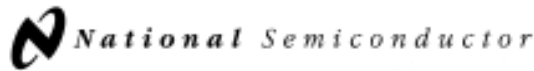


Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente  $I$  conocida a través de  $R(t)$  provocando una diferencia de potencial  $V$  en los extremos de  $R(t)$ .

Los cables 2 y 4 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables  $R_{c2}$  y  $R_{c3}$  será cero ( $dV = I_c \cdot R_c = 0 \cdot R_c = 0$ ) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje  $V$  en los extremos del elemento  $R(t)$ .

Finalmente el instrumento obtiene  $R(t)$  al dividir  $V$  medido entre la corriente  $I$  conocida.

Pt 100 ohms											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-190	22.78	22.35	21.93	21.50	21.08	20.66	20.23	19.81	19.38	18.96	
-180	27.01	26.59	26.17	25.74	25.32	24.90	24.47	24.05	23.63	23.20	
-170	31.24	30.81	30.39	29.97	29.55	29.13	28.70	28.28	27.86	27.44	
-160	35.45	35.03	34.61	34.19	33.77	33.34	32.92	32.50	32.08	31.66	
-150	39.65	39.23	38.81	38.39	37.97	37.55	37.13	36.71	36.29	35.87	
-140	43.78	43.37	42.96	42.54	42.13	41.72	41.30	40.89	40.48	40.06	
-130	47.90	47.49	47.08	46.67	46.26	45.85	45.43	45.02	44.61	44.20	
-120	52.01	51.60	51.19	50.78	50.37	49.96	49.55	49.14	48.73	48.32	
-110	56.11	55.70	55.29	54.88	54.48	54.07	53.66	53.25	52.84	52.43	
-100	60.20	59.79	59.38	58.98	58.57	58.16	57.75	57.34	56.93	56.52	
-90	64.23	63.83	63.43	63.02	62.62	62.22	61.81	61.41	61.01	60.60	
-80	68.25	67.85	67.45	67.05	66.65	66.25	65.84	65.44	65.04	64.64	
-70	72.26	71.86	71.46	71.06	70.66	70.26	69.86	69.46	69.06	68.66	
-60	76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67	
-50	80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66	
-40	84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65	
-30	88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62	
-20	92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58	
-10	96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53	
0	100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47	
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41	
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29	
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16	
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86	
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51	
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32	
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12	
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91	
110	142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69	
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45	
130	149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20	
140	153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95	
150	157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68	
160	161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39	
170	164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10	
180	168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79	
190	172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47	
200	175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14	
210	179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81	
220	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45	
230	186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09	
240	190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72	
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33	
260	197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94	
270	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53	
280	204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11	
290	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67	
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	



November 2000

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

## LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

### General Description

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

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

### Features

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

### Typical Applications

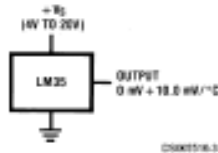
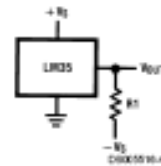


FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor ( $+2^{\circ}\text{C}$  to  $+160^{\circ}\text{C}$ )



Choose  $R_1 = -V_1/60\ \mu\text{A}$   
 $V_{out} = +1,500\text{ mV}$  at  $+150^{\circ}\text{C}$   
 $= +250\text{ mV}$  at  $+25^{\circ}\text{C}$   
 $= -500\text{ mV}$  at  $-55^{\circ}\text{C}$

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor



## Connection Diagrams

**TO-48  
Metal Can Package\***



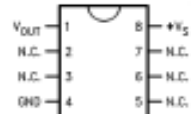
**BOTTOM VIEW**  
DS000115.1

\*Case is connected to negative pin (GND).

Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or LM35DH

See NS Package Number H03H

**SO-8  
Small Outline Molded Package**



DS000116.21

N.C. = No Connection

**Top View**

Order Number LM35DM

See NS Package Number M08A

**TO-92  
Plastic Package**



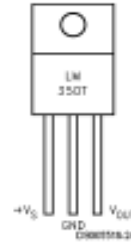
**BOTTOM VIEW**  
DS000115.3

Order Number LM35CZ,

LM35CAZ or LM35DZ

See NS Package Number Z03A

**TO-220  
Plastic Package\***



DS000116.24

\*Tab is connected to the negative pin (GND).

