



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

---

---



**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE  
UNA CELDA TERMOELÉCTRICA DE HIERRO-  
CONSTANTAN**

Tesis que para obtener el grado de:

**Licenciado en Electrónica**

Presenta:

**MARIO CÉSAR ACOSTA DURÁN**

Asesores de tesis:

**DRA. SANDRA JIMÉNEZ XOCHIMITL**

**DR. JOSÉ GUILLERMO PÉREZ LUNA**

**M.C. ENRIQUE PÉREZ MAYESFFER AZCÁRRAGA**

## Resumen

La necesidad de nuevas tecnologías en la energía eléctrica, es resultado del gran desarrollo tecnológico, que ha requerido el uso de grandes cantidades de energía y en particular de energía eléctrica, generada mediante métodos que reduzcan o eliminen la contaminación al medio ambiente, esto hace que la ingeniería y la ciencia se dediquen a investigar y experimentar en las áreas de conversión directa de energía; dentro de estas técnicas está la conversión termoeléctrica. Esta técnica emplea el efecto Seebeck para transformar el calor, en potencia eléctrica. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de la construcción y caracterización de una celda termoeléctrica (CT) constituida de 128 pares termoeléctricos fabricados con metales de hierro y constantan; los cuales se conocen como termopar tipo J. La estructura empleada para la celda es de tipo metálico (placas de aluminio anodizado); comercialmente las celdas utilizan una estructura de tipo cerámico. Estas placas tiene el propósito de mejorar la conductividad térmica de los elementos de captura y disipación de calor, debido a que son metálicas y anodizadas. Esto permite que los elementos estén conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. La caracterización térmica y eléctrica realizada a la CT fue hecha en laboratorio, aplicándoles diferentes gradientes de temperatura. El resultado de esta caracterización nos permite observar que la celda fabricada genera energía eléctrica.

# AGRADECIMIENTOS

Primero que nada a dios por todo lo que me ha dado, por ponerme a todas las personas que me han apoyado en mis estudios y en mi vida.

A mis padres Ignacio y Concepción por formarme con valores para salir adelante contra todas las dificultades que pueda encontrar por todo el amor y apoyo que me han brindado.

A mis hermanos Luis Antonio y José Ignacio por su gran apoyo incondicional y comprensión.

A mis abuelos y tíos por formarme y educarme.

A la Dra. Lourdes Sandoval Solís por su apoyo en mi formación académica.

Al Dr. José Guillermo Pérez Luna a la Dra. Sandra Jiménez Xochimilt y al M.C Enrique Pérez Mayesffer Azcárraga por aceptarme y apoyarme en mi tesis.

A todas las personas que han estado conmigo en vida.

# Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad
$A$	Área	$m^2$
$E$	Campo eléctrico	$N/C$
$F$	Fuerza	$N$
$I$	Corriente eléctrica	$A$
$I_{sc}$	Corriente de corto circuito	$A$
$J$	Densidad de corriente	$A \cdot m^2$
$K$	Kelvin	$K$
$mV$	mili volts	$V$
$\rho$	Resistividad	$(\Omega \cdot m)$
$q_A$	Flujo de calor transportada en el material A	$W/m^2$
$q_B$	Flujo de calor transportada en el material B	$W/m^2$
$q$	Velocidad de transferencia	$m/s$
$q''$	Flujo de calor	$W/m^2$
$Q$	Cantidad de calor	$J$
$R$	Resistencia	$\Omega$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$T_C$	Temperatura del sumidero	$^{\circ}C$
$T_H$	Temperatura del calefactor	$^{\circ}C$
$\Delta T$	Diferencia de temperatura	$^{\circ}C, K$
$\Delta T/\Delta x$	Gradiente de temperatura	$^{\circ}C, K$
$V$	Voltaje eléctrico	$V$
$V_{oc}$	Voltaje de circuito abierto	$V$
$\Delta V$	Diferencia de voltaje	$V$
$k$	Conductividad térmica	$W/(K \cdot m)$
$\Delta x$	Distancia	$m$

## Griegos

$\alpha$	Coefficiente de Seebeck	$\mu V/K$
$\lambda$	Conductividad térmica	$W/(K \cdot m)$
$\rho$	Resistividad	$\Omega$
$\mu$	Micro	

## Lista de figuras

Figura	Pie de figura	Página
1.1	a) Mapa de radiación mundial b) Mapa de radiación del continente americano.	7
2.1	Efectos termoeléctricos presentes en procesos de conversión de energía	10
2.2	Transferencia de calor.	12
2.3	Variación de conductividad térmica	17
2.4	Eficiencia térmica de un generador termoeléctrico como una función de la temperatura de la fuente y de la figura de mérito. El sumidero de temperatura se considera que está a una temperatura de 300 K.	18
2.5	Figura de mérito del termopar tipo J	24
2.6	Grafica de voltaje a circuito abierto del termopar J sometido a gradiente de temperatura	25
2.7	Grafica de corriente en corto circuito del termopar J sometido a gradiente de temperatura	26
2.8	Grafica de potencia máxima del termopar J sometido a gradiente de temperatura	26
2.9	Máxima transferencia de potencia	27
3.1	Estructura de la CT.	28
3.2	Unión hierro-constantan.	29
3.3	Plantilla de aluminio con los metales.	30
3.4	Metales a) Metales cortados sin pulir vista en microscopio b) Metales después de lijado c) Metales en la placa de aluminio en proceso de lijado	30
3.5	Lavado de metales.	31
3.6	Metales en plantilla de teflón con estaño.	31
3.7	a) Placa de aluminio anodizado b) Placa con contactos de cobre y soldadura	32
3.8	Horneado.	33
3.9	Termopares y placa después de horneado	34
3.10	Circuito cerrado de la celda termoeléctrica	35
3.11	Inyección de silicón de la celda termoeléctrica	35
3.12	Celda termoeléctrica ensamblada	36

4.1	Esquema del sistema utilizado para medir la conductividad térmica de la CT.	37
4.2	Sistema para medir la conductividad térmica de la CT. Equipo de caracterización eléctrica.	39 40
4.3		
4.4	4.4 Ensamble del sistema de calentamiento para la CT a) Base de madera b) Placa de teflón c) Calefactor y termopar d) Resistencia y barra de cobre.	41
4.5	Equipo montado para la caracterización eléctrica de la CT a) Pasta utilizada para asegurar el contacto térmico a la CT b) CT colocada sobre el calefactor c) Sumidero d) Ensamble completo.	42
4.6	Sistema completo para efectuar la caracterización de la CT.	43
4.7	Curva característica I-V de la CT para $\Delta T = 15^{\circ}C, \Delta I = 0, \Delta V = 0, R_i = 4\Omega$	43
4.8	Diagrama a bloques del MTC	44
4.9	Circuito modulador de amplitud y control de offset.	45
4.10	Amplificador de corriente	45
4.11	Amplificador diferencial con ganancia unitaria.	46
4.12	Diagrama completo del circuito MTC utilizado para caracterizar la CT.	46
4.13	Fuente de alimentación del MTC	47
4.14	Implementación del MTC en una placa de circuito impreso.	47
5.1	Desplazamiento de curva I-V obtenida para un	48
5.2	Resultados obtenidos durante la caracterización de la CT procesados en OriginPro 8.	49
5.3	Familia de curvas I-V de la CT para diferentes gradientes de temperatura	50
5.4	Grafica de corriente de circuito cerrado (Isc) vs gradiente de temperatura $\Delta T$ de la CT.	51
5.5	Grafica de voltaje de circuito abierto vs gradiente de temperatura $\Delta T$ de la CT.	51
5.6	Grafica de resistencia interna ( $\Omega$ ) vs gradiente de temperatura $\Delta T$ de la CT.	52
5.7	Familia de curvas paramétricas P-V de la CT para diferentes gradientes de temperatura.	53
5.8	Gráfica de eficiencia térmica de la CT	53
A.1	Esquema de una barra transportando una corriente eléctrica en presencia de un gradiente de temperatura.	58
E.1	Máquina cortadora alambres	75
E.2	Maquina cortadora de alambres, planos	76

## Lista de tablas

Tabla	Designación	Página
2-1	Dimensiones y unidades de calor y temperatura.	13
2-2	Calor específico	14
2-3	Conductividad térmica de algunos materiales.	16
2-4	Resistividades.	21
2-5	Conductividad eléctrica.	22
2-6	Coefficiente de Seebeck de termopar J, resistividad y conductividad térmica de materiales de termopar J a diferentes temperaturas.	23
2-7	Cálculos para figura de mérito termopar	23
2-8	Resistividad medida para cada uno de los materiales que constituyen el termopar J.	25
2-9	Resistencia teórica y experimental obtenida para el termopar J con longitud de 10cm.	25
2-9	Voltaje generado por un termopar y la CT	27
2-10	Valores de potencia máxima, corriente y voltaje para una CT	27
4-1	Temperatura inicial y final medida en las interfaces del sistema de caracterización	38
5-1	Valores obtenidos de la corriente, voltaje y potencia generada por una CT de 128 pares termoeléctricos	50

# ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Agradecimientos	ii
Nomenclatura	iii
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	vii
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>Introducción</b>	3
1.1 Termoelectricidad	4
1.2 Antecedentes	4
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	9
1.5 Estructura de la tesis	9
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>Principios de una celda termoeléctrica</b>	10
2.1 Termodinámica	11
2.2 Transferencia de calor	11
2.3 Conducción de calor	14
2.4 Conductividad térmica	15
2.5 Figura de mérito	18
2.6 Corriente eléctrica	19
2.7 Resistividad	20
2.8 Conductividad eléctrica	21
2.9 Termopar tipo J	22
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>Construcción de la CT</b>	28
3.1 Estructura de la celda termoeléctrica	28
3.2 Metales	29
3.3 Horneado	32
3.4 Ensamble de la Celda Termoeléctrica	33

## **CAPÍTULO 4**

<b>Sistemas de caracterización térmica y eléctrica</b>	<b>37</b>
4.1 Sistema de caracterización térmica	37
4.2 Sistema de caracterización eléctrica	40
4.3 Modulo trazador de curvas	44

## **CAPÍTULO 5**

<b>Pruebas experimentales</b>	<b>48</b>
5.1 Resultados	49
Conclusiones	54
Referencias	55
<b>Apéndices</b>	
Apéndice A Análisis de un generador termoeléctrico	58
Apéndice B Planos de los elementos para fabricación de la celda termoeléctrica	63
Apéndice C Planos del sistema para soldar los pares termoeléctricos de la CT.	68
Apéndice D Planos del sistema de caracterización eléctrica	72
Apéndice E Máquina cortadora de alambre	75

# Capítulo 1

## Introducción

Hoy en día la generación de energía eléctrica es una de las principales tareas para el desarrollo y el bienestar social, la energía eléctrica juega un papel muy importante en la vida del ser humano, es por eso que el uso de energías alternativas limpias y renovables, que no contaminen al medio ambiente como son: la energía solar, hidroeléctrica, eólica, geotérmica y nuclear por mencionar algunas son de amplio estudio para su explotación y aplicación [1].

En los últimos 20 años se ha duplicado la energía consumida, este cambio es debido a la evolución de los países en desarrollo. Los estudios realizados indican que la necesidad de energía eléctrica continuará aumentando a un ritmo similar.

El cambio climático, se atribuye al aumento de la temperatura del planeta (calentamiento global), debido al incremento de la concentración de los gases cuyo espectro de absorción está en la gama del infrarrojo, conocidos comúnmente como gases invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ , CFC, HFC), provenientes de los combustibles fósiles como son: el petróleo, el gas natural y el carbón. El clima determina las condiciones de vida y por consiguiente, el ecosistema en el que vivimos. Los propios efectos del cambio climático contribuyen a forzar el efecto invernadero natural y acentúan el calentamiento global [2].

La generación de energía eléctrica es parte importante en esta tesis, y aún más, el poder generarla a partir de energía que se pierde en forma de calor en muchos otros sistemas (motores, hornos, etc.) o incluso, aprovechar la porción infrarroja del espectro solar. La eficiencia energética en los procesos de transformación de la energía térmica en energía eléctrica, es un tema, que ha cobrado especial importancia en estos últimos años. Hoy en día se estudian con sumo interés los aspectos relacionados a materiales termoeléctricos, los cuales son capaces de convertir el calor en electricidad (efecto Seebeck) y viceversa (efecto Peltier), es decir convertir energía eléctrica en la producción de frío [3].

Analizando los pros y los contras, se piensa que la termoelectricidad y más concretamente la ingeniería termoeléctrica se desarrollará cada vez más a medida que vayan surgiendo nuevos materiales, nuevos diseños y nuevas posibilidades de aplicación. Teniendo en cuenta que los semiconductores y metales se mejoran día a día, el futuro para la termoelectricidad es muy prometedor y las expectativas de aplicación comercial son muy buenas aunque el camino por recorrer sea aún muy extenso.

## 1.1 Termoelectricidad

La termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad, es la disciplina que estudia la interrelación entre los fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad de forma conjunta. En este estudio, la electrónica y la termodinámica juegan un papel importante. El efecto termoeléctrico consiste en la generación directa de una fuerza electromotriz (f.e.m.) por medios térmicos, manteniendo una diferencia de temperatura entre los extremos opuestos de un material.

Una celda termoeléctrica empleada como generador termoeléctrico, en esencia, es un dispositivo térmico de estado sólido. Este tipo de módulo no tiene partes móviles, es silencioso, versátil y altamente confiable. Las celdas termoeléctricas hacen que la termoelectricidad este hoy presente en aplicaciones tecnológicas modernas relacionadas con la generación de potencia y la refrigeración de estado sólido [4].

Las investigaciones se han enfocado a materiales semiconductores; dejando a los metales la fabricación de termopares y la medición de temperatura. La unión de metales (termopares) presenta entre sus terminales voltajes pequeños; sin embargo, se ha puesto poca atención a las corrientes que estos pueden generar. Tomando en consideración los estudios realizados a diferentes termopares comerciales presentados en el trabajo de Pérez et al [5] y en el trabajo de tesis de Yllescas [6] se plantea construir una celda termoeléctrica de hierro-constantan (termopar tipo J) formando una estructura de tipo comercial, térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie, caracterizarla en laboratorio y obtener resultados.

El Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores (CIDS), proporciona evidencia de que se ha estado incursionando en la investigación básica de estas tecnologías en México y en particular en la BUAP.

## 1.2 Antecedentes

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor.

El efecto termoeléctrico fue descubierto por Tomas Johann Seebeck (1821). Quien mostró que se produce una fuerza electromotriz por el calentamiento de la unión de dos conductores eléctricos hechos de materiales conductores diferentes. Una de las aplicaciones del efecto Seebeck es la creación de fuentes de corriente eléctrica en las cuales la energía térmica se convierte en energía eléctrica. Posteriormente en 1834 en

la revista francesa Anales de física y química apareció un artículo de Jean Peltier sobre las temperaturas anormales observadas en la unión de dos conductores distintos cuando pasa por ella una corriente eléctrica. La esencia de este efecto, que lleva el nombre de Peltier y que básicamente es el efecto contrario al efecto Seebeck, se presenta cuando una corriente pasa a través de la unión de dos tipos diferentes de conductores, lo cual produce una diferencia de temperatura en sus extremos. En ese entonces los fenómenos termoeléctricos no llamaron la atención de los físicos [6].

Al parecer no fue inmediatamente reportado que los fenómenos Seebeck y Peltier estaban estrechamente relacionados entre sí. Sin embargo en 1855, esta relación fue reconocida por William Thomson, mejor conocido como Lord Kelvin. Al aplicar la teoría de la termodinámica al problema, pudo establecer la relación entre los coeficientes descritos por el efecto Seebeck y Peltier. Su teoría también mostró que había otro tercer efecto termoeléctrico, el cual se presenta en un conductor homogéneo. Este efecto, conocido como efecto Thomson, consiste en un calentamiento o enfriamiento reversible, donde hay flujo de corriente eléctrica y gradiente de temperatura.

En 1825 George Simon Ohm estaba trabajando en la relación entre corriente y tensión conectando alambres de diferente resistencia a través de una pila, lo cual se aproximaba bastante a un cortocircuito; después de un rápido aumento inicial de la corriente de polarización de la pila, el voltaje disminuía constantemente, complicándose de esta manera las mediciones. Ohm tomó el consejo de un colega y reemplazó la pila por una termopila, y la vida se hizo más simple. Este evento es curioso ya que esto ocurrió sólo cuatro años después del descubrimiento del efecto Seebeck [7].

Por iniciativa de A.F. Ioffe [8], Yu. P. Maslovets inició el estudio de la termoelectricidad en semiconductores y en 1940 emitió un comunicado sobre un termoelemento con coeficiente de eficiencia térmica de aproximadamente el 3%, cuyos elementos estaban hechos de sulfato de plomo, en donde además, uno de los elementos tenía restos de azufre y el otro de plomo. Ambos crearon la primera batería industrial cuya fuente de energía era una lámpara de petróleo.

En 1955 Telkes redactó un informe sobre los materiales utilizables en generadores termoeléctricos. En 1961 en el congreso de Nuevas Fuentes de Energía, llevado a cabo en Roma, Baum enumeró algunos de los compuestos químicos que han sido empleados en los generadores termoeléctricos; entre ellos se mencionan los telururos de antimonio, bismuto, germanio, plomo y algunos selenuros. Además recomienda utilizar colectores solares focales para los generadores termoeléctricos; para concentraciones de 200 a 300 se sugiere el uso de colectores parabólicos y para concentraciones de 10 a 30 colectores parabólico-cilíndricos.

En 1928 la compañía inglesa Attaix, fabrico un generador que funcionaba a base de gas llamado Thermattaix, el cual era un dispositivo con bancos de termopares que producían cerca de un Amper. La corriente generada era suficiente como para operar un equipo radiotransmisor. A finales de 1930 Milnes realizo algunas mejoras llevando a cabo su versión de generador termoeléctrico colocado dentro de un mueble que también tenía empotrado un radiotransmisor. Este podía ser conectado al suministro de gas doméstico, de tal manera que, al encender el radio automáticamente se encendía el quemador de gas. Las mejoras en las baterías y las fuentes de energía hicieron que este sistema no se pusiera en marcha [9].

La baja eficiencia relativa de conversión de calor a electricidad (típicamente alrededor del 5%) de un generador termoeléctrico restringió su uso en el pasado a aplicaciones únicamente especializadas. En los años 50's y 60's la principal área de aplicación fue la exploración espacial, ya que se usaban Generadores Termoeléctricos de Radioisótopos (RTG), los cuales proveen de energía eléctrica a naves espaciales, tales como el Voyager, Galileo y Ulises. La fuente de energía térmica para el RTG es el calor generado durante la desintegración progresiva de isótopos radioactivos de plutonio [10].

En el Centro de Investigaciones de Dispositivos Semiconductores ya se han realizado trabajos relacionados con la fabricación de generadores termoeléctricos utilizando termopares; particularmente, Villaverde [11] en su trabajo de tesis observó las propiedades de la unión cromel-alumel. En este trabajo se utilizó el calor que se desecha en el colector de un generador termoiónico, el cual fue sometido a concentración solar. También en el trabajo de tesis de Yllescas [6], se evaluó el desempeño de un generador termoeléctrico fabricado con termopares de hierro-constantan, sometido a concentración solar. En este trabajo, a pesar de haber obtenido baja eficiencia de conversión, se puede prever que un generador termoeléctrico con pares fabricados con materiales semiconductores puede mejorar la eficiencia de conversión.

La comunidad científica intenta mejorar la eficiencia de los generadores termoeléctricos mediante la búsqueda de nuevos materiales, o nuevas aleaciones. El presente trabajo se enfoca en un nuevo tipo de estructura que proporcione ventajas a la CT desarrollada con metales en particular la unión hierro-constantan (tipo j); así como a la aplicación específica para concentración solar y calor residual.

### 1.3 Justificación

Conviene obtener la generación de electricidad, a partir de fuentes naturales inagotables, tal es el caso de la energía solar. El desarrollo sostenible es un concepto que plantea un crecimiento económico y social respetuoso con el medio ambiente. El desarrollo sostenible se ha convertido en interés prioritario a nivel mundial y ha derivado en el establecimiento de iniciativas e instituciones [12]. Junto a lo anterior se debe agregar que, a diferencia de otros países, tenemos casi un 81.24% de capacidad instalada sólo en Termoeléctricas, Hidroeléctrica el 12.84%, Carbo eléctrica el 5.10%, Núcleo eléctrica el 3.58%, Geotérmica el 2.30% y Eolo eléctrica 0.04 % [13]; hasta la fecha la inclusión de las energías renovables es escasa.

Por otra parte y en relación al uso de la energía solar, México tiene un nivel de insolación privilegiado respecto a otros países. En México la radiación solar promedio es de 5 KWh/m<sup>2</sup>, esto lo ubica entre los cinco países con mayor potencial para la explotación de esta fuente de energía [14]. Sin embargo, su aprovechamiento es casi nulo, las viviendas en el territorio nacional reciben la suficiente energía solar para producir hasta 200 veces la cantidad que consumen; por tal motivo, la energía solar en México debe de ser explotada con tecnologías limpias, económicas y duraderas.

México está en la región del llamado “Cinturón solar” o “Sunbelt” como África, Oriente Medio, Sureste Asiático, y Sur América en donde se está empezando a desarrollar esta tecnología. El “Cinturón solar” se sitúa entre las latitudes  $\pm 35^\circ$  respecto al ecuador y alberga aproximadamente al 75% de la población mundial y el 40% de la demanda mundial de electricidad [15] ver fig. 1.1.

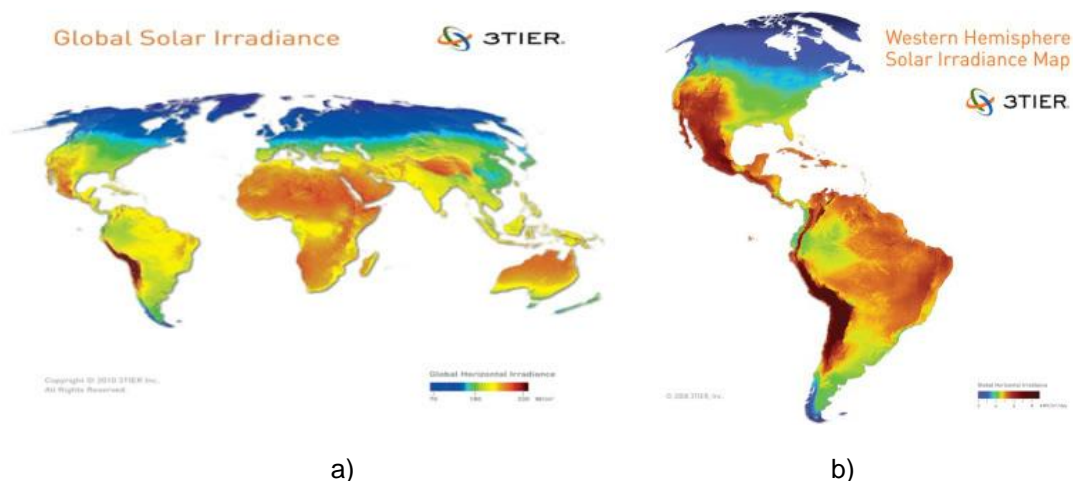


Figura 1.1. a) Mapa de radiación mundial b) Mapa de radiación del continente americano.

El calor residual es el calor contenido en los productos y subproductos de un proceso, que eleva su temperatura a niveles mayores a los adecuados para su emisión o almacenaje. Este calor puede ser aprovechado:

- Recoger y distribuir el calor para reutilizarlo en el mismo equipo o en otros.
- Disminuir la temperatura de emisión de fluidos de manera que se reduzca la contaminación térmica de una planta industrial.

Los dispositivos termoeléctricos pueden aprovechar el calor residual que se presenta en los efluentes de los procesos industriales; lo cual supone una importante pérdida de energía térmica en la industria. El aprovechamiento de este calor aumenta significativamente la eficiencia energética de los equipos y la eficiencia global de la planta.

Cuanto mayor sea la temperatura de la fuente de calor residual, mayor será la capacidad de aprovechamiento de este calor.

En general, en la industria, muchos equipos son susceptibles de ser mejorados con medidas de recuperación de calor residual [9], tales como:

- Hornos eléctricos y de gas.
- Calderas de todo tipo (gas, gasóleo, biomasa, etc.).
- Secaderos.
- Evaporadores.
- Compresores.
- Sistemas de refrigeración.
- Turbinas.
- Motores.
- Instalaciones de cogeneración.

El costo de las celdas termoeléctricas aún es elevado, por tal motivo existe el interés actual en incursionar no sólo en la fabricación de dichas celdas, sino en la parte de investigación que se pueda generar en el área de Conversión Directa de Energía(CDE) como la realizada a un generador fotovoltaico-termoeléctrico [16], Hoy en día no se tiene conocimiento de que en México se esté trabajando en esta línea de investigación, lo cual establece de la necesidad de desarrollar un paquete tecnológico para la fabricación de este tipo de celdas.

Todo esto justifica la tarea de generar tecnología relacionada con los sistemas termoeléctricos. En particular, el presente trabajo está enfocado al diseño de una estructura similar a una CT de tipo comercial, cuyas placas serán fabricadas con lámina

de aluminio anodizado; esto con la finalidad de mejorar la transferencia de calor hacia los elementos termopares.

## 1.4 Objetivos

### Objetivo General

Diseñar, construir y caracterizar una celda termoeléctrica de Hierro-Constantan.

### Objetivos Particulares

1. Construir una celda termoeléctrica (CT), de tipo comercial, con uniones de hierro constantan y placa de aluminio anodizado.
2. Desarrollar un horno para el ensamble de la CT.
3. Desarrollar un módulo trazado de curvas, que permita obtener las curvas I-V de la CT.
4. Desarrollar el equipo para la caracterización térmica.
5. Caracterizar térmica y eléctricamente la celda termoeléctrica (obtener curvas I-V para diferentes gradientes de temperatura).

## 1.5 Estructura de la tesis

En esta tesis se continúa con el desarrollo de tecnología y aplicación de la termoelectricidad, buscando la generación de energía limpia.

Este trabajo consta de 5 capítulos, el capítulo 1 tiene una breve descripción, de los antecedentes, la justificación, los objetivos y la estructura de la tesis.

El capítulo 2 presenta, los principios teóricos de una celda termoeléctrica, el desarrollo teórico de conductividad eléctrica y térmica y, el estudio a un termopar tipo J.

En el capítulo 3 se describe la construcción de la celda termoeléctrica de 128 termopares.

En el capítulo 4 se presenta los sistemas de caracterización térmica y eléctrica.

En el capítulo 5 se muestran resultados de pruebas experimentales y conclusiones.

# Capítulo 2

## Principios de una celda termoeléctrica

El efecto termoeléctrico puede describirse de la siguiente manera:

Si tomamos un conductor y calentamos un extremo, los electrones del extremo caliente adquirirán una energía cada vez mayor con respecto al extremo frío y, se difundirán del extremo caliente al frío donde su energía será menor. En esencia ésta es la forma en que se produce la transferencia de calor en los metales y va acompañada de una acumulación de carga negativa en el extremo frío, creándose por tanto un campo eléctrico o una diferencia de potencial entre los extremos del material. Este campo eléctrico se desarrollará hasta que se establezca un estado de equilibrio dinámico entre los electrones obligados a moverse por el gradiente de temperatura y la repulsión debida al exceso de carga en el extremo frío. En ese momento el número de electrones por segundo que pasan en ambas direcciones a través de una sección perpendicular al flujo será igual, con lo cual se establece el estado estacionario, pero las velocidades de los electrones procedentes del extremo caliente serán más altas que las velocidades de los electrones que cruzan a través de la sección desde el extremo frío. Esta diferencia es la que asegura una transferencia continua de calor (conducción térmica) a lo largo del gradiente de temperatura sin una transferencia de carga neta una vez que se ha establecido el equilibrio dinámico. Este fenómeno es considerado como un fenómeno termoeléctrico básico.

Existen en la naturaleza tres tipos de fenómenos termoeléctricos, como ya fue mencionado previamente: el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson (ver figura. 2.1), de los cuales los dos primeros son hasta ahora, los de mayor aplicación.

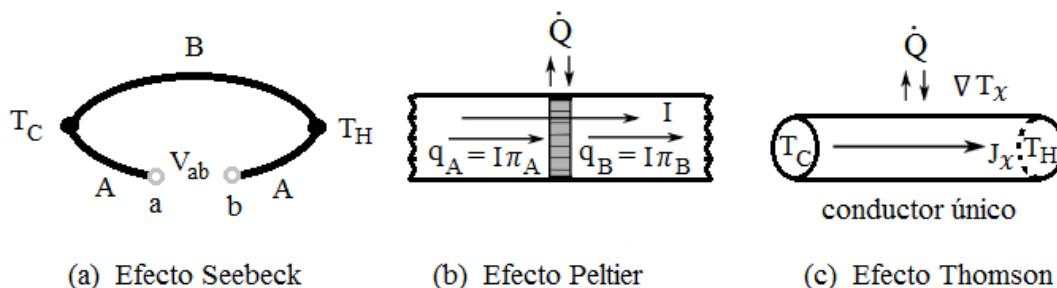


Figura 2.1. Efectos termoeléctricos presentes en los procesos de conversión de energía

La celda termoeléctrica al igual que cualquier máquina térmica obedece las leyes de la termodinámica. Si primero consideramos que la CT opera idealmente, es decir, no hay pérdidas de calor, la eficiencia es definida como la razón de la potencia eléctrica liberada a la carga con respecto al calor absorbido en la unión caliente. Este tipo de dispositivos está conformado por varias uniones elementales, donde una sola produce bajos niveles de potencia eléctrica, de tal manera que para obtener potencias de utilidad práctica, es necesario conectar un cierto número de estas uniones, para así formar un módulo. De esta forma la generación de corriente de un módulo termoeléctrico depende de la capacidad de generación de sus elementos y el voltaje depende del número de los elementos que lo componen.

## 2.1 Termodinámica

La termodinámica trata de los estados de equilibrio y de los cambios térmicos desde un estado de equilibrio hacia otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que falta el equilibrio térmico y, por lo tanto, existe un fenómeno de no equilibrio. El estudio de transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica. Sin embargo, las leyes de la termodinámica establecen la estructura para la ciencia de la transferencia de calor; a continuación se describen estas leyes [17]:

**Ley cero:** A esta ley se le llama de equilibrio térmico. El equilibrio térmico debe entenderse como el estado en el cual los sistemas tienen la misma temperatura.

**Primera ley:** Conocida como principio de conservación de energía, la energía no puede ser creada ni destruida, sólo puede transformarse de un tipo de energía en otro.

**Segunda ley:** Solamente se puede realizar un trabajo mediante el paso del calor de un cuerpo con mayor temperatura a uno que tiene menor temperatura.

**Tercera ley:** El cero absoluto no puede alcanzarse por ningún procedimiento que conste de un número finito de pasos. Es posible acercarse indefinidamente al cero absoluto, pero nunca se puede llegar a él.

## 2.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor, también conocida como transferencia de energía térmica o intercambio de calor, es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico como se muestra en la Figura. 2.2.

El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura. No puede haber transferencia de calor entre dos medios que están a la misma temperatura. La diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor y la velocidad de la transferencia de calor en cierta dirección

depende de la magnitud del gradiente de temperatura, esto es la diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en esa dirección. A mayor gradiente de temperatura, mayor es la razón de la transferencia de calor [17].

La diferencia de temperatura por unidad de longitud se define como.

$$\Delta T = \frac{T_c - T_f}{L} \quad 2.1$$

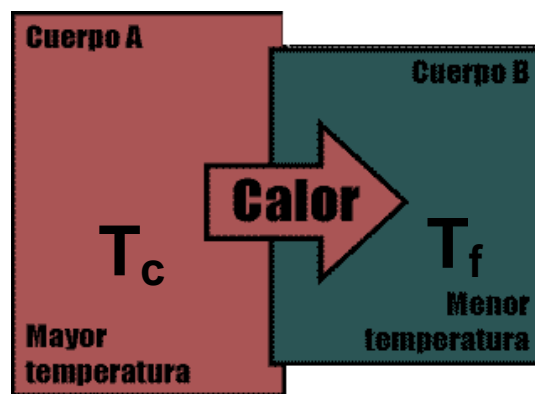


Figura 2.2. Transferencia de calor.

En la transferencia de calor al igual que en otras ramas de la ingeniería, la solución exitosa de un problema requiere que se hagan suposiciones e idealizaciones. En un aparato o en un proceso puede estudiarse la transferencia de calor en forma experimental, realizando pruebas y tomas de mediciones; o en forma analítica, mediante el análisis o la elaboración de cálculos. El procedimiento experimental tiene la ventaja de que se trabaja con el sistema físico real y, la cantidad deseada se determina por medición, dentro de los límites del error experimental.

En las obras sobre transferencia de calor se reconocen por lo general tres modos distintos de transferencia de calor: por conducción, por radiación y por convección. Hablando de manera estricta, sólo la conducción y, la radiación corresponden a procesos de transferencia de calor, debido a que sólo estos dos mecanismos dependen de la operación de la simple existencia de una diferencia de temperatura. A continuación se muestra la siguiente tabla con las dimensiones, unidades de calor y temperatura de acuerdo al Sistema Internacional de unidades [17].

Tabla 2-1 Dimensiones y unidades de calor y temperatura

Cantidad	Unidades SI
$Q$ , Cantidad de calor	$J$ , Joule
$q$ , Velocidad de transferencia	$J/s$ o $W$
$q''$ , Flujo de calor	$W/m^2$
$T$ , Temperatura	$K$ , $^{\circ}C$

La transferencia de calor tiene dirección y magnitud. La razón de la transferencia de calor por conducción en una dirección específica es proporcional al gradiente de temperatura, el cual es la razón de cambio de la temperatura con respecto a la distancia, en esa dirección [18].

Un aspecto del calor que conviene resaltar es que los cuerpos no almacenan calor sino energía interna. El calor es por tanto la transferencia de parte de dicha energía interna de un sistema a otro, con la condición de que ambos se encuentren a diferente temperatura.

La expresión que relaciona la cantidad de calor que intercambia una masa  $m$  de un cierto elemento con la variación de temperatura  $\Delta T$  que experimenta se define como.

$$Q = mc\Delta T \quad 2.2$$

Donde  $c$  es el calor específico del elemento. El calor específico o también llamada capacidad calorífica específica es la energía necesaria para elevar en  $1^{\circ}C$  la temperatura en 1Kg de masa. En general el calor específico depende de la temperatura sin embargo, como esta dependencia no es muy grande, suele tratarse como una constante. A continuación se muestra la tabla con el calor específico de algunos de los materiales más conocidos.

Tabla 2-2 Calor específico

Material	Calor específico $J/(kg \cdot K)$
Agua	4.186
Aluminio	0.897
Hierro	0.450
Cobre	0.385
Constantan	0.41

## 2.3 Conducción de calor

La conducción de calor es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia. En el nivel atómico, los átomos de las regiones más calientes tienen más energía cinética, en promedio, que los átomos de las regiones frías, así que empujan a los átomos fríos dándoles algo de su energía a través del material, los átomos no se mueven de una región a otra, pero su energía sí.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que este hecho, así como la diferencia de temperatura a través de él [17].

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de vibraciones de las moléculas en una retícula y el transporte de energía por parte de los electrones libres.

La mayor parte de los metales usa otro mecanismo más eficaz para conducir el calor. Dentro del metal, algunos electrones pueden abandonar sus átomos originales y vagar por la red cristalina. Estos electrones libres pueden llevar energía rápidamente de las regiones más calientes del metal a las más frías, y es por ello que los metales generalmente son buenos para conducir el calor. La presencia de electrones libres también hace que los metales en general sean buenos conductores eléctricos [19].

Siempre que exista un gradiente de temperatura en un medio sólido, la velocidad a la que el calor se transfiere por conducción,  $q$ , es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$  por el área  $A$ , a través de la que se transfiere el calor; es decir,

$$\text{velocidad de transferencia de calor} = \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Distancia}}$$

O bien

$$q = kA \frac{T_c - T_f}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad 2.3$$

Donde la constante  $k$  es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, en el caso límite cuando  $\Delta x \rightarrow 0$ , la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad 2.4$$

El signo de menos es consecuencia de la segunda ley de termodinámica, que requiere que el flujo de calor debe fluir en dirección de una temperatura mayor a una menor. La ecuación 2.3 define la conductividad térmica y se denomina la ley de la conducción de Fourier [18].

## 2.4 Conductividad térmica

La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica y se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura.

La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor, un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor; en la tabla 2-3 se muestran las conductividades térmicas de algunos materiales y entre ellos los usados en este trabajo.

Tabla 2-3 Conductividad térmicas de algunos materiales

Material	Conductividad térmica $W/(K \cdot m)$
Diamante	2300
Plata	429
<u>Cobre</u>	<u>385</u>
Oro	<u>317</u>
<u>Aluminio</u>	<u>237</u>
<u>Hierro</u>	<u>80.2</u>
<u>Constantan</u>	<u>23</u>
<u>Estaño</u>	<u>64</u>

Como podemos observar los metales puros tienen altas conductividades térmicas. El constantan no tiene alta conductividad térmica debido a que no es un metal puro sino una aleación de dos metales. La conductividad térmica de una aleación de metales suele ser mucho más baja que la de cualquiera de ellos, el ejemplo claro es el constantan que contiene un 55% de cobre y un 45% de níquel dado que por separado el cobre tiene  $401 W/(K \cdot m)$  y el níquel tiene  $91 W/(K \cdot m)$  de conductividad térmica.

En la Figura 2.3 se muestra la variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura [17].

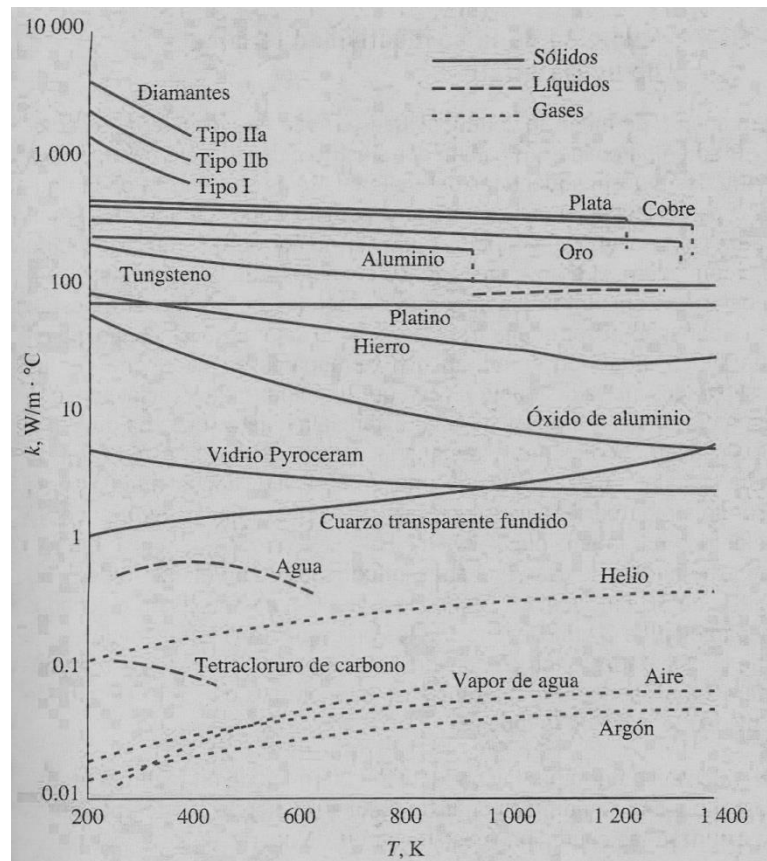


Figura 2.3. Variación de conductividad térmica

A diferencia de los metales, los cuales son buenos conductores de electricidad y calor, los sólidos cristalinos como el diamante y los semiconductores como el silicio, son buenos conductores de calor pero malos conductores eléctricos, es por eso que dichos materiales encuentran un amplio uso en la industria de la electrónica.

De acuerdo con la ley de Fourier, ecuación 2.5, la conductividad térmica se define como:

$$k = \frac{q/A}{|dT/dx|} \quad 2.5$$

## 2.5 Figura de mérito

La eficiencia de los materiales termoeléctricos para generar energía eléctrica, de acuerdo en el apéndice A, ecuación A.8 de un generador formado por una sola unión, estará dada por:

$$\eta_t = \frac{\text{Potencia eléctrica de salida}}{\text{Potencia térmica de entrada de la unión caliente}} \quad 2.6$$

El rendimiento térmico del generador termoeléctrico bajo esta condición, es una función de  $ZT_{AV}$  y  $T_C/T_H$ . La figura. 2.4 refuerza esta aseveración [21].

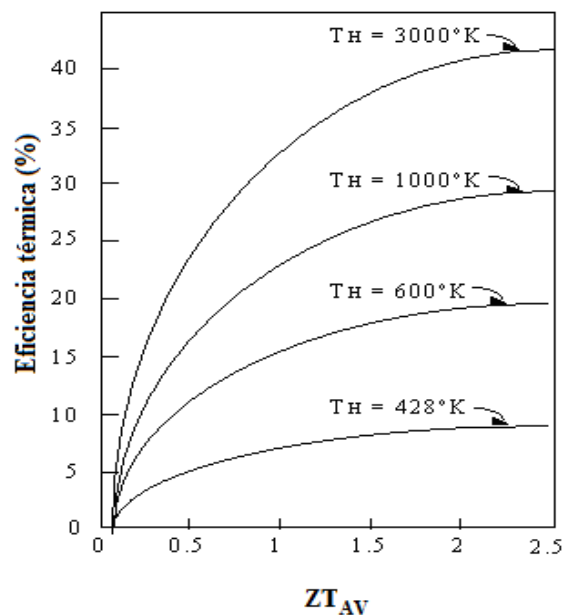


Figura 2.4. Eficiencia térmica de un generador termoeléctrico como una función de la temperatura de la fuente y de la figura de mérito. El sumidero de temperatura se considera que está a una temperatura de 300 K.

Entonces la eficiencia de los materiales termoeléctricos está determinada por la figura de mérito termoeléctrica  $ZT$ , donde  $T$  es la temperatura absoluta y  $Z$  es un parámetro proporcional a la conductividad eléctrica y al cuadrado del coeficiente Seebeck, e inversamente proporcional a la conductividad térmica. Cuando  $ZT$  incrementa, la eficiencia de la generación de energía finalmente se aproxima al límite de Carnot, es decir, el máximo permitido por las leyes de la termodinámica.

Históricamente, el valor  $ZT$  de los mejores materiales termoeléctricos han permanecido por debajo de 1.0 debido a la dificultad para incrementar la conductividad eléctrica o el coeficiente Seebeck, sin incrementar la conductividad térmica. Sin embargo, Los valores de  $ZT$  próximos a 3.0 han sido reportados para materiales nanoestructurados, tal logro reduce dimensionalmente la conductividad térmica de la red cristalina en estas estructuras. Se requieren valores de  $ZT$  de 3.0 o mayores para la generación de energía competitiva.

La figura de mérito tiene como unidades  $K^{-1}$ , sin embargo es común expresarla como un parámetro adimensional de la siguiente manera:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{k} \quad 2.7$$

Dónde:  $\sigma$  es la conductividad eléctrica ( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ),  $k$  es la conductividad térmica ( $W/K \cdot m$ ), y  $\alpha$  es el coeficiente Seebeck en ( $\mu V/K$ ).

La obtención de materiales con altos valores para la magnitud de  $Z$  se logra a través de la reducción de su conductividad eléctrica, a fin de disminuir las pérdidas por efecto Joule; bajos valores para su conductividad térmica, con lo cual se mantiene la diferencia de temperatura en las uniones, y altos valores para el coeficiente de Seebeck, a fin de incrementar la conversión energética.

## 2.6 Corriente eléctrica

Una corriente eléctrica es todo movimiento de carga de una región a otra, es el flujo de electrones a través de un material por unidad de tiempo. En un metal ordinario como el cobre y el aluminio por dar ejemplos, algunos de los electrones tienen libertad de trasladarse dentro del material conductor. Estos electrones libres se trasladan en todas las direcciones, no obstante los electrones no escapan del conductor porque son atraídos hacia los iones positivos del material. El movimiento de los electrones es aleatorio; de este modo, no hay flujo neto de carga en ninguna dirección y, en consecuencia, no hay corriente.

Si se establece un campo eléctrico  $E$  constante y estable dentro de un conductor, este material queda por tanto sometido a una fuerza constante:

$$F = qE \quad 2.8$$

En los diferentes materiales portadores de corriente, las cargas de las partículas en movimiento pueden ser positivas o negativas. En los metales las cargas en movimiento siempre son negativas.

Se define la dirección de la corriente  $I$ , como aquella en la que hay un flujo de carga positiva. Así que, se describe la corriente como si consistiese enteramente de un flujo de cargas positivas, incluso en los casos que se sabe que la corriente real se debe a electrones. Se define la corriente a través del área de sección transversal  $A$  como la carga neta que fluye a través del área por unidad de tiempo. Por consiguiente si una carga neta  $dQ$  fluye a través de un área en un tiempo  $dt$ , la corriente  $I$  a través del área es:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad 2.9$$

La corriente por unidad de área se define como densidad de corriente:

$$J = \frac{I}{A} \quad 2.10$$

## 2.7 Resistividad

La densidad de corriente  $J$  de un conductor depende del campo eléctrico  $E$  y de las propiedades del material. En especial para los metales, a una temperatura dada,  $J$  es directamente proporcional a  $E$  y la relación de estas magnitudes se define como resistividad  $\rho$  dando por resultado la siguiente fórmula.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad 2.11$$

Tomando la relación que hay entre las magnitudes de la ecuación anterior se genera la llamada ley de Ohm y las unidades de  $\rho$  son  $\Omega \cdot m$  (ohm-metro), los metales y las aleaciones tienen las resistividades más pequeñas y son los mejores conductores. En la siguiente tabla 2-4 se muestra la resistividad de varios materiales [19].

Tabla 2-4 Resistividades

Material	Resistividad $\rho(\Omega \cdot m)$
<u>Cobre</u>	$1.72 \times 10^{-8}$
Oro	$2.44 \times 10^{-8}$
<u>Aluminio</u>	$2.75 \times 10^{-8}$
<u>Hierro</u>	$9.71 \times 10^{-8}$
<u>Constantan</u>	$49 \times 10^{-8}$
<u>Estaño</u>	$11.50 \times 10^{-8}$

## 2.8 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material para dejar pasar libremente la corriente eléctrica. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material. Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles, y esto permite su movimiento, también depende de otros factores físicos del propio material, y de la temperatura.

La conductividad es lo contrario de la resistividad, y la relación entre  $J$  y  $E$  para un conductor metálico es  $\sigma$  (sigma) dando la forma:

$$J = \sigma E \quad 2.12$$

En donde  $\sigma$  está medida en siemens por metro  $S/m$  o  $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ , la conductividad es el análogo eléctrico directo de la conductividad térmica. Los conductores metálicos obedecen la ley de ohm, la cual es una relación lineal; la conductividad es constante en una amplia gama de densidades de corriente e intensidades de campo eléctrico. La conductividad es una función de la temperatura; la resistividad cambia linealmente con la temperatura. A continuación se presenta la tabla 2-5 con la conductividad eléctrica de varios metales.

Tabla 2-5 Conductividad eléctrica

Material	Conductividad eléctrica $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	Temperatura (°C)
<u>Cobre</u>	$5.96 \times 10^7$	20
Oro	$4.55 \times 10^7$	20-25
<u>Aluminio</u>	$3.78 \times 10^7$	20
<u>Hierro</u>	$1.53 \times 10^7$	20
<u>Constantan</u>	$2.08 \times 10^7$	20
<u>Estaño</u>	$9.17 \times 10^6$	20

Finalmente, la conductividad viene entonces dada por la fórmula:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad 2.13$$

Donde  $n$  es la densidad de portadores de,  $e$  es la carga del electrón,  $m$  es la masa del electrón y  $\tau$  es el tiempo de relajación de  $10^{-14}$  s.

## 2.9 Termopar tipo J

De acuerdo a los trabajos realizados en el Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores y particularmente en el trabajo de G. Pérez, C. Rickenstorff y C. Yllescas [5], se evaluó el desempeño de varios termopares donde se le realizaron pruebas eléctricas y de resistividad de materiales

Tomando en cuenta las especificaciones de los termopares J en la literatura nos indica que la gama de temperatura es de  $-210^\circ\text{C}$  hasta  $1200^\circ\text{C}$  [22], el coeficiente de Seebeck a temperatura ambiente es de  $51.71 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , en la tabla que se presentan a continuación se muestra el coeficiente de Seebeck de un termopar J, la resistividad y la conductividad térmica de los materiales del termopar J a temperatura de hasta  $200^\circ\text{C}$ , donde se muestra el cambio que tienen con respecto a esta temperatura.