Note: The LM35DT product is different than the discontinued LM35DP.

Order Number LM35DT

See NS Package Number TA03F

**Absolute Maximum Ratings** (Note 10)

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

Supply Voltage +35V to -0.2V  
Output Voltage +5V to -1.0V  
Output Current 10 mA

Storage Temp.:  
TO-46 Package, -60°C to +180°C  
TO-92 Package, -60°C to +150°C  
SO-8 Package, -65°C to +150°C  
TO-220 Package, -65°C to +150°C

Lead Temp.:  
TO-46 Package,  
(Soldering, 10 seconds) 300°C

TO-92 and TO-220 Package,  
(Soldering, 10 seconds) 260°C  
SO Package (Note 12)  
Vapor Phase (60 seconds) 215°C  
Infrared (15 seconds) 220°C  
ESD Susceptibility (Note 11) 2500V  
Specified Operating Temperature Range:  $T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$   
(Note 2)  
LM35, LM35A -55°C to +150°C  
LM35C, LM35CA -40°C to +110°C  
LM35D 0°C to +100°C

**Electrical Characteristics**

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$		$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	$\pm 0.3$			$\pm 0.3$		$\pm 1.0$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MAX}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MIN}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$		$\pm 1.5$	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	$\pm 0.18$		$\pm 0.36$	$\pm 0.16$		$\pm 0.3$	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $I_{OL} \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$	$\pm 1.0$	$\pm 3.0$	mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	$\pm 0.6$		$\pm 3.0$	$\pm 0.6$		$\pm 3.0$	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.01$	$\pm 0.05$		$\pm 0.01$	$\pm 0.05$	$\pm 0.1$	mV/V
	$4V \leq V_{IN} \leq 30V$	$\pm 0.02$		$\pm 0.1$	$\pm 0.02$		$\pm 0.1$	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_{IN} = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67	114	$\mu\text{A}$
	$V_{IN} = +5V$	106		131	91		114	$\mu\text{A}$
	$V_{IN} = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68	118	$\mu\text{A}$
	$V_{IN} = +30V$	106.6		133	91.6		118	$\mu\text{A}$
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_{IN} \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0	2.0	$\mu\text{A}$
	$4V \leq V_{IN} \leq 30V$	0.6		2.0	0.6		2.0	$\mu\text{A}$
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.38		+0.6	+0.38		+0.6	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$ for 1000 hours	$\pm 0.08$			$\pm 0.08$			$^\circ\text{C}$

## ANEXO E. TERMISTOR NTC

BCComponents

Product specification

### NTC thermistors, accuracy line

2322 640 5....

#### FEATURES

- Accurate over a wide temperature range (tolerance on B-value between 2.5% and 0.75%)
- Good stability over a long life
- Excellent price/performance ratio
- Flexible leads
- Low heat conductivity through 0.4 mm diameter Ni-leads.

#### APPLICATION

Temperature sensing and control.

#### DESCRIPTION

These thermistors have a negative temperature coefficient. The device consists of a chip with two tinned Ni-leads. The device is colour coded.

#### PACKAGING

The thermistors are packed in cardboard boxes; the smallest packaging quantity is 500 units.

#### MECHANICAL DATA

##### Marking

The thermistors are marked with coloured bands; see Fig. 1 and Table 1.

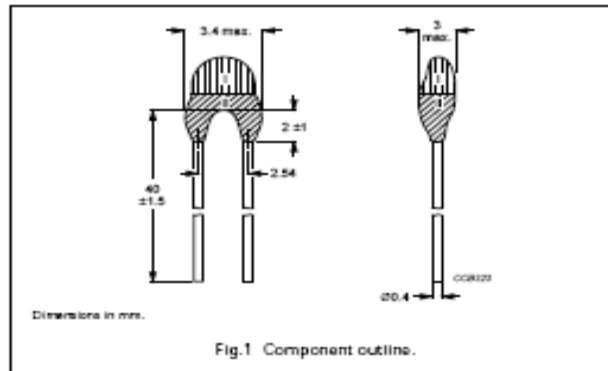
##### Mounting

By soldering in any position.