Tabla 2-6 Coeficiente de Seebeck de termopar J, resistividad y conductividad térmica de los materiales de termopar J a diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Coef. Seebeck $\mu V/^\circ C$	Resistividad Hierro $\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$	Resistividad Constantan $\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$	Conductividad térmica Hierro $W/k \cdot m$	Conductividad térmica Constantan $W/K \cdot m$
0	50,37	8,57	48,90	75,42	19,4
100	54,35	14,14	48,85	67,88	21,2
200	55,50	21,03	48,70	61,17	25,1

Los valores de la figura de mérito se obtienen sustituyendo los valores del coeficiente de Seebeck, resistividad eléctrica y conductividad térmica de la tabla anterior en la expresión A.19. Los resultados de los cálculos realizados para la figura de mérito se muestran en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7 Cálculos para figura de mérito termopar J

Temperatura °C	Fig. de merito $(k^{-1}) \cdot 10^{-5}$
0	4.66
100	5.26
200	5.12

Por último se grafican los datos y se muestran en la figura 2.5

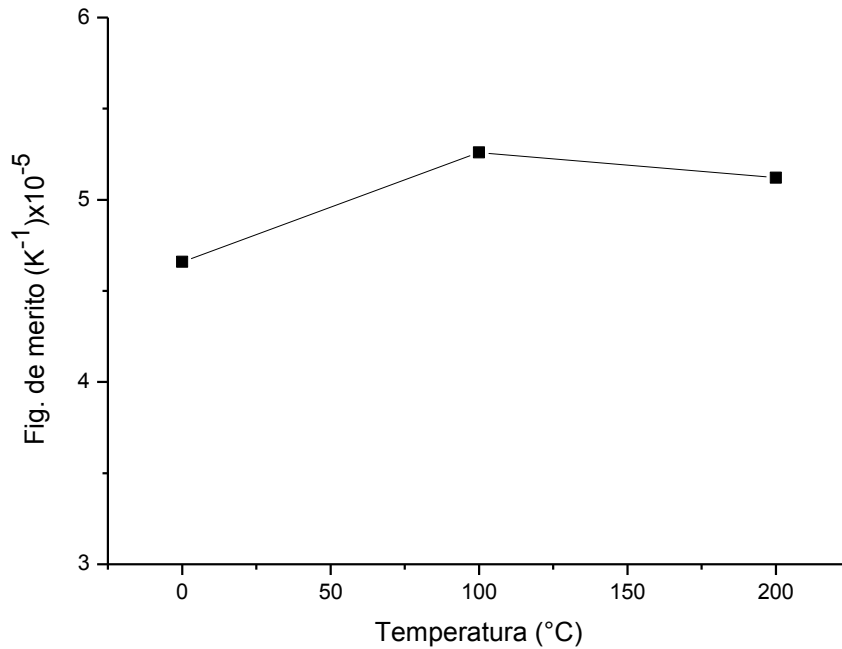


Figura 2.5. Figura de mérito del termopar tipo J

Con la ayuda de una fuente de corriente se aplicaron diferentes valores de corriente eléctrica a través de los alambres y por medio de un multímetro se midió la diferencia de voltaje entre sus extremos. La resistencia R del elemento bajo medición se obtiene a partir de la expresión 2.14.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad 2.14$$

Mientras que la resistividad  $\rho$  que presenta cada material se determinó por medio de la expresión 2.15.

$$\rho = \frac{R}{l} \quad 2.15$$

Las siguientes tablas muestran las pruebas realizadas al termopar:

Tabla 2-8. Resistividad medida para cada uno de los materiales que constituyen el termopar J.

Material	$l$ (cm)	$I$ (A)	$\Delta V$ (mV)	$R$ (m $\Omega$ )	$\rho$ (prom.) (m $\Omega$ /cm)
Hierro	12.9	1	32	32	2.41
	12.9	0.5	15.6	31.2	
	12.9	0.25	8	32	
	13	0.1	3.08	31.8	
	12.9	0.05	1.5	30	
Constantan	14.4	1	144.4	144	9.97
	14.4	0.5	71.8	143	
	14.4	0.25	36	144	
	14.4	0.1	14.3	143	
	14.4	0.05	7.2	144	

Tabla 2-9. Resistencia teórica y experimental obtenida para el termopar J con longitud de 10cm.

Termopar	$l$ (cm)	$I$ (A)	$\Delta V$ (mV)	R. exp (m $\Omega$ )	R. teo. (m $\Omega$ )
J	10	0.1	12.2	122	124

Una vez que se determinó la resistencia en el termopar, la siguiente prueba que se realizó fue la evaluación de la capacidad de generación eléctrica del termopar tipo J, cuando estos se someten a un gradiente de temperatura.

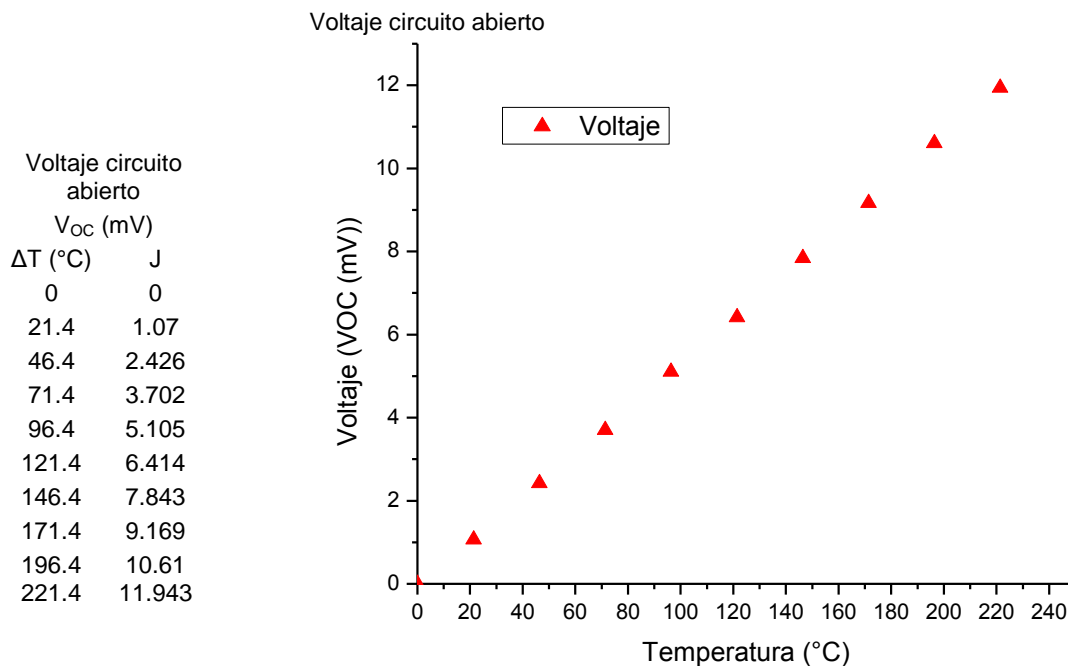


Figura 2.6. Gráfica de voltaje a circuito abierto del termopar J sometido a gradientes de temperatura

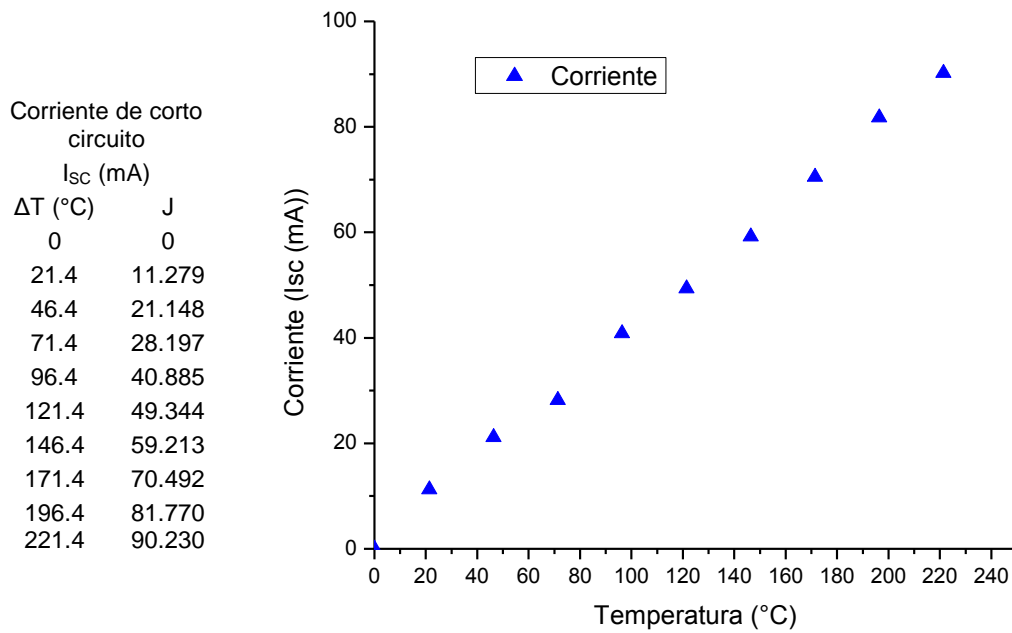


Figura 2.7. Gráfica de corriente en corto circuito del termopar J sometido a gradientes de temperatura

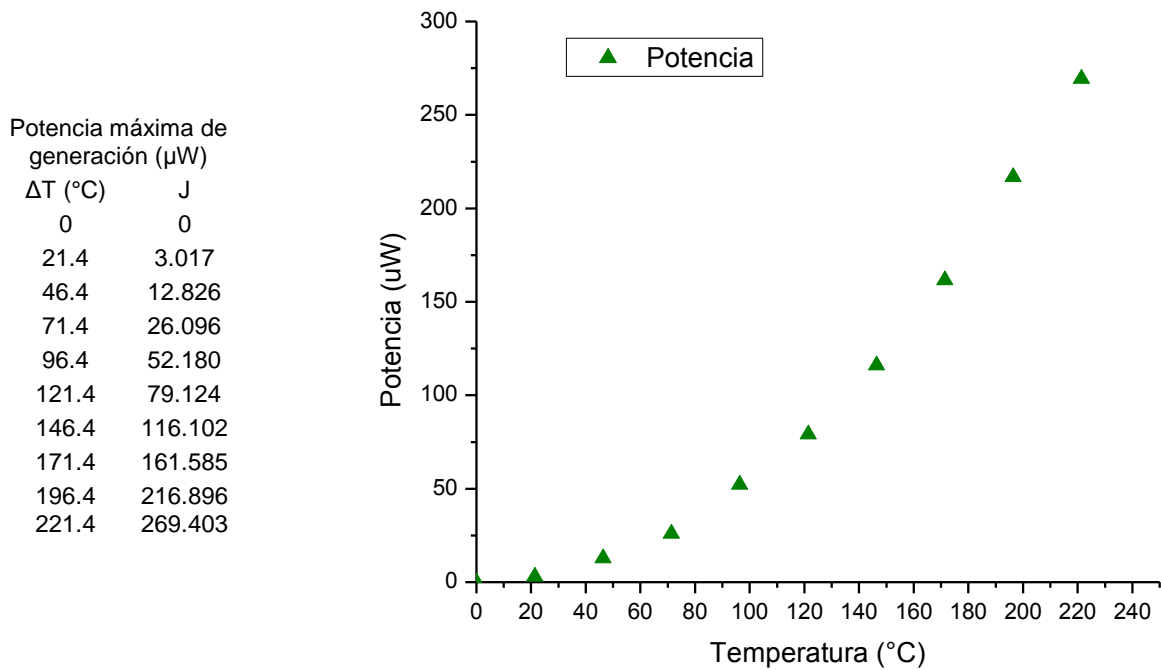


Figura 2.8. Gráfica de potencia máxima del termopar J sometido a gradientes de temperatura

Para determinar la potencia máxima que puede transferir cada par termoeléctrico hacia una carga; se empleó el concepto de máxima transferencia de potencia. En particular para un termopar, el comportamiento es lineal, donde se establece que este punto máximo está en  $\frac{1}{2}V_{OC}$  y  $\frac{1}{2}I_{SC}$ , por tanto, la potencia máxima que puede transferir un termopar hacia una carga resistiva para un gradiente de temperatura determinado, se muestra en la ecuación; 2.16 y en la figura 2.9 muestra esta condición.

$$W_{max} = \left(\frac{1}{2}V_{OC}\right)\left(\frac{1}{2}I_{SC}\right) \quad 2.16$$

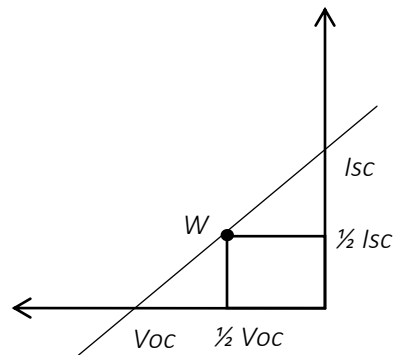


Figura 2.9. Máxima transferencia de potencia

Todos los valores anteriores mostrados en las figuras y sus tablas están determinados para un solo termopar. La CT está compuesta por 128 termopares por lo que para obtener los valores de voltaje de nuestra celda, multiplicamos por 128 el voltaje generado por un solo termopar, esto se observa en la tabla 2-10.

Tabla 2-10. Voltaje generado por un termopar y la CT

Temperatura (°C)	Voltaje (mV)	
	Termopar	Celda
100	5,268	674,304
200	10,77	1378,56

En la tabla 2-11 se muestran los valores de potencia máxima esperados para diferentes gradientes de temperatura en la CT.

Tabla 2-11. Valores de potencia máxima, corriente y voltaje para una CT

Temperatura (°C)	Voltaje $V_{OC}$ (V)	Corriente $I_{SC}$ (A)	Potencia $W$
100	0,67	0,84	0,14
200	1,36	1,73	0,59

# Capítulo 3

## Construcción de la CT

Ya realizado el estudio teórico acerca de la CT, se procedió a la construcción de la misma. La CT está basada en un arreglo de termopares, los cuales requieren de un gradiente de temperatura para su funcionamiento. A continuación se describe la construcción de la CT

### 3.1 Estructura de la celda termoeléctrica

La celda termoeléctrica, está compuesta por dos placas de aluminio anodizado, pistas de cobre y alambres de Hierro y Constantan, en la figura. 3.1 se muestra las partes de la celda.

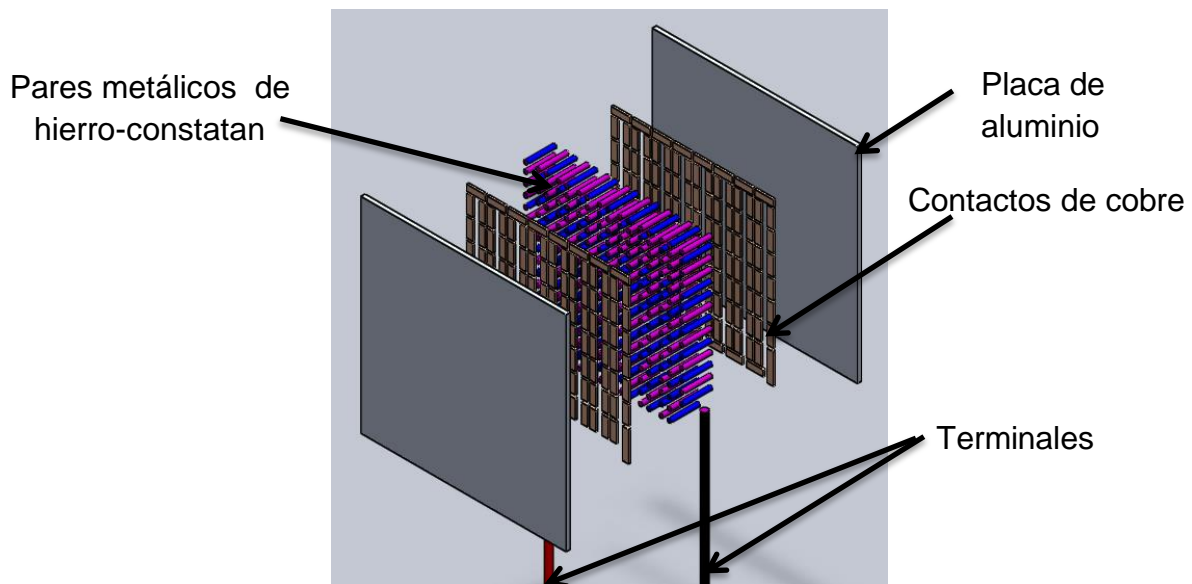


Figura 3.1. Estructura de la CT

Se realizaron 128 uniones de termopares en serie con cobre, las dimensiones del cobre son 4.5 mm de largo y 1.5 mm de ancho. Todas las uniones se realizaron con soldadura de estaño procurando tener un buen contacto; en la figura 3.2, se muestra la unión del termopar y la estructura de la unión en serie.

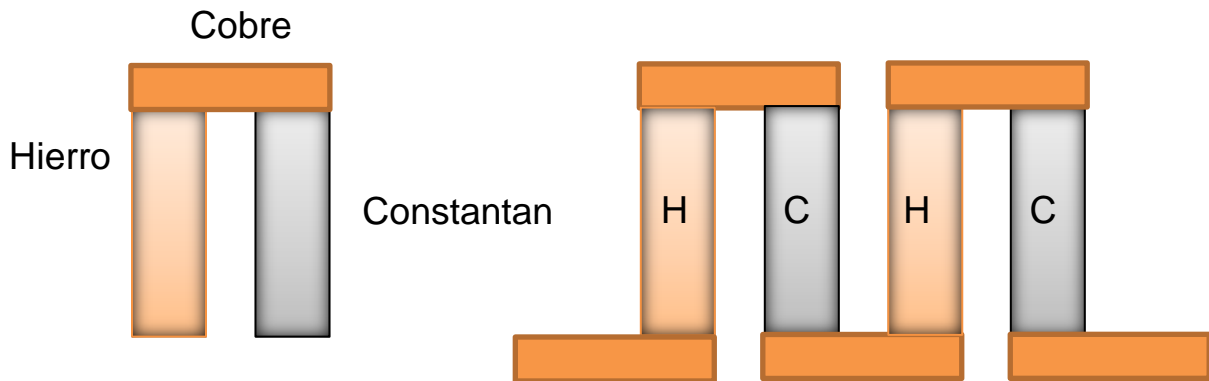


Figura 3.2. Unión hierro-constantan

### 3.2 Metales

Adquiriendo los metales hierro y constantan, se cortaron 128 trozos de cada metal a una longitud de 9 mm con un diámetro de 0.85 mm con la ayuda de una máquina cortadora (Apéndice E1).

Se diseñó y fabricó un circuito impreso en PCB (Apéndice B1) con dimensiones de 5x5 cm. Este impreso en PCB se tomó como guía para realizar una placa de aluminio (Apéndice B2) con las mismas dimensiones; el objetivo de la placa es el de colocar los metales en cada una de las 256 perforaciones, las cuales se realizaron con broca de 0.9 mm, en la figura. 3.3 se muestran la imagen, correspondiente.

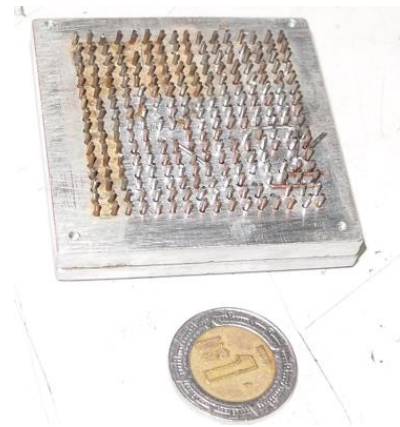


Figura 3.3. Plantilla de aluminio con los metales

Una vez colocados los metales en la plantilla de aluminio se realizó un pulido en los extremos de los metales con el fin de generar una superficie plana y depurar los defectos de los metales al ser cortados en un inicio; esto fue realizado con lija de agua del número 600, un vidrio como base de superficie plana y con movimientos circulares; de esta manera los metales pudieron ser devastados y llegar a una longitud de 7 mm, por último se utilizó un cepillo de cerdas de metal y una pequeña lima. La fig. 3.4 muestra los resultados de los metales antes y después de ser lijados.

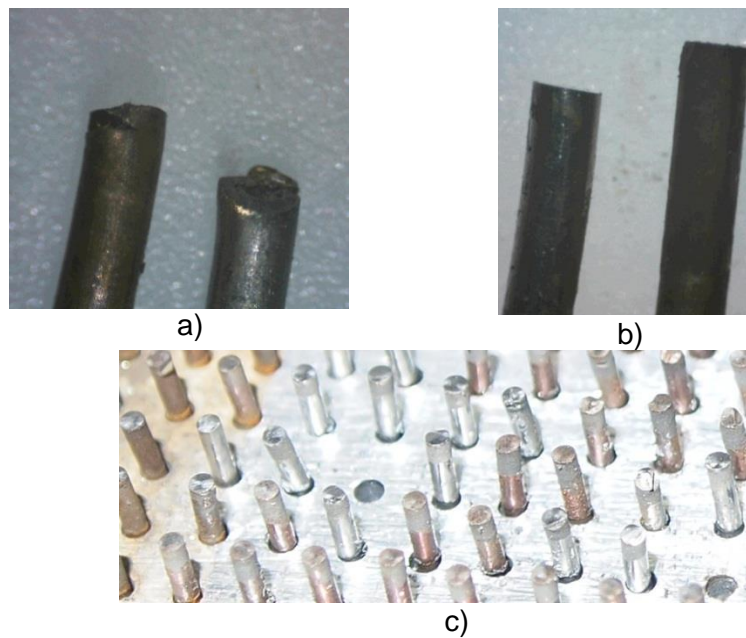


Figura 3.4. Metales a) Metales cortados sin pulir vista en microscopio b) Metales después de ser lijados c) Metales en la placa de aluminio en proceso de lijado.

Realizado el pulido, el siguiente paso fue el lavado de los metales mediante agua y jabón, el segundo con acetona; con esto se quitan residuos del procedimiento previo, en la figura 3.5 muestra las imágenes de este proceso.



Figura 3.5. Lavado de metales

Posteriormente se fabricó una plantilla de teflón (Apéndice B3), con las mismas 256 perforaciones que tiene la plantilla de aluminio. Se diseñó y se elaboró esta plantilla con avellanado en el extremo superior con el fin de colocar los metales y tener una guía al momento de realizar el horneado para soldar; también, a cada metal se le colocó estaño en la punta. En la figura 3.6 se observan los metales colocados en la plantilla.

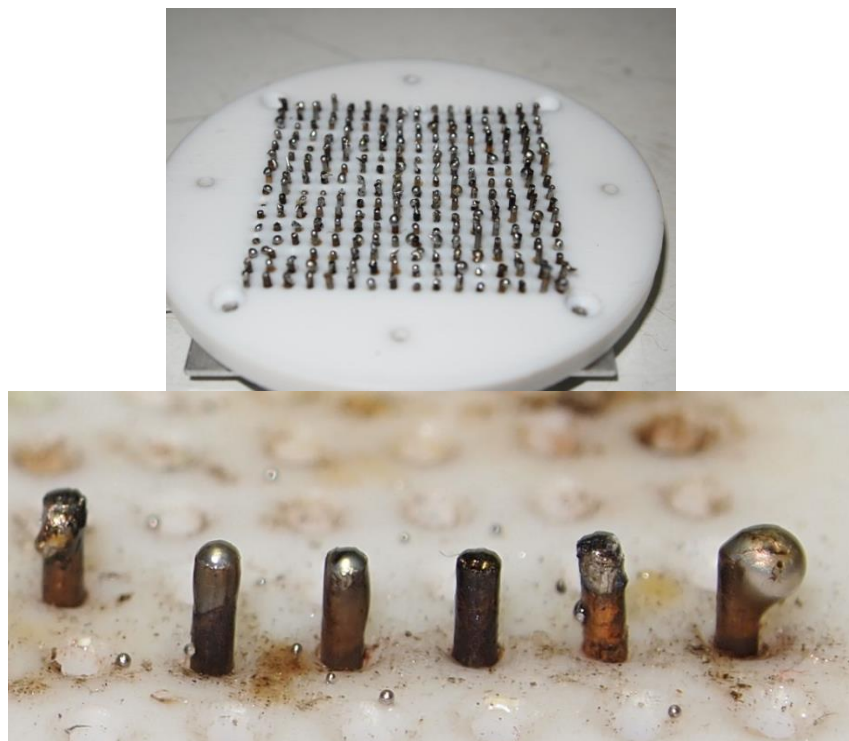


Figura 3.6. Metales en plantilla de teflón con estaño

### 3.3 Horneado

Como se mencionó anteriormente, los metales colocados en la plantilla, se ubican sobre una de las placas de aluminio anodizado, con los contactos de cobre previamente colocados con silicón automotriz de alta temperatura (hasta 320°C) como se muestra en la figura 3.7, esta placa de aluminio anodizado de calibre 28 con dimensión de 5x5 es un material adecuado debido a que el anodizado (óxido de aluminio) funciona como aislante eléctrico. Teniendo los contactos ya adheridos a las placas de aluminio, se procedió a aplicarles una capa de soldadura, con la finalidad de que se genere una unión completa.

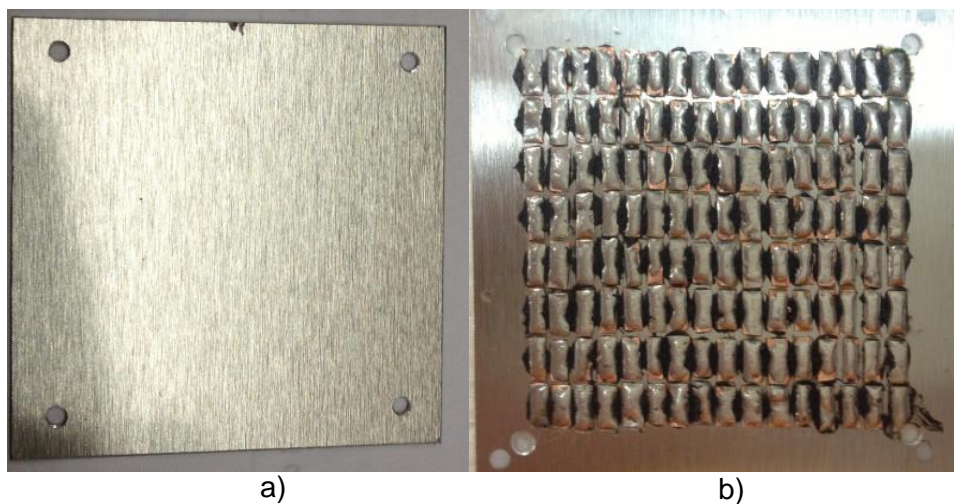


Figura 3.7. a) Placa de aluminio anodizado b) Placa con contactos de cobre y soldadura

La placa anterior se atornilla en un horno diseñado y desarrollado para el proceso de soldado (Apéndice C), donde como se mencionó, se coloca la plantilla con los alambres de hierro y constantan sobre esta y por encima de los alambres se coloca una placa de aluminio, con el objetivo de generar una leve presión mientras se hornea la soldadura, esto hace bajar los metales para que sean soldados con los contactos.

El horneado se realiza a una temperatura por encima de los 180°C verificando que la soldadura llegue a su punto de fusión; al observar esto en un termómetro digital, se apaga la resistencia que genera el calor para dar inicio al enfriamiento de la soldadura. El proceso se muestra en la figura 3.8.

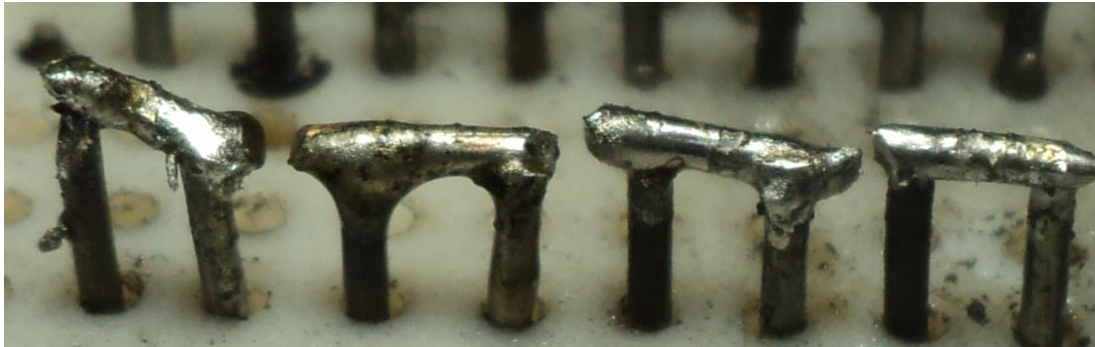


Figura 3.8. Horneado

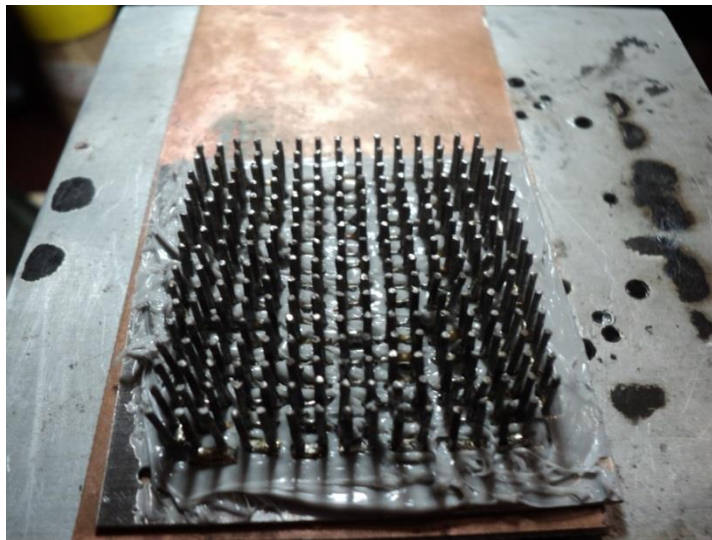
Una vez que el sistema se hubo enfriado, se retiró la placa de aluminio superior y al retirar la plantilla de teflón se observó que más del 60% de los metales habían soldado correctamente, y, al mismo tiempo, los elementos no quedaron adheridos a la placa anodizada.

### 3.4 Ensamble de la Celda Termoeléctrica

En las secciones anteriores, se describieron las características y fabricación de los elementos que constituyen la CT. A continuación se describe el montaje para el ensamble de la celda. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, para realizar de manera segura el soldado de los elementos termoeléctricos se tomó la alternativa de colocar elemento por elemento nuevamente en la plantilla de teflón. Para ello los elementos que no se soldaron adecuadamente, fueron soldados con cautín y soldadura de estaño manualmente. Una vez que se soldaron todos los elementos, estos fueron colocados sobre la placa anodizada con silicón de alta temperatura (hasta 320°C), el silicón permite que los elementos quedaran adheridos a la placa, ver figura 3.9.



a)



b)

Figura 3.9. a) Termopares soldados b) Elementos en la placa anodizada

Una vez que fueron fijados los termopares a la placa de aluminio, se dejó secar el silicón. Para que los elementos queden conectados eléctricamente en serie, manualmente se fueron uniendo uno a uno con hilos de cobre calibre 24; Iniciando la serie con un elemento de hierro y terminando con un elemento de constantan. Al final, en los extremos de la celda se sueldan las terminales ver la figura 3.10.



Figura 3.10. Circuito cerrado de la celda termoeléctrica

La parte final del ensamblado de la celda concluyo con inyectar silicón entre el circuito de alambres; la segunda placa de aluminio anodizado se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11. Inyección de silicón de la celda termoeléctrica

En la figura 3.12 se muestra la celda termoeléctrica ensamblada y sellada.

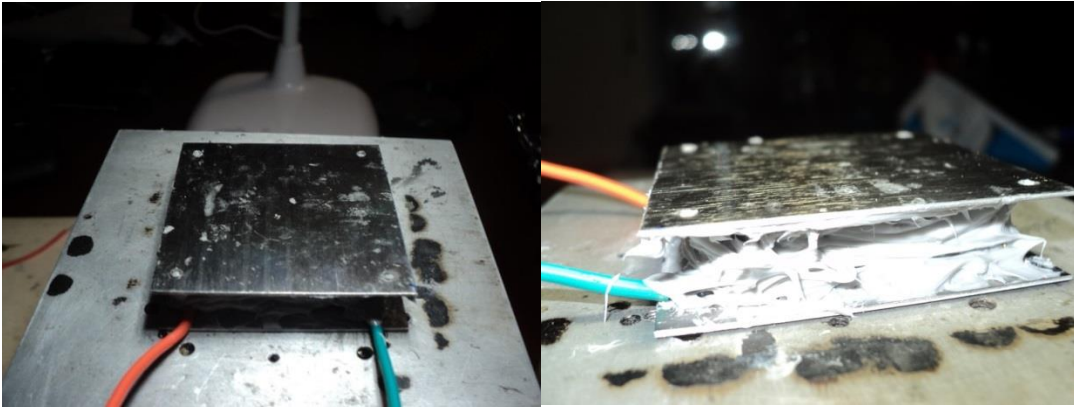


Figura 3.13. Celda termoeléctrica ensamblada

Al finalizar el ensamblado y sellado, todas las uniones termoeléctricas fueron sometidas a prueba de continuidad mediante un multímetro; al verificar la continuidad se procedió a caracterización correspondiente.

# Capítulo 4

## Sistemas de caracterización térmica y eléctrica

Terminada la construcción de la CT, se presenta la caracterización térmica y eléctrica de la CT. Primeramente se describe el procedimiento para obtener la conductividad térmica de la CT. Después se hará una descripción de la caracterización eléctrica y las pruebas realizadas en laboratorio a la CT. Para estas pruebas se implementó un circuito electrónico que permite visualizar las curvas Corriente-Voltaje (I-V) para diferentes gradientes de temperatura.

### 4.1 Sistema de caracterización térmica

Para poder medir la conductividad térmica de la CT, construyó un sistema basado en la transferencia de calor sobre un cuerpo sólido. En la figura 4.1 se muestra el esquema utilizado para esta medición.

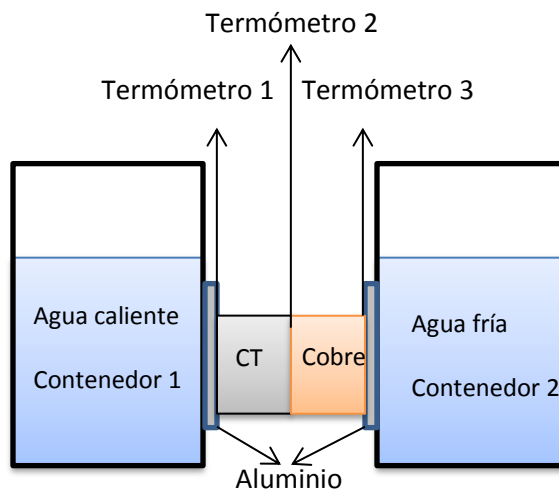


Figura 4.1. Esquema del sistema utilizado para medir la conductividad térmica de la CT.

El sistema utilizado para la medición térmica requirió de la construcción de dos contenedores de unicel con capacidad de 1.5 litros de agua, sobre los cuales se insertó una placa de aluminio cuadrada cuyas dimensiones son: 1,1/2" de largo x 1,1/2" de alto x 1/8" de ancho. En una de las caras del contenedor que tiene agua caliente se colocó la CT y en el otro contenedor con agua a medio ambiente se colocó también una pieza de cobre con dimensiones de 1"x1"x1/2". Para efectuar la medición se colocaron tres termómetros digitales como se muestran en el esquema de la figura 4.1, con la finalidad de medir la temperatura en las tres interfaces que se presentan en la colocación de la CT y de la muestra de cobre. Las placas se unieron con pasta térmica para tener una mejor transferencia y por consiguiente una mejor lectura. La prueba realizada a la celda tuvo una duración de 15 minutos, las lecturas obtenidas, al final de la prueba se muestran en la tabla, 4-1.

Tabla 4-1 temperatura inicial y final medida en las interfaces del sistema de caracterización

Lugar	Inicial	Final
Agua caliente	82.7°C	78°C
Agua temperatura ambiente	25.4°C	26.7°C
Lectura entre CT y cobre	27°C.	29°C

En el sistema de caracterización propuesto, el calor fluye del contenedor de agua caliente hacia la placa de cobre y, también hacia la CT, hasta llegar al recipiente de agua a temperatura ambiente. Se conoce la conductividad térmica del cobre, que es  $385 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ , pero de la CT no. La temperatura intermedia  $T$ , entre la CT y la placa de cobre, es también conocida ya que se registra con el termómetro 2. Con esta información se puede determinar la diferencia de temperatura entre la placa de cobre y la CT; estas corresponden a:  $(T_c - T)$  y  $(T - T_f)$  en donde  $T_c$  corresponde a la temperatura caliente y  $T_f$  corresponde a la temperatura fría, en este caso la temperatura del agua contenida en el recipiente de agua fría. Para determinar el valor de la conductividad térmica,  $K_{CT}$ , de la CT, se utilizan las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5. A continuación se muestra el cálculo realizado [19].

$$\frac{K_{CT}A(T_C - T)}{L_{celda}} = \frac{K_{Cobre}A(T - T_f)}{L_{cobre}} \quad 4.1$$

Sustituyendo lo datos de la tabla 4-1 en la ecuación 4.1, y tomando en cuenta que el área es la misma para la CT y para la muestra de cobre, entonces, la conductividad térmica  $K_{CT}$  de la CT es:

$$K_{CT} = \frac{8.885}{0.6125} = 14.50 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{k}}$$

El resultado se comprueba sustituyendo nuevamente en 4.1 la conductividad resultante, con esto se obtiene el flujo de calor en la CT, y en la muestra de cobre la igualdad da como resultado 177.6 w, multiplicando por el tiempo de prueba y dividiendo entre el valor de una caloría, esto corresponde a 38.18 kilocalorías.

La figura 4.2 muestra, las imágenes obtenidas durante la caracterización de la CT.



Figura. 4.2 Sistema para medir la conductividad térmica de la CT.

## 4.2 Sistema de caracterización eléctrica.

Para realizar la caracterización eléctrica se construyó un equipo especializado que permita obtener las curvas I-V de la CT, sobre este equipo se coloca la CT y se le aplican diferentes gradientes de temperatura.

Sobre una base de madera se atornilló una placa de teflón. Esta placa permite aislar el calor producido por el calefactor. El calefactor consta de una base de aluminio, en cuyo interior se coloca una resistencia eléctrica, la cual permite calentar de manera gradual una cara de la CT. En la figura 4.3 se muestra el diseño en explosión del equipo de caracterización eléctrica.

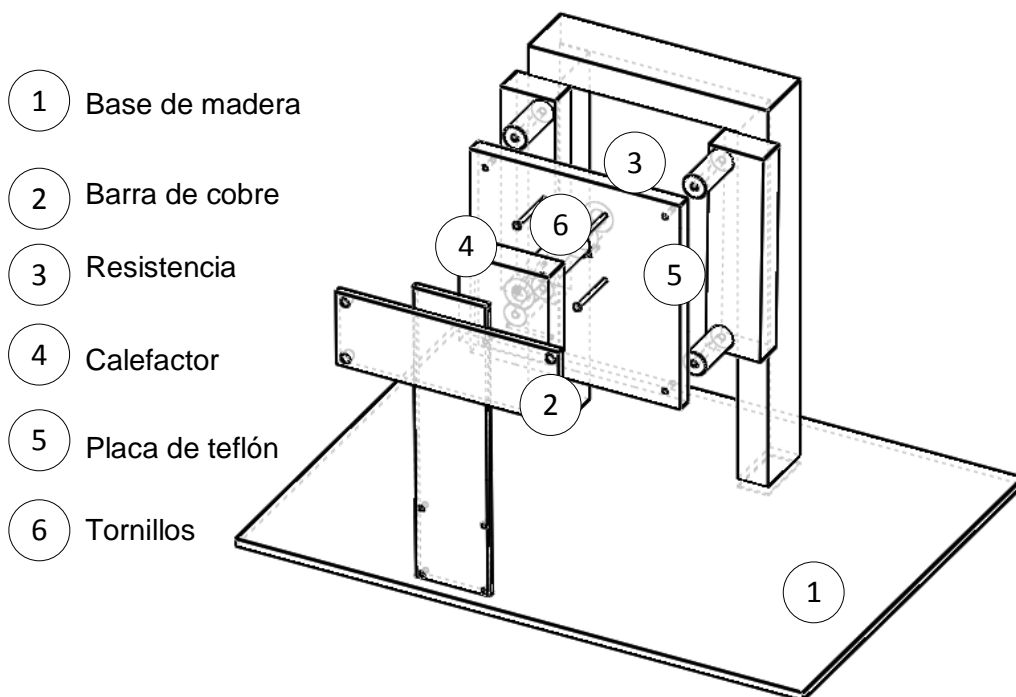


Figura 4.3. Equipo de caracterización eléctrica.

En el apéndice D se muestra los planos del equipo de caracterización eléctrica. El calor del calefactor es monitoreado por medio de un termopar tipo K, el cual se encuentra colocado en la parte superior del calefactor. Para la parte de enfriamiento o sumidero se utilizó una barra de cobre, la mitad de esta barra se sumerge en agua con hielo fundente. En la figura 4.4 se muestra estos elementos.

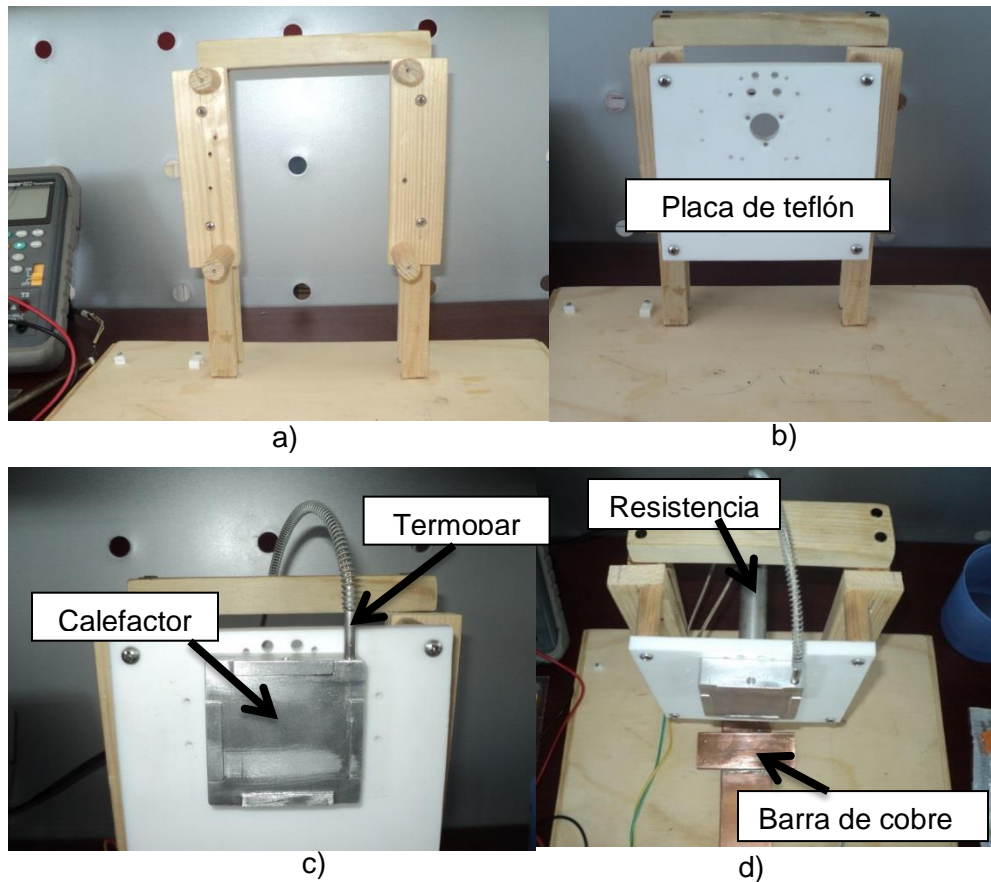


Figura 4.4. Ensamble del sistema de calentamiento para la CT: a) Base de madera b) Placa de teflón c) Calefactor y termopar d) Resistencia y barra de cobre.

Una vez implementado el equipo de caracterización eléctrica, se procede a colocar la CT para las pruebas. Para ello se aplicó pasta térmica Sili-Tek a la CT para asegurar un buen contacto térmico entre las placas (aluminio y cobre) y la CT. La CT se fijó entre la barra de cobre y la placa de teflón mediante tornillos y resortes, los cuales permiten ajustar la presión requerida sobre la CT. Con este equipo se pudo generar la temperatura necesaria para la obtención de las curvas I-V a diferentes gradientes de temperatura, ver figura 4.5.

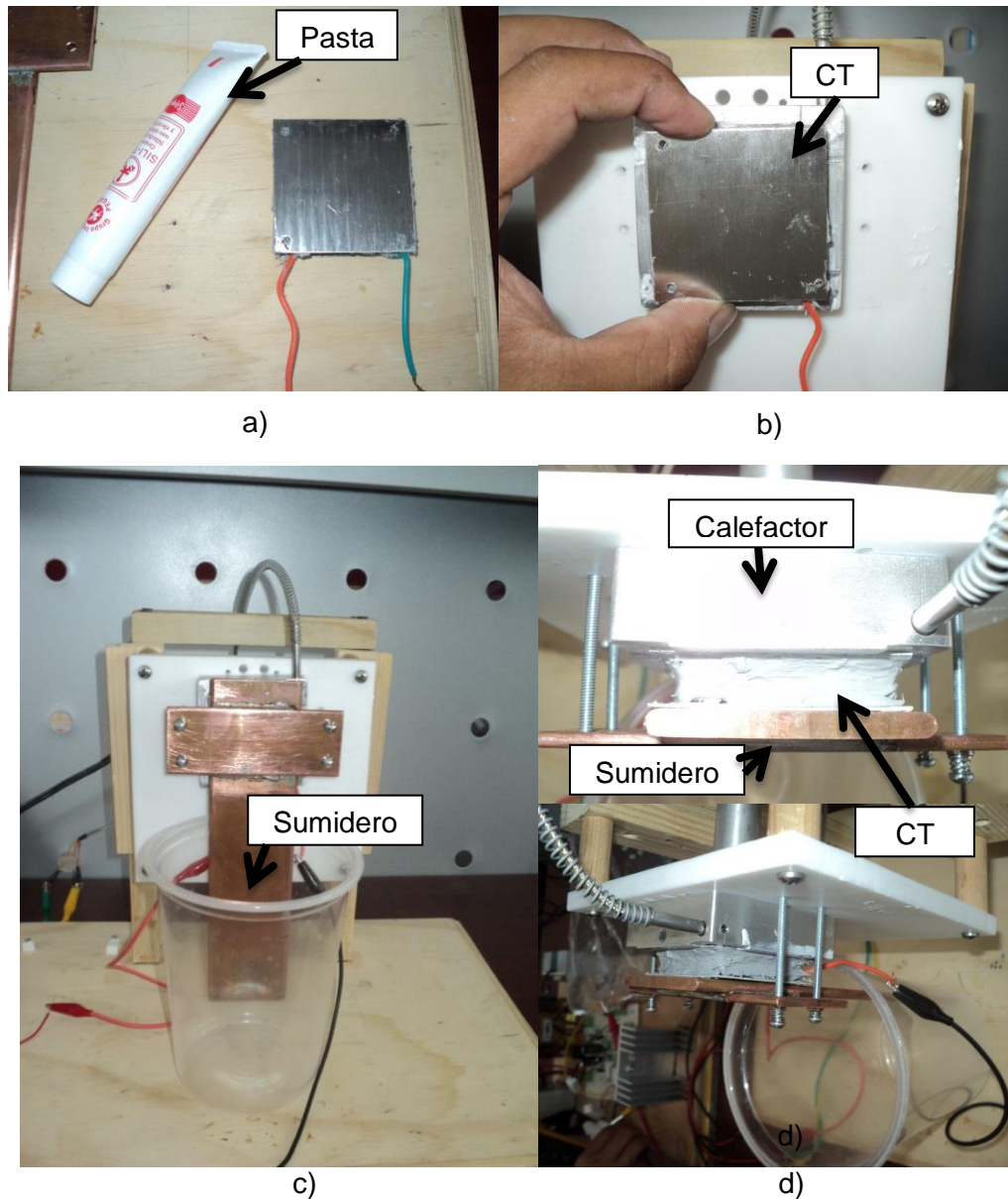


Figura 4.5. Equipo montado para la caracterización eléctrica de la CT  
 a) Pasta utilizada para asegurar el contacto térmico a la CT b) CT colocada sobre el calefactor c) Sumidero d) Ensamble completo.

Una vez finalizado el ensamble del equipo de caracterización, se establecieron las condiciones necesarias para realizar las pruebas a la CT. Para esto se depositó hielo con agua en un recipiente de plástico, se colocó un termómetro de mercurio para tomar lectura de la temperatura del agua con hielo fundente. Así mismo se conectó y probó la resistencia del calefactor. Para monitoreo del calefactor se empleó un termómetro digital. Colocada y fijada la CT, se verificó la continuidad de la misma y se obtuvo la resistencia interna; esto se puede observar en la figura 4.6.