#### QUICK REFERENCE DATA

PARAMETER	VALUE
Resistance value at 25 °C	2 to 470 kΩ
Tolerance on R <sub>25</sub> -value	±5%; ±3%; ±2%; ±1%
Tolerance on B <sub>25/105</sub> -value	±2.5 to ±0.75%
Maximum dissipation	100 mW
Response time	≈1.7 s
Operating temperature range at: zero dissipation (continuously)	-40 to +125 °C
zero dissipation (for short periods)	≤150 °C
maximum dissipation (100 mW)	0 to +55 °C
Climatic category	40/125/56
Mass	≈0.11 g

#### Outline



BCComponents

Product specification

### NTC thermistors, accuracy line

2322 640 5....

#### ORDERING INFORMATION

**Table 1** R<sub>25</sub>-values, catalogue numbers and coding; note 1

The thermistors have a 12-digit catalogue number starting with 2322 640 5. The subsequent 4 digits indicate the resistance value and tolerance.

R <sub>25</sub> (kΩ)	B <sub>25/105</sub> -VALUE	CATALOGUE NUMBER 2322 640 5....				CODING (see Fig.1)	
		R <sub>25</sub> ±5%	R <sub>25</sub> ±3%	R <sub>25</sub> ±2%	R <sub>25</sub> ±1%	I	II
2	3528 K ±0.5%	3202	6202	4202	5202	orange	orange
2.7	3977 K ±0.75%	3272	6272	4272	5272	red	red
4.7	3977 K ±0.75%	3472	6472	4472	5472	green	green
5	3977 K ±0.75%	3502	6502	4502	5502	black	white
10	3977 K ±0.75%	3103	6103	4103	5103	blue	blue
12	3740 K ±2%	3123	6123	4123	—	yellow	yellow
22	3740 K ±2%	3223	6223	4223	—	white	white
47	4090 K ±1.5%	3473	6473	4473	—	black	black
68	4190 K ±1.5%	3683	6683	4683	—	grey	grey
100	4190 K ±1.5%	3104	6104	4104	5104	brown	brown
470	4570 K ±1.5%	3474	6474	4474	—	violet	violet

#### Note

1. Extended range available on request.

**NTC thermistors, accuracy line****2322 640 5....****Table 2** Resistance values at intermediate temperatures with  $R_{25}$  at 2 k $\Omega$ ; see also Table 1

$T_{oper}$ (°C)	$R_T/R_{25}$	$\Delta R$ DUE TO B-TOLERANCE (%)	TC (%/K)	$R_{25}$ ( $\Omega$ )
				2322 640 ....; see Table 7, note 1 5.202
-40	23.3402	1.65	-6.06	46684
-35	17.3347	1.49	-5.84	34672
-30	13.0166	1.34	-5.62	26035
-25	9.8764	1.19	-5.42	19754
-20	7.5682	1.05	-5.23	15138
-15	5.8541	0.92	-5.05	11709
-10	4.5688	0.79	-4.87	9138
-5	3.5961	0.66	-4.71	7193
0	2.8533	0.54	-4.55	5707
5	2.2815	0.43	-4.40	4563
10	1.8376	0.31	-4.26	3675
15	1.4904	0.21	-4.12	2981
20	1.2169	0.10	-3.99	2434
25	1.0000	0.00	-3.87	2000
30	0.8266	0.10	-3.75	1653
35	0.6873	0.19	-3.63	1375
40	0.5746	0.29	-3.53	1149
45	0.4827	0.37	-3.42	965.0
50	0.4073	0.46	-3.32	814.7
55	0.3452	0.54	-3.23	690.5
60	0.2937	0.62	-3.14	587.5
65	0.2508	0.70	-3.05	501.7
70	0.2149	0.78	-2.97	429.8
75	0.1847	0.85	-2.89	369.5
80	0.1593	0.92	-2.81	318.6
85	0.1377	0.99	-2.73	275.5
90	0.1194	1.06	-2.66	238.9
95	0.1038	1.13	-2.59	207.6
100	0.09045	1.19	-2.53	180.9
105	0.07900	1.25	-2.46	158.0
110	0.06915	1.31	-2.40	138.3
115	0.06066	1.37	-2.34	121.3
120	0.05332	1.43	-2.29	106.6
125	0.04696	1.49	-2.23	93.9
130	0.04143	1.54	-2.18	82.9
135	0.03662	1.60	-2.13	73.3
140	0.03243	1.65	-2.08	64.9
145	0.02877	1.70	-2.03	57.5
150	0.02556	1.75	-2.33	51.1