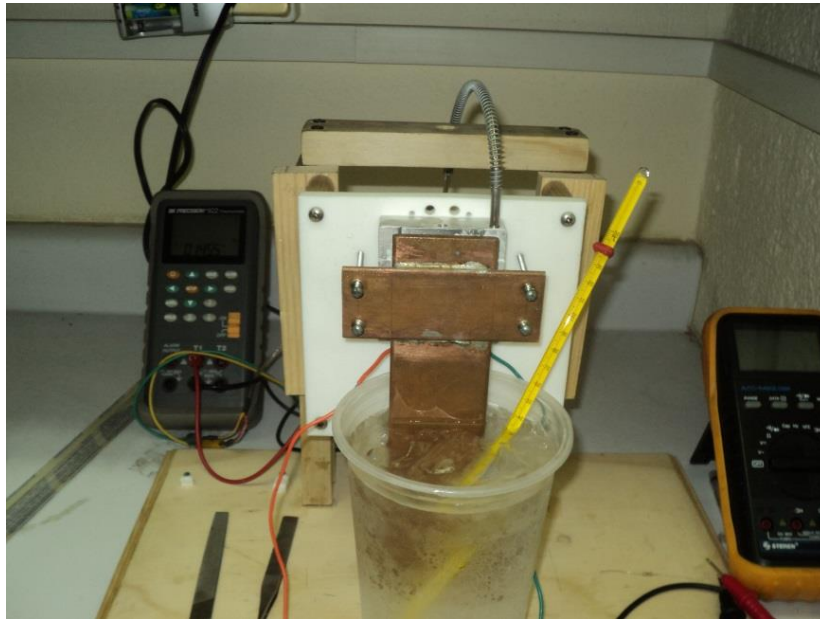


Figura 4.6. Sistema completo para efectuar la caracterización de la CT.

Continuando con la preparación de las pruebas experimentales las terminales o electrodos de la CT se conectaron a un circuito electrónico denominado modulo trazador de curvas (MTC). La función de la electrónica utilizada es poder obtener las curvas I-V de la CT. Este a su vez se conectó a un osciloscopio Tektronix TBS 2012C, la prueba de funcionamiento que se realizó al MTC fue para observar las resistencias parasitas generadas por las conexiones hechas a la CT, además, observando en el osciloscopio la curva I-V, este mostró que el sistema completo se encontraba en las condiciones adecuadas para realizar pruebas de generación ver figura 4.6 y 4.7.

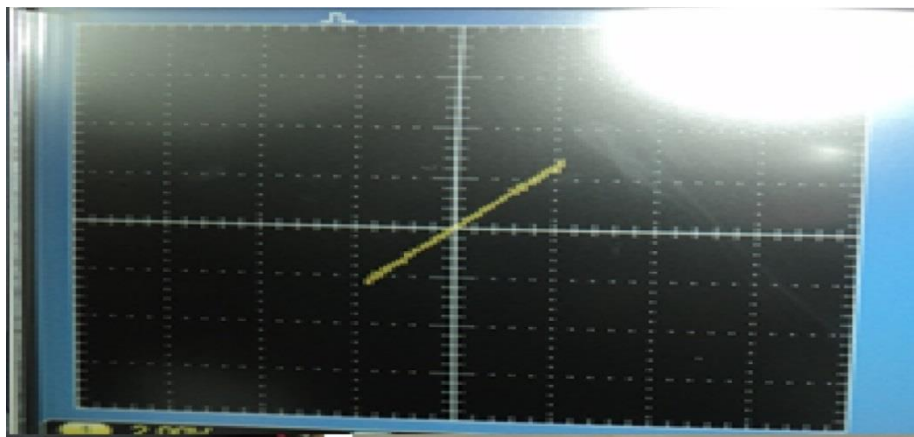


Figura. 4.7 Curva característica I-V de la CT para  $\Delta T = 15^{\circ}C$ ,  $\Delta I = 0$ ,  $\Delta V = 0$ ,  $R_i = 4\Omega$

### 4.3 Modulo trazador de curvas

Del trabajo de Jiménez [23] el modulo trazador de curvas (MTC) empleado para la caracterización eléctrica de la CT. Debe de tener en cuenta que el voltaje puede ser mayor al obtenido por un par termoeléctrico, por lo cual ya no es necesario amplificar el voltaje generado. Sin embargo para el barrido en corriente es necesario contar con una fuente de voltaje que nos permita obtener al menos 2 A. Además al diseño del MTC se le implemento un control de offset y amplitud, con la finalidad de analizar a detalle las curvas obtenidas.

El MTC está constituido por un transformador, por un modulador de amplitud y control de offset, un amplificador de corriente, y un amplificador diferencial. El diagrama a bloques de este sistema se presenta en la figura. 4.8.

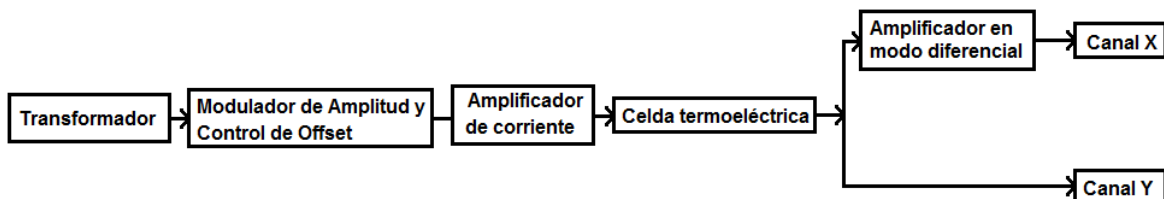


Figura 4.8. Diagrama a bloques del MTC.

Los elementos que conforman el MTC se describen a continuación:

Transformador.

Para obtener la curva característica I-V de un dispositivo electrónico, se requiere de una señal senoidal de determinada frecuencia. Esta señal, por sus características, permite realizar un barrido de voltaje tanto positivo como negativo en el dispositivo bajo prueba, en este caso la senoidal es proporcionada por un transformador. Este transformador se alimenta con 120 Vrms, mientras que en su salida se obtiene un voltaje de 3 Vrms. El transformador es capaz de manejar en la salida, corrientes de hasta 2 A, con el fin de lograr también el barrido de corriente la cual se detecta por medio de una resistencia de prueba colocada en serie.

Modulador de amplitud y control de offset.

Este circuito permite amplificar la señal de entrada y al mismo tiempo introducir una señal de dc, que nos permite operar en una sección de la curva, para analizar con más detalle la curva obtenida. El circuito es mostrado en la figura 4.9.

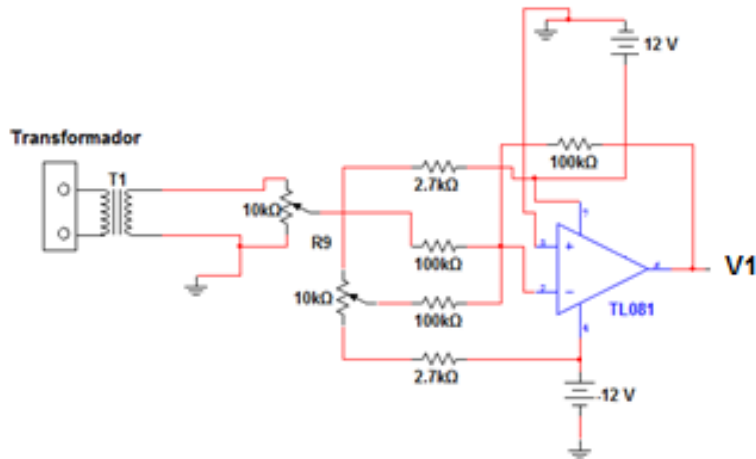


Figura 4.9. Circuito modulador de amplitud y control de offset.

Amplificador de corriente.

Como amplificador de corriente se emplea un circuito en la configuración de simetría complementaria con alimentación simétrica. Este amplificador es capaz de entregar aproximadamente 1W de potencia a la carga (CT), con la mínima distorsión posible y una impedancia de salida baja como se muestra en la figura 4.10.

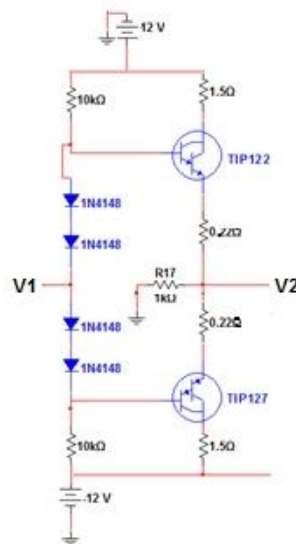


Figura 4.10. Amplificador de corriente

Amplificador diferencial.

El circuito medidor de corriente está conformado por un amplificador conectado en configuración diferencial con ganancia unitaria. Este amplificador mide el voltaje presente entre las terminales de la CT; por tanto, el escalamiento de la magnitud de corriente depende del valor de la misma ver figura. 4.11.

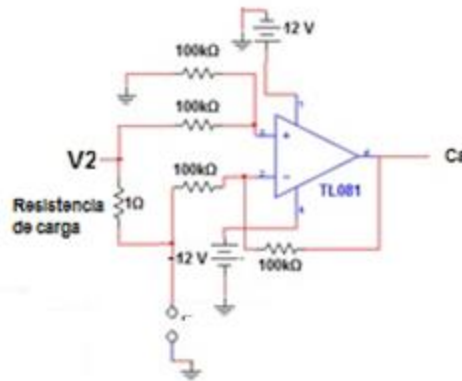


Figura 4.11. Amplificador diferencial con ganancia unitaria.

Implementación del MTC

En la figura 4.12 se presenta el diagrama completo utilizado para la implementación del MTC. Para la realización del circuito y simulación se utilizó Multisim 13.0. En la figura 4.13 se muestra el MTC implementado.

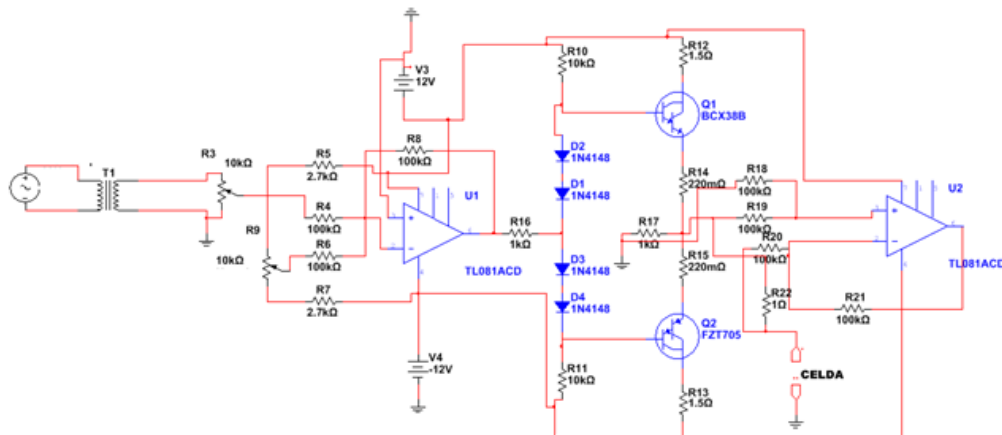


Figura 4.12. Diagrama completo del circuito MTC utilizado para caracterizar la CT.

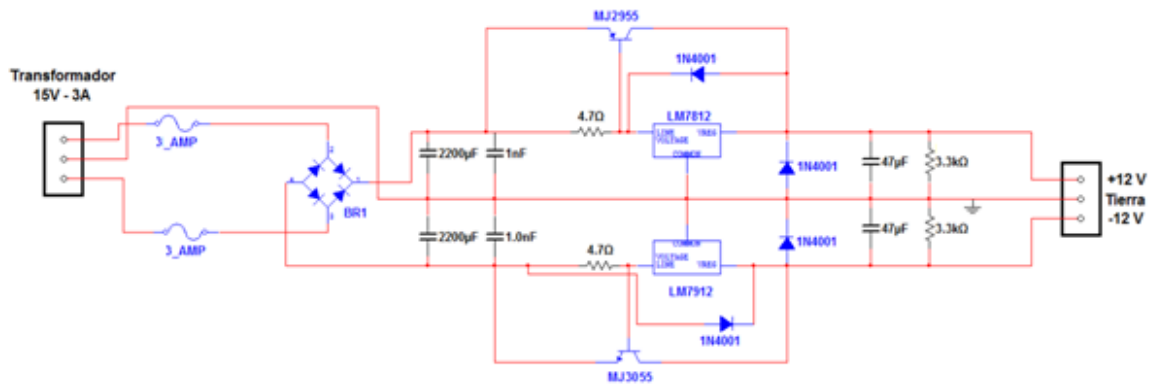


Figura 4.13 Fuente de alimentación del MTC

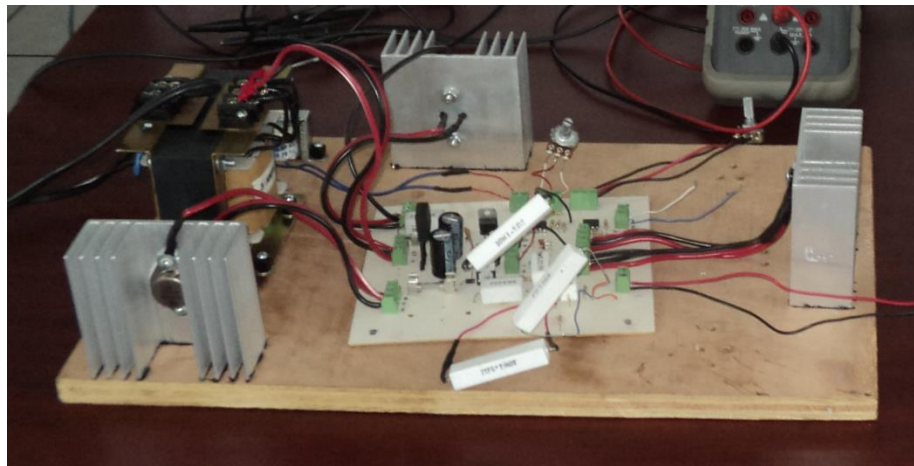


Figura 4.14. Implementación del MTC en una placa de circuito impreso.

# Capítulo 5

## Pruebas experimentales

Una vez teniendo todas las condiciones listas para la realización de las pruebas, la caracterización eléctrica de la CT se realizó de la manera siguiente: se conectó a la línea eléctrica la resistencia del calefactor para generar el ascenso de la temperatura en una de las placas de la CT. La temperatura inicial corresponde a la temperatura ambiente. Posteriormente, conforme se incrementó la temperatura en la placa se guardaron los datos, hasta alcanzar la temperatura de 200°C, la temperatura fue tomada mediante un termómetro digital. Simultáneamente con el incremento de temperatura, fue tomada la familia de curvas I-V, de la CT para diferentes gradientes de temperatura, esta familia de curvas fue obtenida mediante el MTC, acoplado al osciloscopio Tektronix TDS 2012C. Los datos obtenidos fueron almacenados en una memoria USB. La temperatura del sumidero se mantuvo en 4°C. Tomando la temperatura del calefactor y la del sumidero se determinó el gradiente de temperatura correspondiente. En la pantalla del osciloscopio se mostró el desplazamiento de las curvas I-V; esto mostró que la CT construida genera energía eléctrica.

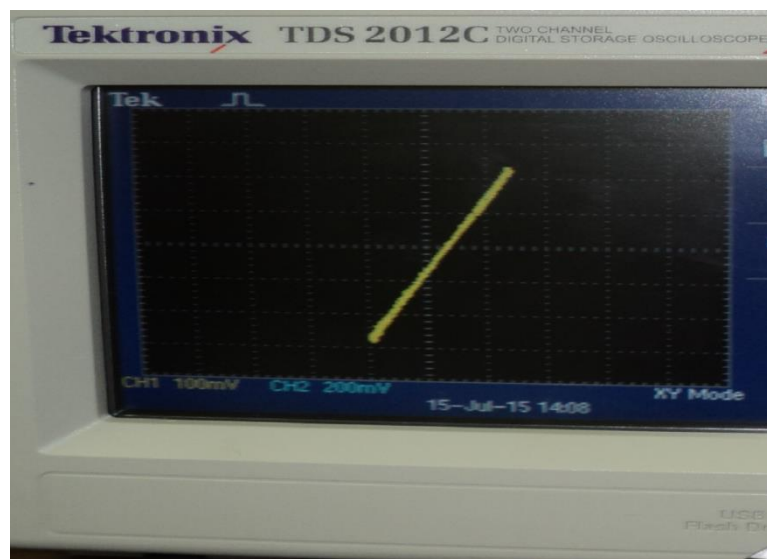


Figura. 5.1 Desplazamiento de curva I-V obtenida para un  $\Delta T = 105^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta I = 0.012$ ,  $\Delta V = 0.0031$ ,  $R_i = 0.258\Omega$ .

## 5.1 Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos desde un  $\Delta T = 25^\circ C$  hasta  $\Delta T = 205^\circ C$ . La figura 5.2 muestra los resultados obtenidos durante la caracterización de la CT, estos datos fueron procesados utilizando el programa OriginPro 8.

Long Name	A(X1)	B(Y1)	C(X2)	D(Y2)	E(X3)	F(Y3)	G(X4)	H(Y4)	I(X5)	J(Y5)	K(X6)	L(Y6)	M(X7)	N(Y7)	O(X8)	P(Y8)
Units	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE	VOLTAJE	CORRIEN TE
Comments	25°C		45°C		85°C		85°C		105°C		125°C		145°C		165°C	
1	-0.0156	-0.05221	-0.0196	-0.05014	-0.0225	-0.03368	-0.01	-0.05721	-0.0116	-0.05645	-0.0098	-0.05694	-0.0099	-0.05979	-0.0164	-0.05146
2	-0.01529	-0.05124	-0.01823	-0.04923	-0.02449	-0.03324	-0.00977	-0.05618	-0.01133	-0.05543	-0.00957	-0.05789	-0.00957	-0.05775	-0.01602	-0.05055
3	-0.01499	-0.05028	-0.01787	-0.04831	-0.02397	-0.0326	-0.00955	-0.05515	-0.01107	-0.05441	-0.00925	-0.05682	-0.00933	-0.0567	-0.01564	-0.04964
4	-0.01468	-0.04931	-0.0175	-0.04739	-0.02346	-0.03196	-0.00932	-0.05412	-0.0108	-0.05339	-0.00912	-0.05576	-0.0091	-0.05566	-0.01526	-0.04872
5	-0.01438	-0.04834	-0.01714	-0.04647	-0.02295	-0.03133	-0.00909	-0.05309	-0.01053	-0.05236	-0.00789	-0.0547	-0.00786	-0.05461	-0.01488	-0.04781
6	-0.01407	-0.04737	-0.01677	-0.04556	-0.02243	-0.03069	-0.00887	-0.05206	-0.01027	-0.05134	-0.00767	-0.05364	-0.00763	-0.05357	-0.0145	-0.0469
7	-0.01377	-0.04641	-0.01641	-0.04464	-0.02192	-0.03005	-0.00864	-0.05102	-0.01	-0.05032	-0.00744	-0.05268	-0.00739	-0.05253	-0.01412	-0.04599
8	-0.01346	-0.04544	-0.01604	-0.04372	-0.02141	-0.02941	-0.00842	-0.04999	-0.00973	-0.04993	-0.00722	-0.05152	-0.00716	-0.05148	-0.01374	-0.04507
9	-0.01316	-0.04447	-0.01567	-0.0428	-0.02089	-0.02877	-0.00819	-0.04896	-0.00947	-0.04827	-0.00699	-0.05046	-0.00693	-0.05044	-0.01336	-0.04416
10	-0.01285	-0.0435	-0.01531	-0.04189	-0.02039	-0.02813	-0.00796	-0.04793	-0.0092	-0.04725	-0.00676	-0.0494	-0.00669	-0.04939	-0.01298	-0.04325
11	-0.01255	-0.04254	-0.01494	-0.04097	-0.01987	-0.0275	-0.00774	-0.0469	-0.00893	-0.04623	-0.00654	-0.04834	-0.00646	-0.04825	-0.0126	-0.04233
12	-0.01224	-0.04157	-0.01458	-0.04005	-0.01936	-0.02686	-0.00751	-0.04587	-0.00867	-0.04521	-0.00631	-0.04728	-0.00622	-0.0473	-0.01222	-0.04142
13	-0.01194	-0.0406	-0.01421	-0.03913	-0.01884	-0.02622	-0.00728	-0.04484	-0.0084	-0.04418	-0.00608	-0.04623	-0.00599	-0.04626	-0.01184	-0.04051
14	-0.01163	-0.03963	-0.01385	-0.03821	-0.01833	-0.02568	-0.00706	-0.04381	-0.00813	-0.04316	-0.00586	-0.04517	-0.00575	-0.04521	-0.01146	-0.0396
15	-0.01133	-0.03867	-0.01348	-0.0373	-0.01782	-0.02494	-0.00683	-0.04277	-0.00787	-0.04214	-0.00563	-0.04411	-0.00552	-0.04417	-0.01108	-0.03868
16	-0.01102	-0.0377	-0.01312	-0.03638	-0.0173	-0.0243	-0.00661	-0.04174	-0.0076	-0.04112	-0.00541	-0.04305	-0.00528	-0.04312	-0.0107	-0.03777
17	-0.01072	-0.03673	-0.01275	-0.03546	-0.01679	-0.02367	-0.00638	-0.04071	-0.00733	-0.04009	-0.00518	-0.04199	-0.00505	-0.04208	-0.01032	-0.03686
18	-0.01041	-0.03576	-0.01238	-0.03454	-0.01628	-0.02303	-0.00615	-0.03968	-0.00707	-0.03907	-0.00495	-0.04093	-0.00482	-0.04103	-0.00994	-0.03594

Figura. 5.2 Resultados obtenidos durante la caracterización de la CT procesados en OriginPro 8.

Además, en la figura 5.3 se muestra la familia de curvas I-V, obtenida para la CT, se muestra, la corriente Isc y el voltaje Voc, para diferentes gradientes de temperatura.

En la tabla 5-1 se muestra los diferentes gradientes de temperatura ( $^\circ C$ ), la corriente de corto circuito (Isc), el voltaje de circuito abierto (Voc), la resistencia interna (Ri) y la potencia máxima de generación de la CT.

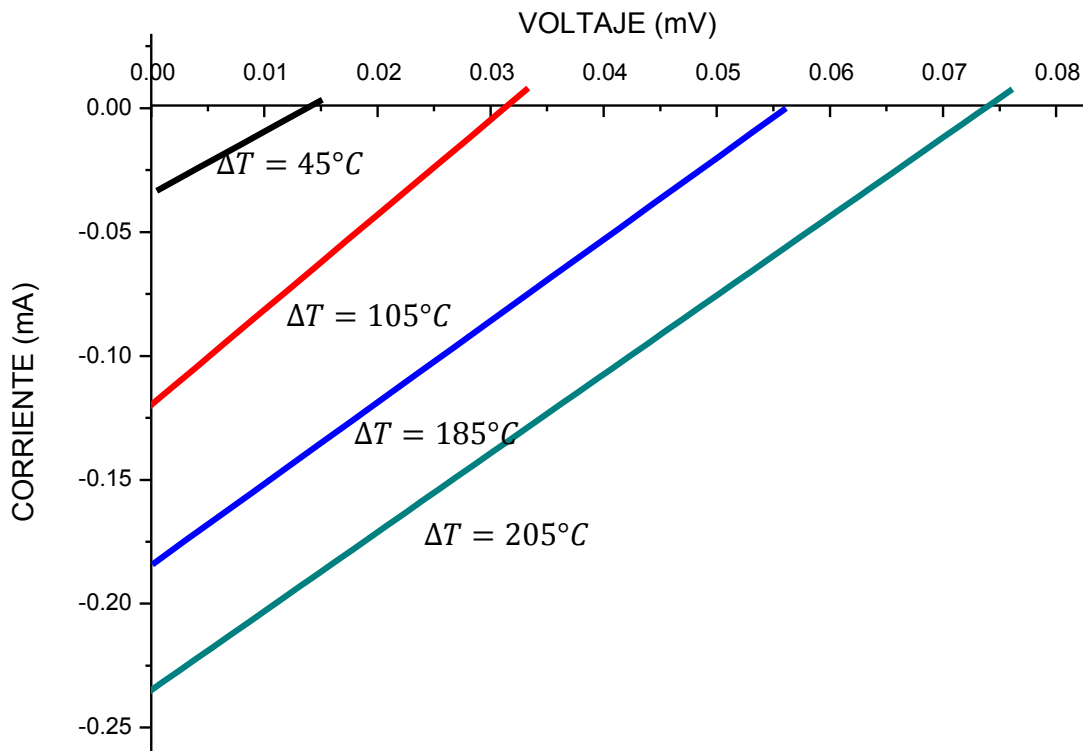


Figura. 5.3 Familia de curvas I-V de la CT para diferentes gradientes de temperatura.

Tabla 5-1. Valores obtenidos de la corriente, voltaje y potencia generada por una CT de 128 pares termoeléctricos

$\Delta T$ (°C)	$I_{SC}$ m(A)	$V_{OC}$ (mV)	$R_i$ ( $\Omega$ )	Potencia (mW)
45	33	14	0.466	0.11
105	120	31	0.258	0.93
185	180	55	0.305	2.47
205	230	74	0.329	4.25

En la figura 5.4 se presenta la gráfica obtenida para la corriente de circuito cerrado ( $I_{sc}$ ) vs los gradientes de temperatura de la CT.

En la figura 5.5 se muestra la gráfica de voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la CT vs los gradientes de temperatura.

La gráfica de resistencia interna ( $\Omega$ ) de la CT vs los gradientes de temperaturas se observan en la figura 5.6.

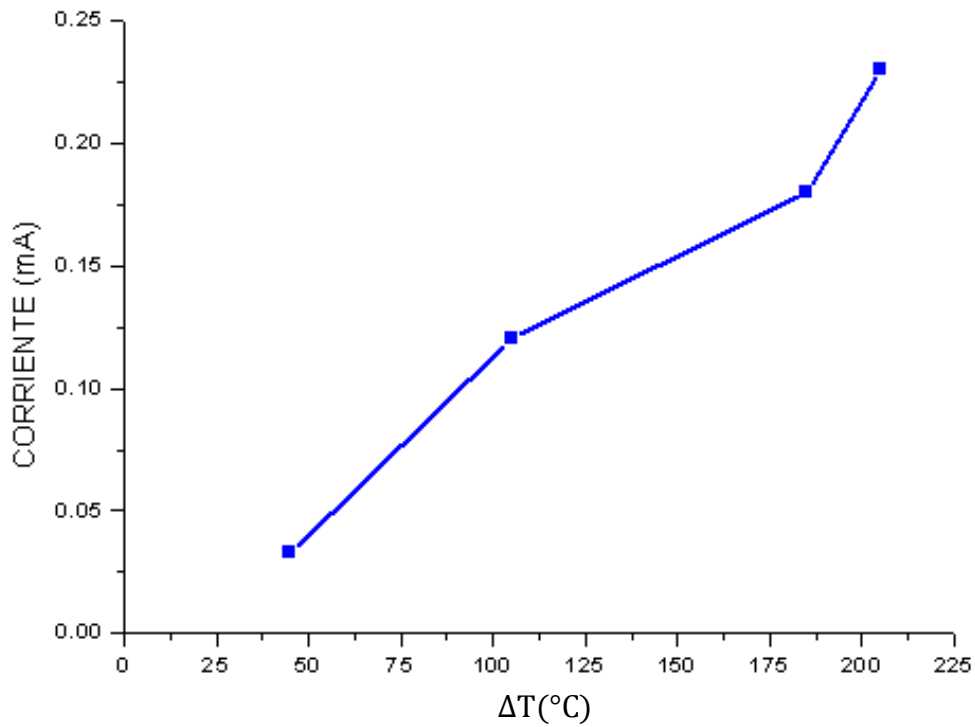


Figura 5.4. Gráfica de corriente de circuito cerrado ( $I_{sc}$ ) vs gradiente de temperatura  $\Delta T$  de la CT.

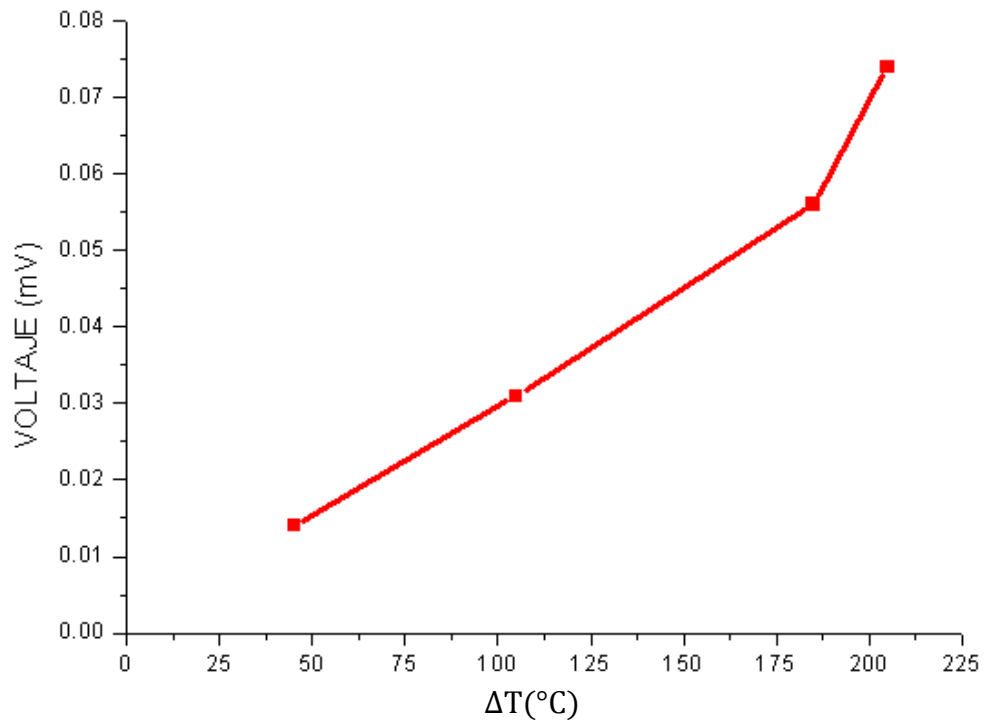


Figura 5.5. Gráfica de voltaje de circuito abierto vs gradiente de temperatura  $\Delta T$  de la CT.

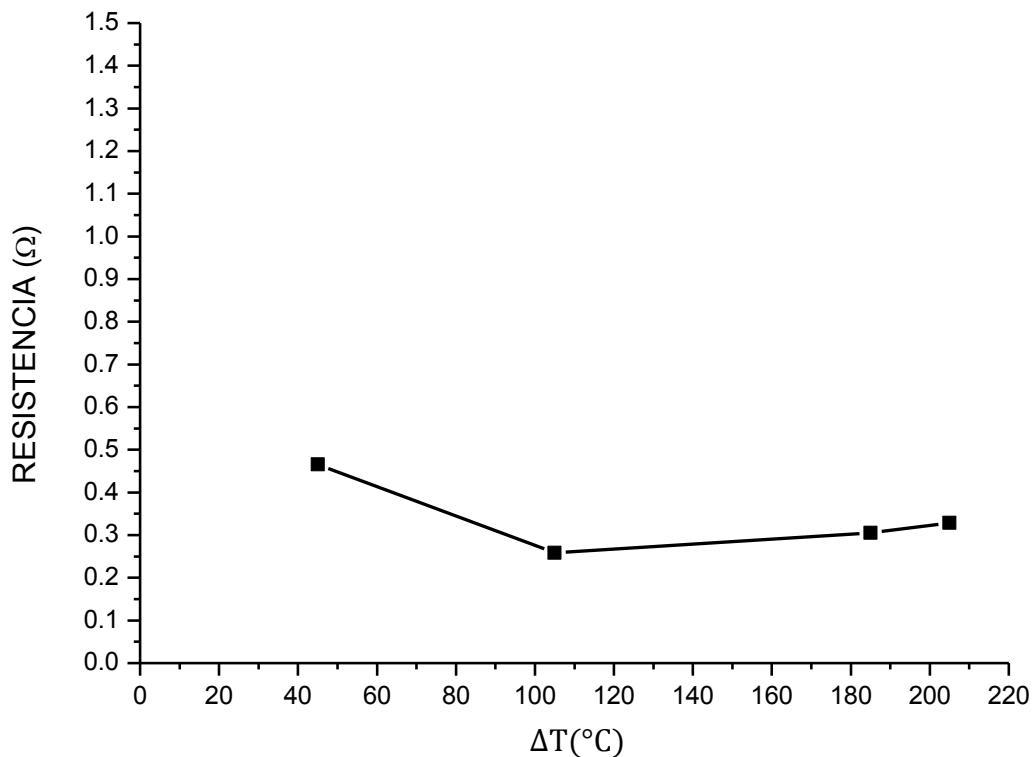


Figura 5.6. Gráfica de resistencia interna ( $\Omega$ ) vs gradiente de temperatura  $\Delta T$  de la

Se sabe que, para que un generador de potencia eléctrica entregue la potencia máxima de carga, este debe trabajar en la condición de máxima transferencia de potencia; es decir, se requiere determinar el punto de operación óptimo de la CT. Este punto se presenta en un valor intermedio entre la condición de voltaje de circuito abierto y el caso que corresponda a la corriente de corto circuito respectivamente. La potencia óptima se alcanza en el punto que define la condición de un medio del voltaje de la CT y un medio de corriente, esto se muestra en la figura 5.7 donde se presenta la familia de curvas paramétricas P-V y sus diferentes gradientes de temperatura.

Para obtener la eficiencia de la CT en diferentes puntos de operación; se calculó la razón de la energía eléctrica generada entre la potencia térmica aplicada a la CT. Para el caso particular del mayor gradiente de temperatura; se alcanzó una corriente de 230 mA y un voltaje de 74 mV; esto corresponde a una potencia máxima de 4.25 mW y una eficiencia de 0.0023%, para un  $\Delta T = 205^\circ\text{C}$ . La baja eficiencia en la conversión de energía, se atribuye a la alta conductividad térmica de la CT y a los posibles corto circuitos de algunos elementos termoelectrónicos; incluso, se le puede atribuir también a soldaduras frías entre los elementos, lo cual aumenta la resistencia interna de la CT. El calor aplicado a la CT se calculó mediante la ecuación 2.6. La figura 5.8 muestra la eficiencia de la CT para diferentes gradientes de temperatura. Los puntos de operación de la CT para cada caso, corresponden a la condición de máxima transferencia de potencia.

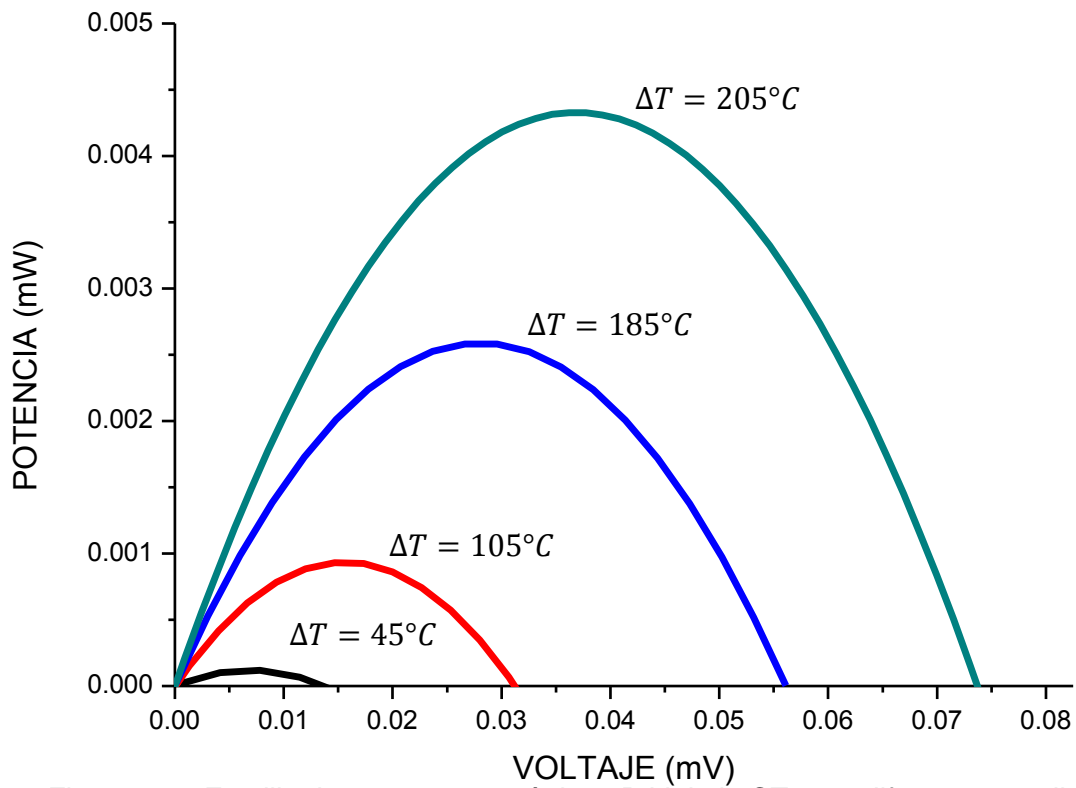


Figura 5.7. Familia de curvas paramétricas P-V de la CT para diferentes gradientes de temperatura.

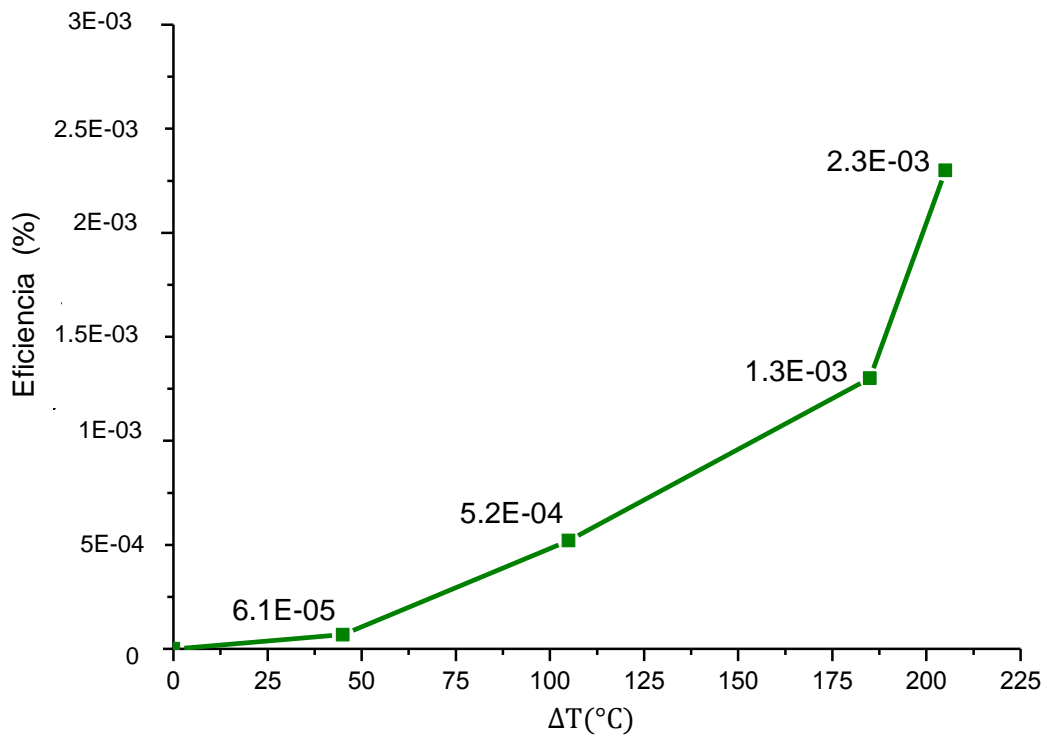


Figura 5.8. Gráfica de eficiencia térmica de la CT.

# Conclusiones

Al término de este trabajo, el cual comenzó desde el diseño y construcción de la CT, llegando a pruebas experimentales, llevó mucho ingenio, creatividad y tiempo. A continuación se presentan las conclusiones.

Se diseñaron y construyeron los equipos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo, anteriormente descritos; como el horno para soldado de los alambres de la CT, los sistemas de caracterización térmica y eléctrica, donde, se probó el funcionamiento de la CT, y el módulo trazador de curvas para obtener la familia de curvas I-V de la CT.

Las pruebas experimentales realizadas a la CT en laboratorio mostraron que, la CT genera una potencia eléctrica que se incrementa exponencialmente con el aumento en el gradiente de temperatura; de las curvas obtenidas se observa que hay una generación de corriente de 230 mA un voltaje de 74 mV una potencia eléctrica máxima de 4.25 mW y una eficiencia del 0.0023%.

Los resultados de las pruebas ponen de manifiesto que el comportamiento de la corriente y del voltaje generado por la CT es una función lineal del gradiente de temperatura, esto permite visualizar que se puede incrementar la potencia máxima generada, optimizando los contactos, el soldado entre los elementos termoeléctricos, el ensamble y mejorando la conductividad térmica de la CT.

Por último cabe mencionar que este trabajo fue en la búsqueda de una nueva forma de estructura en celdas termoeléctricas para la generación de energía eléctrica renovable a partir de calor residual y probable radiación solar concentrada. Así considerar este trabajo como una innovación segura que no impacta al medio ambiente, el camino por recorrer en el perfeccionamiento de este tipo de celdas las cuales son viables, está en marcha, debido a los avances presentados en este trabajo así como en los que lo preceden y los que en un futuro se logren.

## Referencias

- [1] <http://calentamientoglobalclima.org/>, Septiembre 2015.
- [2] L.M, Romero, Desarrollo de un Generador Fotovoltaico Empleando Radiación Solar Concentrada, Tesis de Licenciatura BUAP, Marzo 2010.
- [3] Sandra Jiménez X., J. Guillermo Pérez L., J. Luis Sosa S., Salvador Alcántara I., Blanca S. Soto C, "Caracterización térmica y eléctrica de un mini refrigerador fabricado con celdas termoeléctricas", Memorias de la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar, pp.1-4, Guanajuato, Gto, México, 2010.
- [4] G. Nolas, J. Sharp, H. Goldsmid, Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Development, Springer Series in Materials Science, 2001.
- [5] G. Pérez, C. Rickenstorff y C. Yllescas. "Caracterización de diferentes pares termoeléctricos." *Memorias de la XXX Semana Nacional de Energía Solar*, Veracruz, Ver., México, 2 al 6 de octubre de 2006.
- [6] Leninn Conrado Yllescas Calderón, Evaluación del desempeño de un generador termoeléctrico empleando concentración solar. Tesis de Licenciatura, Buap, 2009.
- [7] Thermo-ElectricGenerators. <http://thermalforce.de>.
- [8] G. Nolas, J. Sharp, H. Goldsmid, Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Development, Springer Series in Materials Science, 2001.
- [9] Eddie, "Gas Shack Warmer", *Ragchew Bi-monthly newsletter for the Worthing and District Amateur Radio Club*, March/April 2007
- [10] Gerald Mahan, Sales Brian, Jeff Sharp, Thermoelectric materials: New approaches to an old problem, *Physics Today* 20 (1997) 42-47.
- [11] Isaías Domingo Villaverde Ortiz, Diseño, Construcción y Prueba de un Generador Termoeléctrico Solar de Cromel –Alumen. Tesis de Licenciatura. Buap, 2005.

- [12] <http://www.sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=2673>, Septiembre 2015.
- [13] Ramos Gutiérrez Leonardo Jesús., Montenegro Frago Manuel., “la generación de energía eléctrica en México” XXII Congreso Nacional de Hidráulica.
- [14] Instituto de transculturación ambiental y energías renovables, curso de inducción.
- [15] <http://www.eoi.es/blogs/alfonsomedal/2012/06/22/potencial-de-desarrollo-de-la-tecnologia-solar-fotovoltaica-y-termosolar-y-zonas-de-implantacion-a-nivel-mundial/> Septiembre 2015.
- [16] José G. Pérez L., Sandra Jiménez X., Salvador A. Iniesta, José L. Sosa-Sánchez, Javier Martínez J., “Generador fotovoltaico-termoeléctrico usando radiación solar concentrada”, 5<sup>th</sup> International Conference on Energy Sustainability, Grand Hyatt, Washington DC, 2011
- [17] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa. Mc Graw Hill 4<sup>a</sup>. Ed. 2011
- [18] Frank Kreith, Raj M. Manglik Mark S. Bohn, Principios de transferencia de calor. Cengage Learning. 7<sup>a</sup>. Ed. 2013.
- [19] Sears, Zemansky, Young & Freedman Física Universitaria. Pearson. 12<sup>a</sup>. Ed. 2009.
- [20] Mark Waldo Zemanski, Calor y termodinámica. Ed. Aguilar. Madrid, 5<sup>a</sup>. Ed, 1973.
- [21] Stanley W. Angrist. Direct Energy Conversion. Fourth Edition, Boston Allyn and Bacon, 1982.
- [22] Robert L. Powell et al., *Thermocouple reference tables based on the ipt-68*, Ed. Omega, Stanford, conn., 1975.

- [23] Sandra Jiménez X., Yasuhiro Matsumoto K., Desarrollo e implementación de una celda termoeléctrica, empleando placas de aluminio.” Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CINVESTAV-IPN Julio 2014.

# APÉNDICE A

## Análisis de un generador termoeléctrico

### Distribución de temperatura y transferencia de energía térmica

De acuerdo a la literatura de Stanley W. Angrist, capítulo 4 pág-175 [21]. Para realizar el estudio de la distribución y transferencia de energía térmica, se considera solo una sección de cualquiera de los conductores que conforma el dispositivo termoeléctrico semiconductor, como se muestra en la figura A1, de tal manera que solo tenemos una barra sometida a un gradiente de temperatura en la cual circula una corriente eléctrica. Suponemos que la corriente y la temperatura tienen componentes únicamente en la dirección de  $x$ .

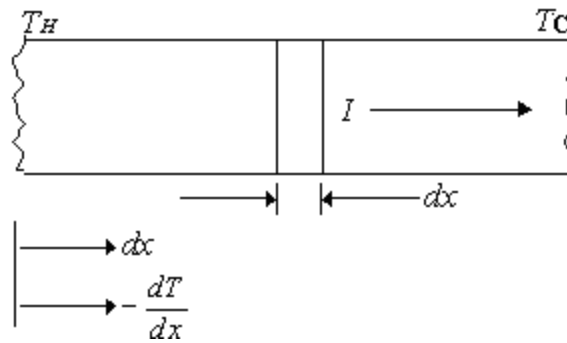


Figura. A.1 Esquema de una barra transportando una corriente eléctrica en presencia de un gradiente de temperatura.

El calor entrante en la cara izquierda de la barra de acuerdo a las leyes de Fourier es:

$$-\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{A.1}$$

El calor que sale en la sección transversal derecha de la barra es la conductividad multiplicada por el gradiente de temperatura en la cara derecha, [21]

$$-\lambda \left[ \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx \right] \quad \text{A.2}$$

El calor de Joule generado en el volumen es,

$$J^2 \rho dx \quad \text{A.3}$$

De esta manera, el calor que sale del elemento deberá ser igual al calor que entra, más el calor generado internamente en el elemento por el efecto Joule

$$\lambda \left( \frac{d^2 T}{dx^2} \right) + J^2 \rho = 0 \quad \text{A.4}$$

La solución de esta ecuación se encuentra bajo la condición de frontera de  $T = T_C$  en  $X = L$  y  $T = T_H$  en  $X = 0$  es:

$$T = [T_H - (x/l)\Delta T] + \left[ \frac{J^2 \rho}{2\lambda} \right] x(l - x) \quad \text{A.5}$$

La magnitud de la primera parte puede encontrarse por la aplicación de las ley de Fourier para la conducción de calor. Por tanto, el calor que entra o sale de la unión se obtiene derivando la ecuación A.5 con respecto a  $x$  y, multiplicando por el área de la sección transversal de los elementos y la conductividad térmica. Así, en la unión caliente,  $x = 0$ ; por tanto el término de Fourier es igual a:

$$-A\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right| = \gamma \lambda \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R \quad \text{A.6}$$

dónde  $\gamma = A/l$ . En la unión fría, el calor que sale debido al gradiente de temperatura se incrementa de acuerdo a la expresión:

$$-A\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right| = \gamma \lambda \Delta T + \frac{1}{2} I^2 \rho / \lambda \quad \text{A.7}$$

Se puede ver entonces que en el extremo de la barra caliente, la transferencia de calor disminuye a una mitad del calor de Joule fluyendo desde la fuente. En el lado frío de la barra, el término de conducción usual se ve incrementado por una mitad del calor de Joule fluyendo hacia el sumidero. Esta división del calor de Joule es una consecuencia de la distribución de temperatura, tal como está dada por la ecuación A.5 y no involucra el calor que fluye por encima del gradiente de temperatura. Este factor vuelve a facilitar el entendimiento del fenómeno en una barra si consideramos que el flujo de calor de Joule fluye a lo largo de su propio gradiente de temperatura.