**NTC thermistors, accuracy line****2322 640 5....****Table 3** Resistance values at intermediate temperatures with  $R_{25}$  at 2.7 k $\Omega$ , 4.7 k $\Omega$ , 5 k $\Omega$  and 10 k $\Omega$ ; see also Table 1

$T_{oper}$ (°C)	$R_T/R_{25}$	$\Delta R$ DUE TO B-TOLERANCE (%)	TC (%/K)	$R_{25}$ (k $\Omega$ )			
				2322 640 .....; see Table 7, note 1			
				5.272	5.472	5.502	5.103
-40	33.21	2.66	6.57	89.67	156.1	166.1	332.1
-35	23.99	2.41	6.36	64.77	112.8	120.0	240.0
-30	17.52	2.17	6.15	47.31	82.35	87.60	175.2
-25	12.93	1.94	5.95	34.91	60.77	64.65	129.3
-20	9.636	1.71	5.76	26.02	45.30	48.18	96.36
-15	7.250	1.50	5.58	19.58	34.08	36.25	72.50
-10	5.505	1.29	5.40	14.66	25.87	27.52	55.05
-5	4.216	1.08	5.24	11.38	19.81	21.08	42.16
0	3.255	0.89	5.08	8.790	15.30	16.28	32.56
5	2.534	0.70	4.92	6.842	11.91	12.67	25.34
10	1.987	0.52	4.78	5.366	9.340	9.936	19.87
15	1.570	0.34	4.64	4.239	7.378	7.849	15.70
20	1.249	0.17	4.50	3.372	5.869	6.244	12.49
25	1.000	0.00	4.37	2.700	4.700	5.000	10.00
30	0.8059	0.16	4.25	2.176	3.788	4.030	8.059
35	0.6535	0.32	4.13	1.764	3.072	3.267	6.535
40	0.5330	0.47	4.02	1.439	2.505	2.665	5.330
45	0.4372	0.62	3.91	1.180	2.055	2.186	4.372
50	0.3605	0.77	3.80	0.973	1.694	1.803	3.606
55	0.2989	0.91	3.70	0.807	1.405	1.494	2.989
60	0.2490	1.05	3.60	0.672	1.170	1.245	2.490
65	0.2084	1.18	3.51	0.562	0.9797	1.042	2.084
70	0.1753	1.31	3.42	0.473	0.8239	0.8765	1.753
75	0.1481	1.44	3.33	0.399	0.6960	0.7405	1.481
80	0.1256	1.57	3.25	0.339	0.5905	0.6282	1.256
85	0.1070	1.69	3.16	0.289	0.5031	0.5352	1.070
90	0.09154	1.81	3.09	0.247	0.4303	0.4577	0.9154
95	0.07860	1.93	3.01	0.212	0.3694	0.3930	0.7860
100	0.06773	2.04	2.94	0.182	0.3183	0.3387	0.6773
105	0.05858	2.15	2.87	0.158	0.2753	0.2929	0.5858
110	0.05083	2.26	2.80	0.137	0.2389	0.2542	0.5083
115	0.04426	2.37	2.73	0.1195	0.2090	0.2213	0.4426
120	0.03866	2.47	2.67	0.1044	0.1817	0.1933	0.3866
125	0.03387	2.57	2.61	0.0915	0.1592	0.1694	0.3387
130	0.02977	2.67	2.55	0.0804	0.1399	0.1488	0.2977
135	0.02624	2.77	2.49	0.0709	0.1233	0.1312	0.2624
140	0.02319	2.86	2.43	0.0626	0.1090	0.1160	0.2319
145	0.02055	2.96	2.38	0.0555	0.0966	0.1028	0.2055
150	0.01826	3.05	2.33	0.0493	0.0858	0.0913	0.1826