## Eficiencia térmica de un generador termoeléctrico

La eficiencia térmica de un generador formado por una sola unión, estará dada por:

$$\eta_t = P_O/q_H \quad A.8$$

En esta expresión, la entrada de calor en la unión caliente está dada por la ecuación A.6, más el efecto Peltier, de este modo se obtiene:

$$q_H = K\Delta T + \alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R \quad A.9$$

donde  $K$  es la conductancia térmica y  $R$  es la resistencia eléctrica, dichos parámetros están definidos como:

$$K = \kappa_n A_n / l_n + \kappa_p A_p / l_p = \kappa_n \gamma_n + \kappa_p \gamma_p \quad A.10$$

y

$$R = \rho_n / \gamma_n + \rho_p / \gamma_p \quad A.11$$

Tomando en cuenta que la corriente eléctrica hacia la unión caliente va del material tipo n al tipo p, al contrario de la definición expuesta en la ecuación A.9 con el signo menos, el término de Peltier debe llevar un signo más. El efecto Peltier causa la absorción de calor adicional en la fuente, mientras que un medio del calor Joule es retornado hacia la fuente.

Por otra parte la potencia de salida  $P_O$  es la potencia disipada en la carga y está dada por el cuadrado de la corriente multiplicada por la resistencia de carga  $R_O$

$$P_O = I^2 R_O \quad A.12$$

El voltaje de circuito abierto es  $\alpha\Delta T$ , de esta manera, la corriente eléctrica extraída del generador es:

$$I = \frac{\alpha\Delta T}{R + R_o} \quad A.13$$

La eficiencia térmica puede ser calculada a partir de 2.15, de esta forma tenemos:

$$\eta_t = \frac{I^2 R_o}{K\Delta T + \alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R} \quad A.14$$

En términos generales es deseable maximizar la eficiencia térmica tanto como sea posible. La viabilidad de hacer esto llega a ser más clara si introducimos una variable nueva  $m$ , la cual representa la razón de la resistencia de carga a la resistencia interna del dispositivo; es decir:

$$m = R_o/R \quad A.15$$

De esta forma, la ecuación. A.14 en términos de  $m$  queda:

$$\eta_t = \frac{m(\Delta T/T_H)}{\frac{(1+m)^2}{T_H} \cdot \frac{RK}{\alpha^2} + (1+m) - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_H}} \quad A.16$$

En esta expresión se observa la aparición del producto  $RK$  en el denominador. Si todos los términos se conservan constantes, cuanto más bajo es el valor de  $RK$ , tanta mas alta es la eficiencia.

Por tanto, para  $RK$  definida como:

$$RK = \kappa_n \rho_n + \kappa_n \rho_p (\gamma_n/\gamma_p) + \kappa_p \rho_n (\gamma_p/\gamma_n) + \kappa_p \quad A.17$$

Este producto se puede minimizar derivando la ecuación anterior con respecto a  $\gamma_n/\gamma_p$ , e igualando el resultado a cero; de esta forma se tiene:

$$(RK)_{min} = \left[ (\rho_n \kappa_n)^{1/2} + (\rho_p \kappa_p)^{1/2} \right]^2 \quad A.18$$

En esta expresión se está considerando brevemente, la agrupación de propiedades conocidas como la figura de mérito. Esta agrupación se relaciona con aquellas propiedades que son importantes en el diseño de un generador termoeléctrico.

$$Z = \frac{\alpha^2}{RK} \quad A.19$$

Utilizando el valor mínimo del producto  $RK$  dado en la ecuación A.18, encontramos el valor máximo de la figura de mérito para cualquier combinación de materiales tipo n y tipo p de la siguiente manera:

$$Z^* = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)^2}{\left[ (\rho_n \kappa_n)^{1/2} + (\rho_p \kappa_p)^{1/2} \right]^2} \quad A.20$$

Sustituyendo A.19 en A.16 tenemos el rendimiento térmico de un generador termoeléctrico, para una geometría mejorada y queda definido por la expresión:

$$\eta_t = \frac{m(\Delta T/T_H)}{\frac{(1+m)^2}{Z^*T_H} + (1+m) - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_H}} \quad A.21$$

El valor de la razón de resistencias  $m$  que maximiza el rendimiento, se encuentra derivando la ecuación A.21 con respecto a  $m$  e igualando a cero. De esta forma obtenemos:

$$m_{opt} = (1 + ZT_{AV})^{1/2} \quad A.22$$

donde  $T_{AV} = \frac{1}{2}(T_C + T_H)$ . El rendimiento térmico para la resistencia de carga mejorada se obtiene sustituyendo la ecuación A.22 en la ecuación A.21, la expresión resultante es:

$$\eta_{t(máx)} = \frac{(m_{opt}-1)(\Delta T/T_H)}{m_{opt}+T_C/T_H} \quad A.23$$

## **APÉNDICE B**

### **PLANOS DE LOS ELEMENTOS PARA FABRICACIÓN DE LA CELDA TERMOELÉCTRICA**

#### **Circuito impreso en PCB**

Se muestra en B.1 las dimensiones de un circuito impreso elaborado en una PCB, la cual fue perforada 256 veces con una broca de 0.9 mm. Esta PCB funciona como guía para la elaboración de los elementos de pulido y horneado.

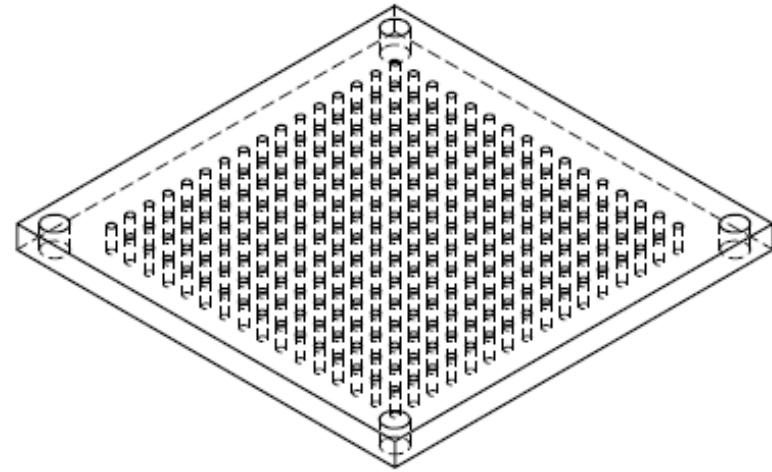
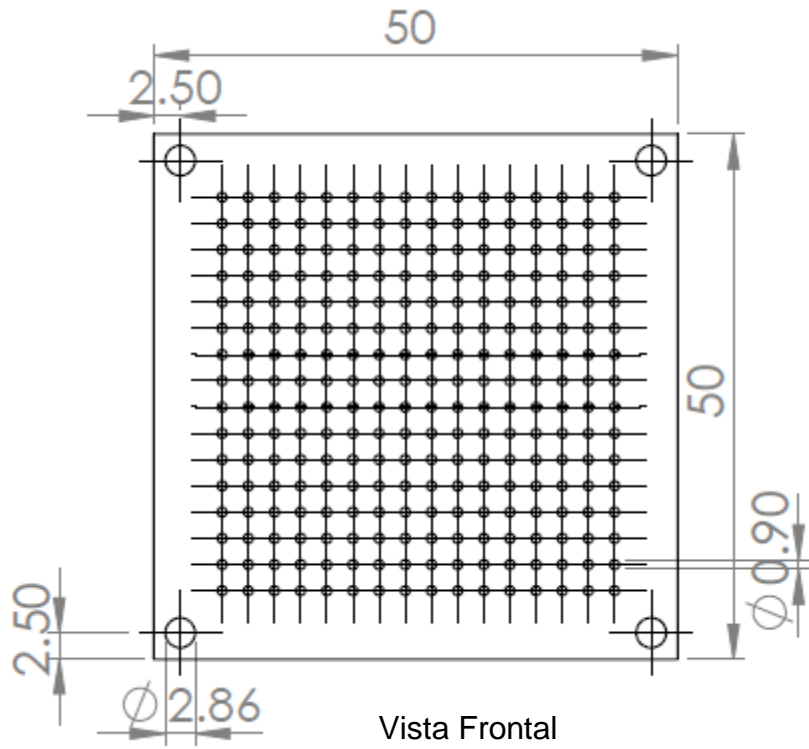
#### **Placa de pulido**

Una vez terminado el circuito impreso B.1, se utilizó de guía para perforar un pedazo de aluminio, que funciona como placa de pulido para alambres. En B.2 se muestra el diseño de la placa de pulido y en B.2.1 se muestran de las dimensiones de las piezas utilizadas en la placa.

#### **Plantilla de Teflón**

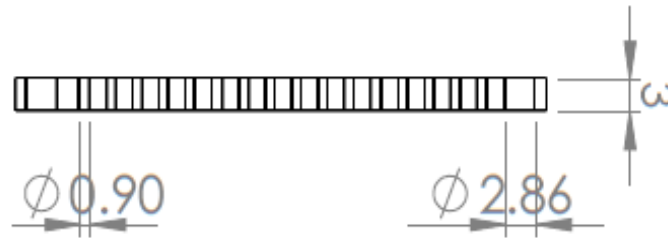
Por último en este apéndice se muestra en B.3 las dimensiones de la plantilla de teflón, la cual ayuda a soldar los alambres en el horno, funciona como guía y soporte al colocar los 256 alambres y como aislante al momento de soldar los elementos.

# B.1



Vista Isométrica

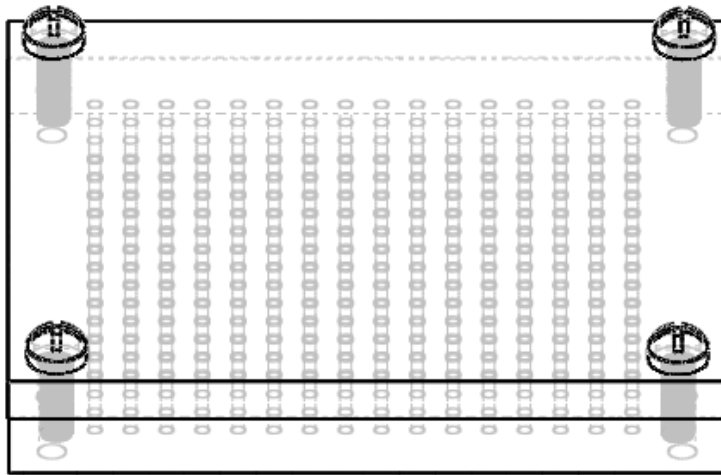
Vista Lateral



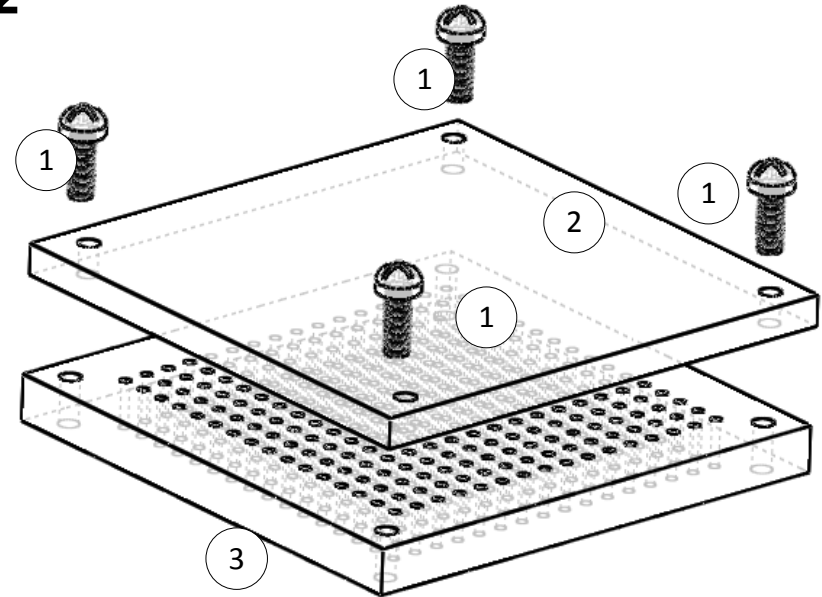
	Circuito impreso en PCB	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Baquelita de Cobre	Cotas: mm

## B.2


- 1 Tornillos
- 2 Tapa
- 3 Plantilla

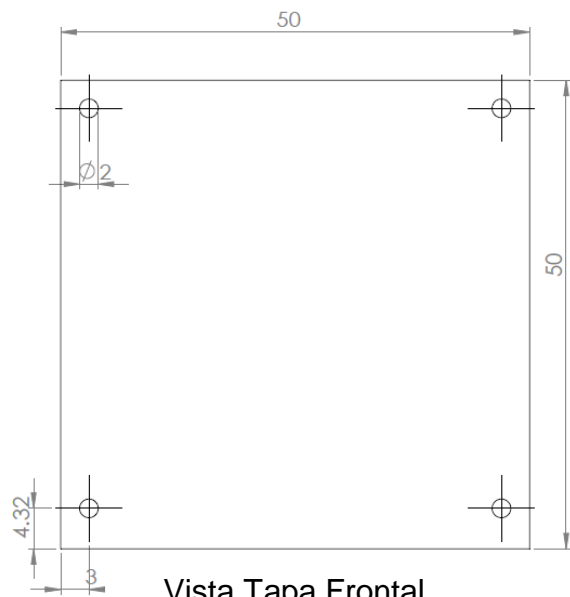


Vista Ensamblado

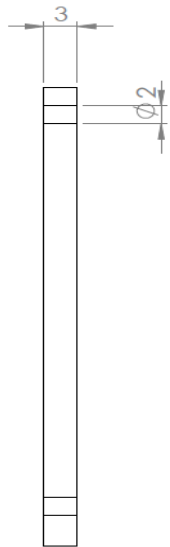


Vista Explosión

	Placa de pulido	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Aluminio	Solid Works      Hoja 1:2

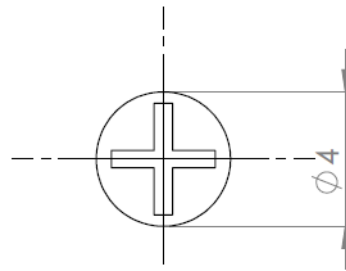


Vista Tapa Frontal



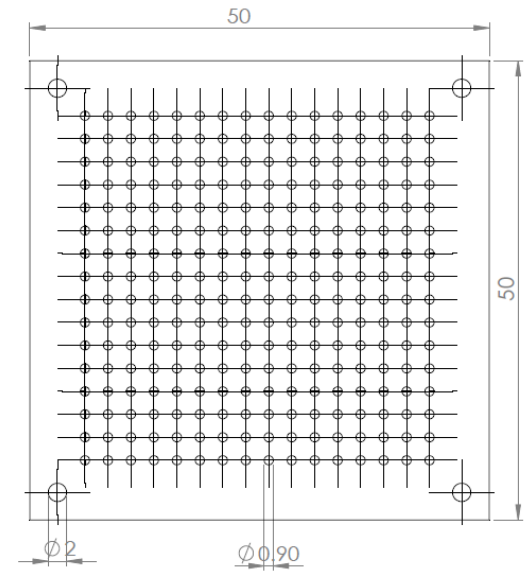
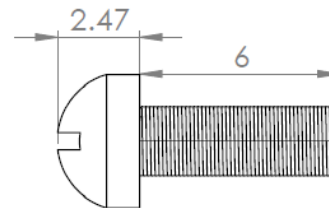
Vista Tapa Lateral

## B.2.1



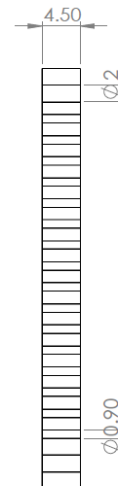
Vista Tornillo Superior

Vista Tornillo Lateral



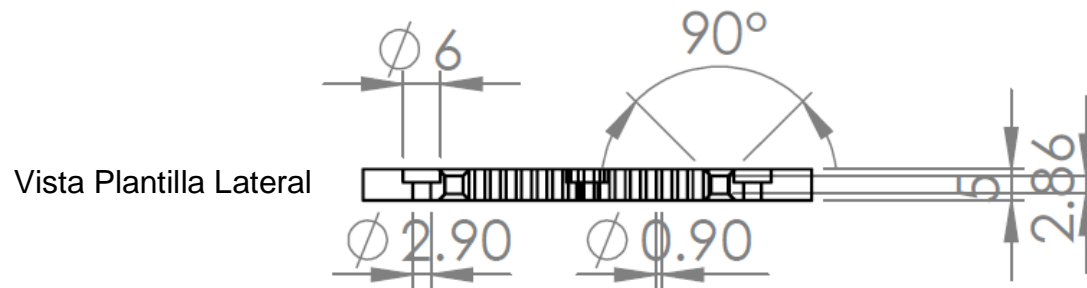
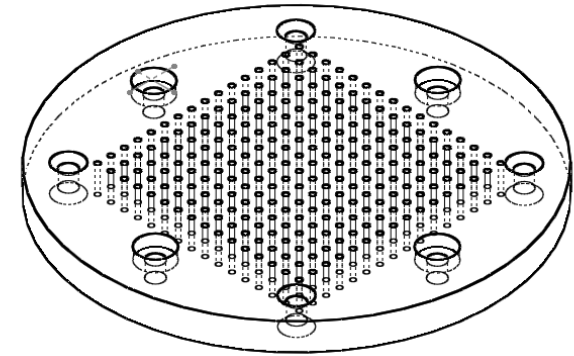
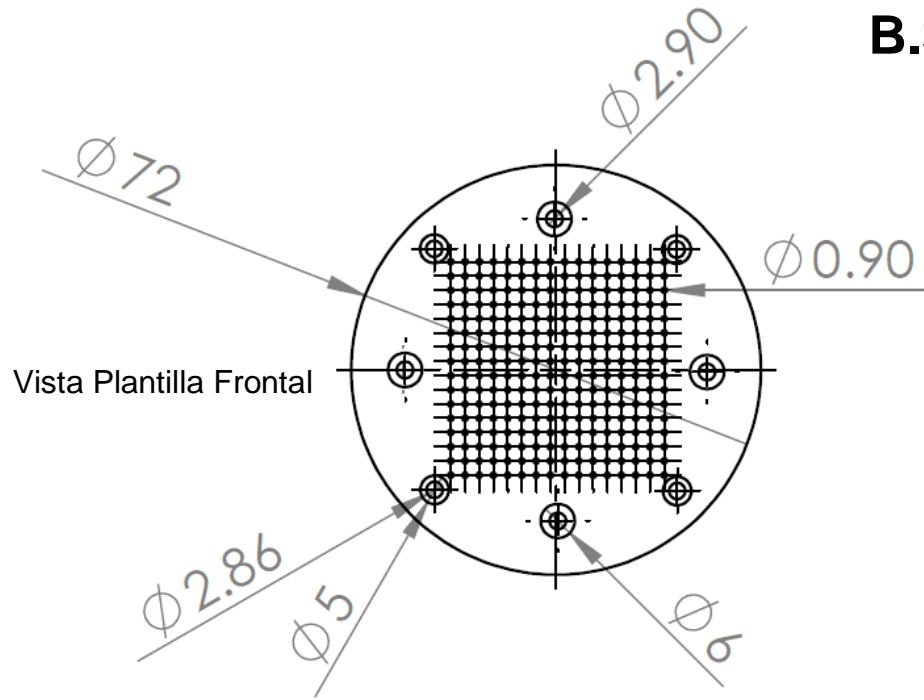
Vista placa Frontal

Vista placa Frontal



	Piezas de placa de Pulido		
	Cantidad Tapa, Plantilla: 1 Tornillo: 4	CIDS-ICUAP	
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna	
	Material: Aluminio, Inox	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">Cota: mm SolidWorks</td> <td style="text-align: center;">Hoja 2:2</td> </tr> </table>	Cota: mm SolidWorks
Cota: mm SolidWorks	Hoja 2:2		

### B.3



	Plantilla de teflón para horneado		
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP	
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna	
	Material: Teflón	SolidWorks	Cota: mm

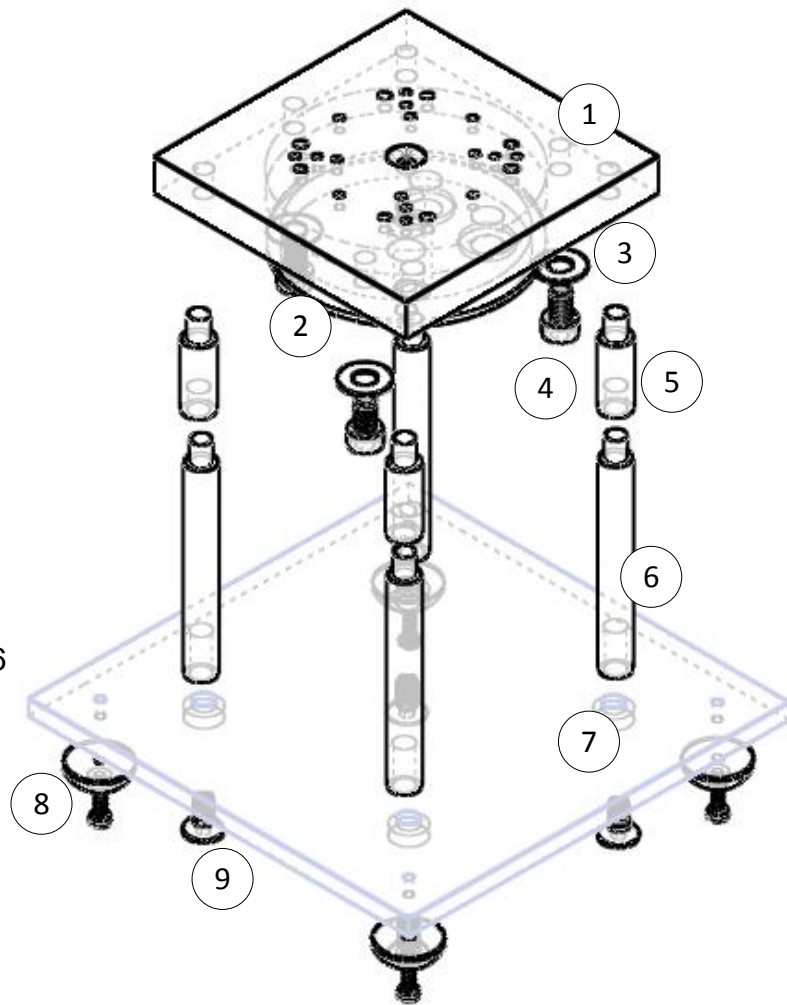
## **APÉNDICE C**

### **PLANOS DEL SISTEMA PARA SOLDAR LOS PARES TERMOELÉCTRICOS DE LA CT.**


En este apéndice se muestran los planos y dimensiones del sistema para soldar, elaborado en su mayoría de aluminio, en C.1 se muestran todas las piezas del sistema, teniendo el plano del sistema en explosión y se describen las partes que lo componen. En C1.1 se observan las dimensiones de la placa superior e inferior, en la placa superior se encuentra la resistencia que genera al calentamiento para el soldado de los elementos termoeléctricos al conectarla a la línea de 120v, esta placase encuentra aislada del resto del sistema por 4 soportes de teflón, estos, así como las piezas restantes del sistemas se encuentran dimensionadas en C1.2.

# C.1

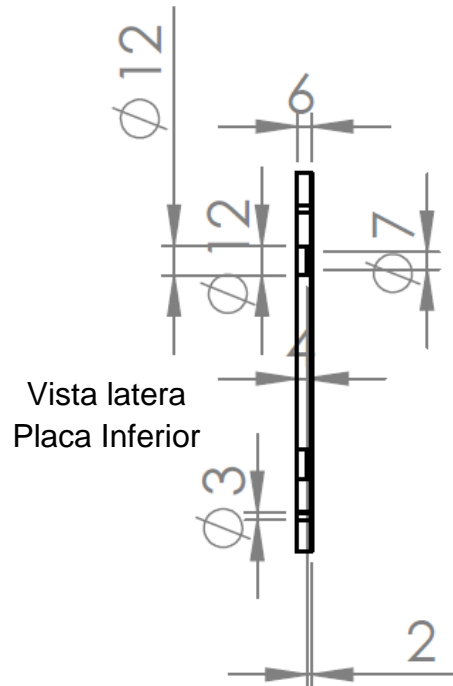
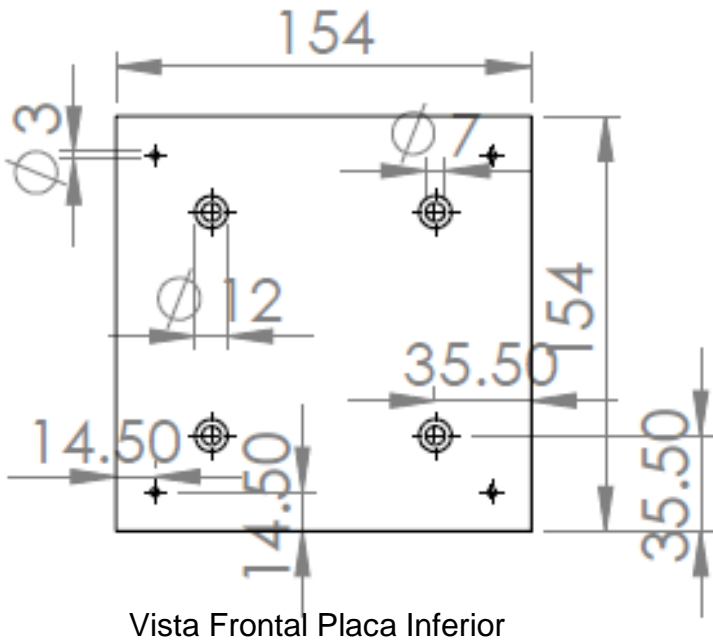
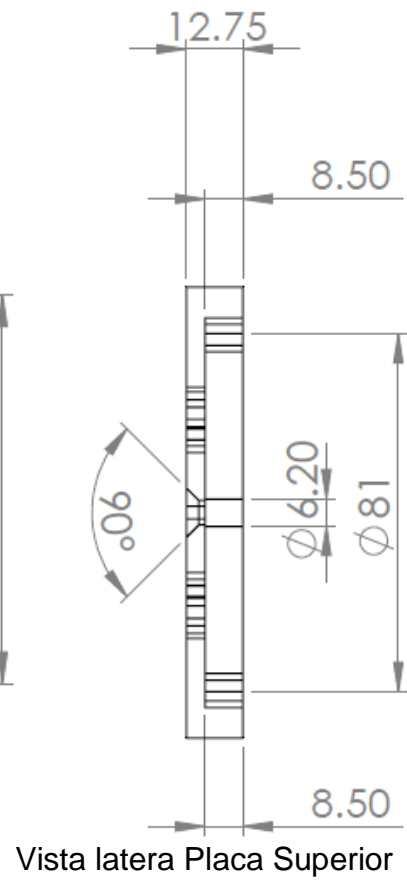
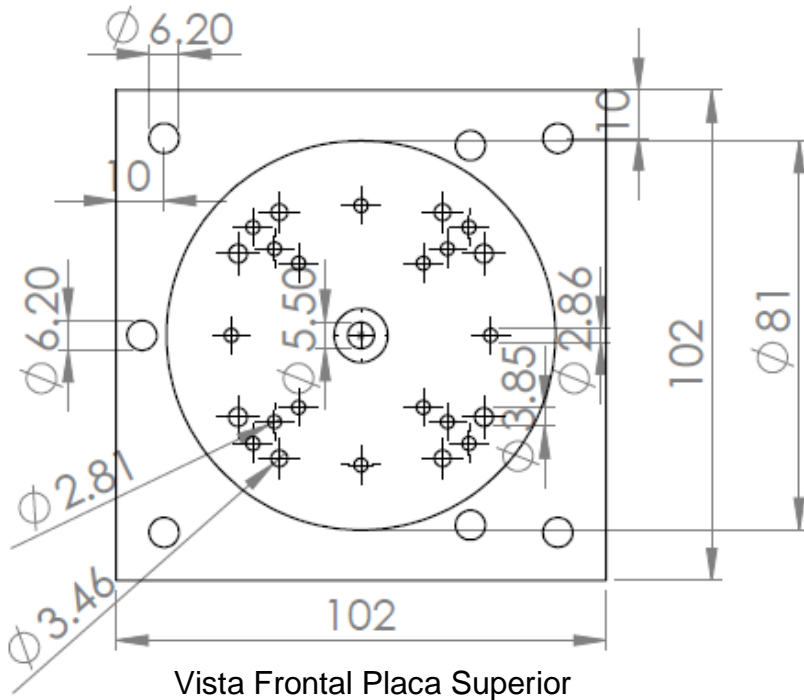
- 1 Placa Superior
- 2 Resistencia
- 3 Rondana
- 4 Tornillo M6
- 5 Soporte de Teflón
- 6 Soporte de Aluminio
- 7 Placa Inferior
- 8 Goma con tornillo
- 9 Tornillo de Ángulo M6




Vista Explosión

	Sistema de soldado en explosión	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Aluminio, Teflón	SolidWorks Hoja 1

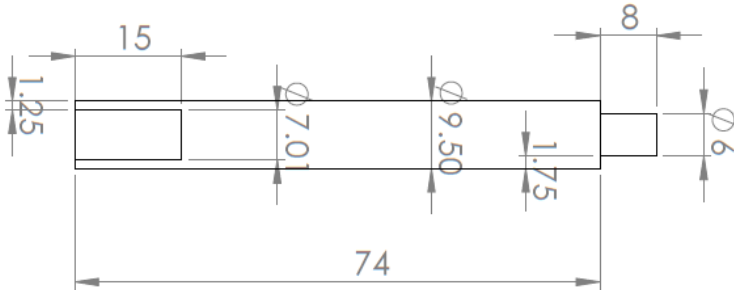
# C.1.1



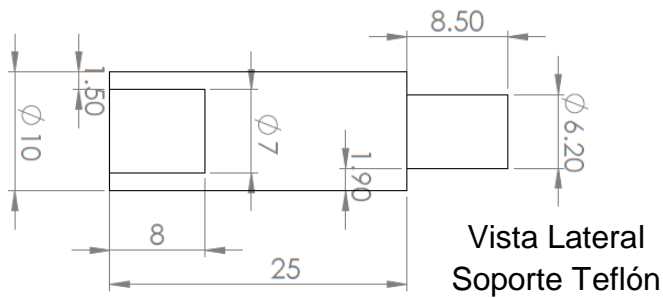
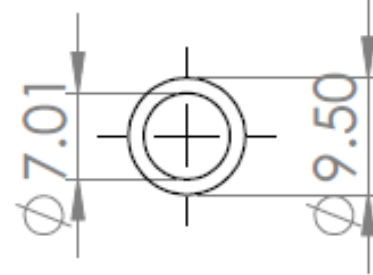
	Placa Superior e Inferior	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Aluminio	SolidWorks Cota: mm
		Hoja 2

# C.1.2

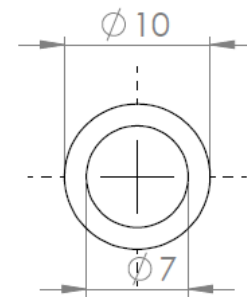
Vista Lateral  
Soporte Aluminio



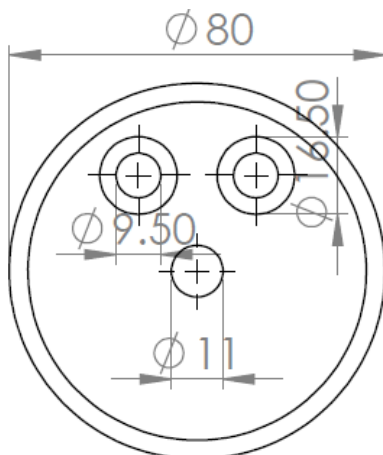
Vista Inferior  
Soporte Aluminio



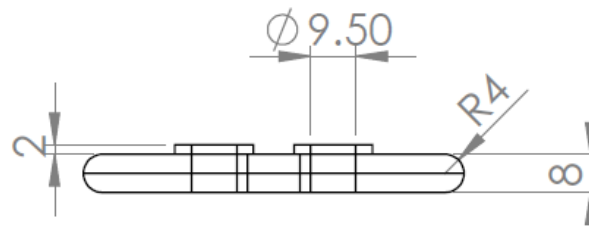
Vista Lateral  
Soporte Teflón




Vista Inferior  
Soporte Teflón



Vista Frontal  
Resistencia



Vista lateral  
Resistencia

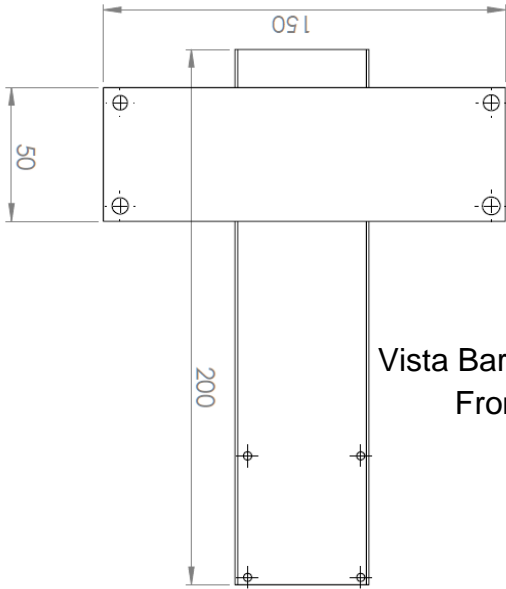
	Piezas del sistema de soldado			
	Cantidad: Resistencia 1 Soporte Aluminio y Teflón 4	CIDS-ICUAP		
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna		
	Material: Aluminio, Teflón	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>SolidWorks</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">Hoja 3</td> </tr> <tr> <td>Cota: mm</td> </tr> </table>	SolidWorks	Hoja 3
SolidWorks	Hoja 3			
Cota: mm				

## **APÉNDICE D**

### **PLANOS DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA**

Aquí se muestra los planos del sistema de caracterización eléctrica de la CT. En D.1 se muestran las dimensiones de las piezas que forman el sistema. El equipo se construyó con el objetivo de generar el gradiente de temperatura a la CT y poder conectar la CT fijada en el sistema al MTC con el objetivo de visualizar las curvas I-V. El calefactor hecho de aluminio en donde se encuentra insertada la resistencia, es quien le transmite el calor a una cara de la CT, la barra de cobre funciona como sumidero y es quien mantiene frío el lado posterior de la CT generando así los gradientes de temperatura. El teflón como ya se mencionó funciona como aislante térmico y soporte en el sistema.

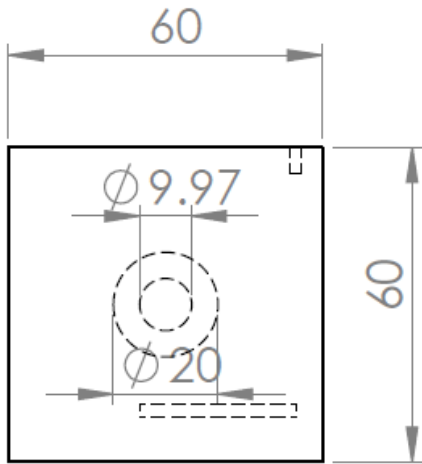
# D.1



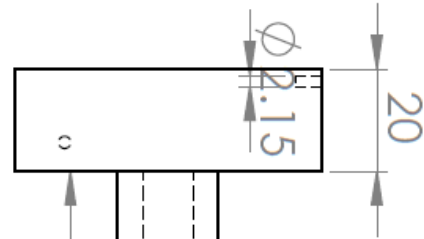
Vista Barra Cobre Frontal



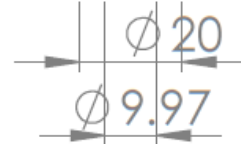
Vista Barra Cobre Lateral




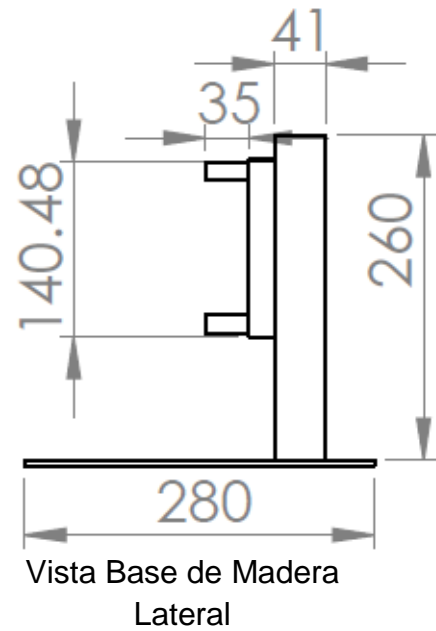
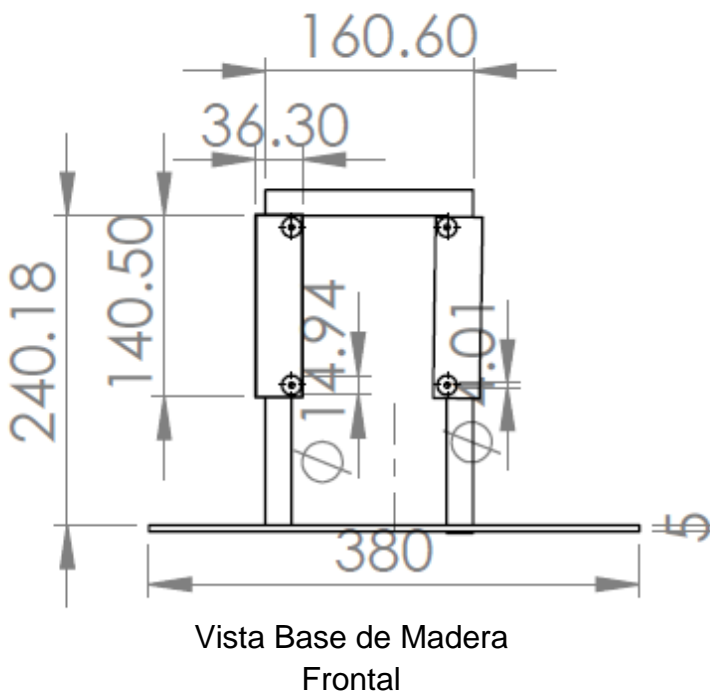
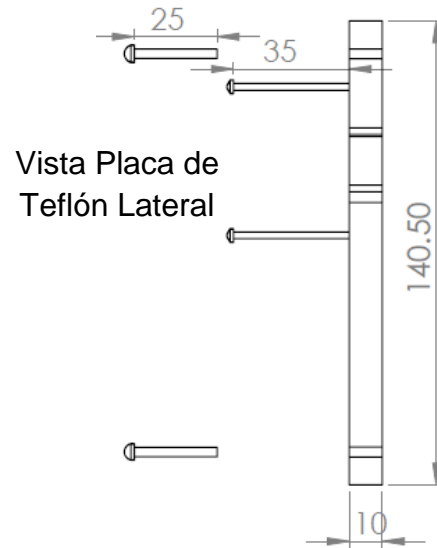
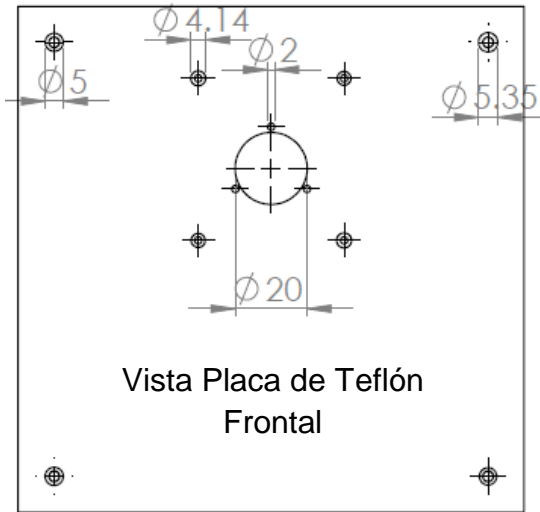
Vista Calefactor Frontal



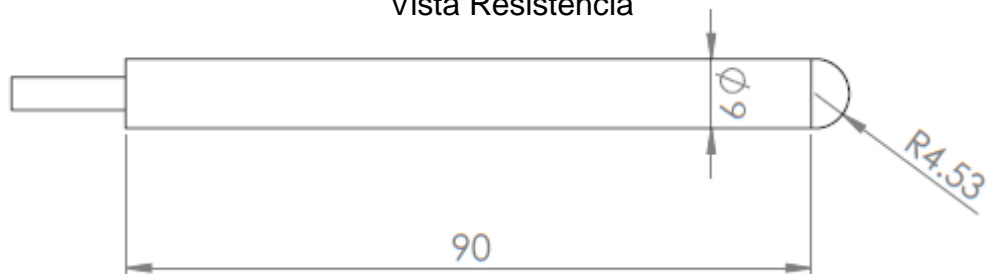
Vista Calefactor Lateral



	Piezas del sistema de caracterización eléctrica	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Aluminio, Cobre	SolidWorks Hoja 1:2



Vista Resistencia



	Piezas del sistema de caracterización Base, Teflón y Resistencia	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: Mario C. Acosta	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	Material: Madera, Teflón	SolidWorks Hoja 2:2

# Apéndice E

## MÁQUINA CORTADORA DE ALAMBRE

La máquina cortadora se muestra a continuación en la figura E1. La capacidad de la máquina es cortar los alambres a diferentes medidas 3, 5 y 7 milímetros de largo. Con esto se obtiene el material necesario para la construcción de termopares y la construcción futura de celdas termoeléctricas en serie, en la figura E.2 se muestra los planos de la máquina en diferentes vistas.

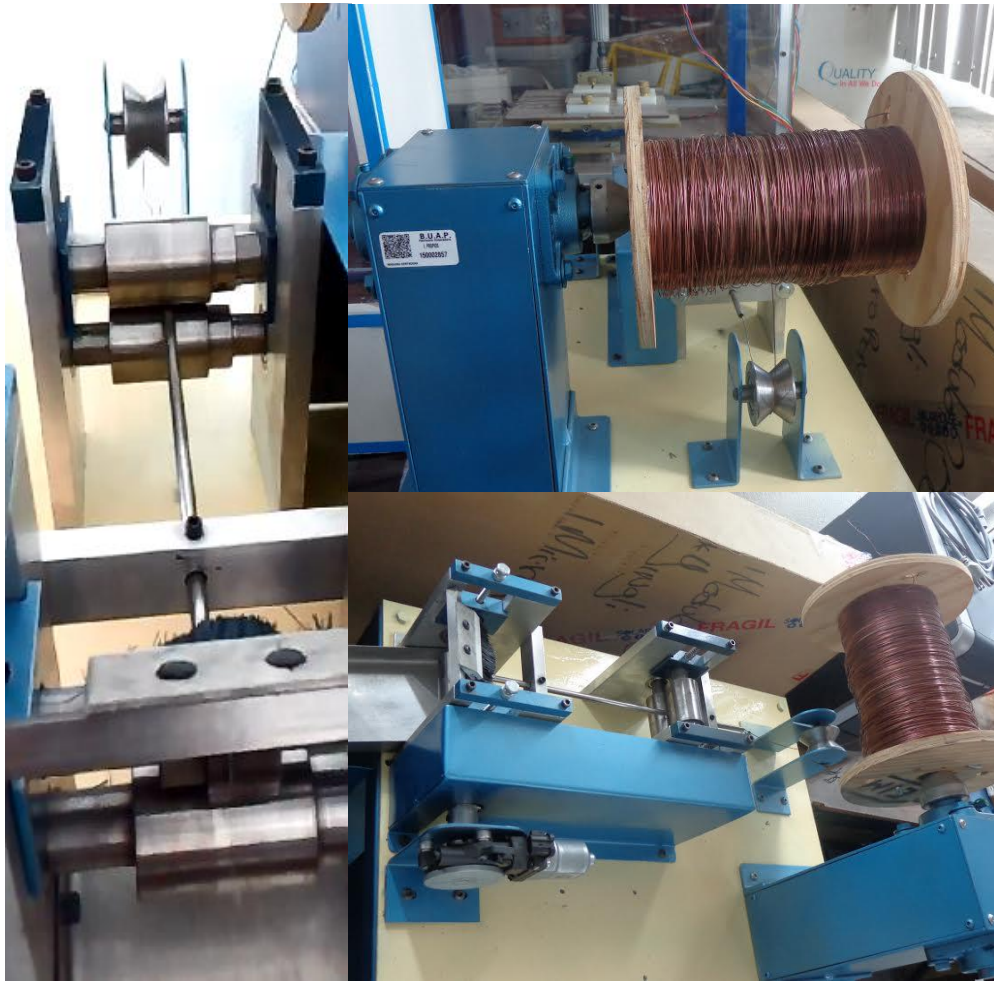
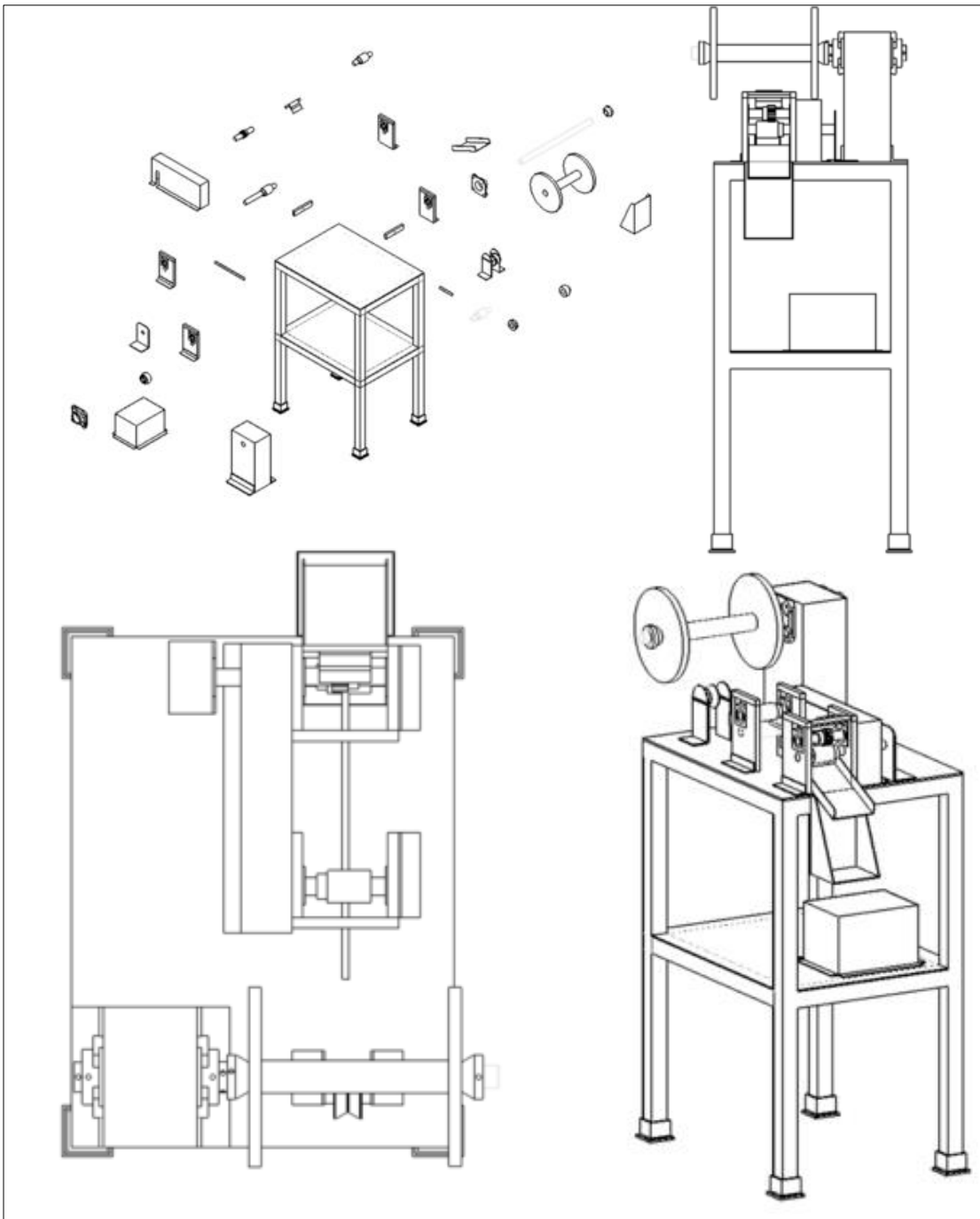


Figura E1. Máquina cortadora alambres.



	E.2 Máquina cortadora de alambres	
	Cantidad: 1	CIDS-ICUAP
	Dibujo: José Adán Lc.	Revisó: J. Guillermo P. Luna
	SolidWorks	Hoja 1