



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Estudio de los fenómenos termoeléctricos en una
celda Peltier.

TESIS

Presentada para obtener el título de
Licenciatura en Física

Presenta
Miguel Angel Nava Castro

Director de tesis: Dr. Jorge Cotzomi Paleta

Puebla, Pue.

15 de Octubre de 2021

Título: Estudio de los fenómenos termoelectricos en una celda Peltier

Estudiante: Miguel Angel Nava Castro

JURADO

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Presidente

Dr. Luis Alberto Palomino Rojas
Secretario

Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino
Vocal

Dra. Laura Alicia Paniagua Solar
Suplente

Dr. Jorge Cotzomi Paleta
Director de tesis

Agradecimientos

Los mayores agradecimientos sin duda son para mis padres quienes me apoyaron de inicio a fin, desde el día en que realice el exámen para ingresar a la institución, a mi padre Macario Nava Vazquez le agradezco y siempre recordaré el día en que me llevó hasta el lugar donde se realizó el exámen y esperar hasta terminar el exámen, le estaré agradecido por siempre, a mi madre Alicia Castro Torres por siempre estar al pendiente de mí y siempre esperarme cuando llegaba a casa, a ustedes dos les guardo un espacio muy especial y no duden en que siempre estaré para ustedes así como lo estuvieron conmigo.

A mis hermanos Luis Alberto, Alfredo, Macario Rodrigo y Luis Angel por siempre darme ese cariño y motivación que siempre sobresalió, gracias por todos los días que me sacaron una sonrisa y por hacer de mi estancia en la carrera algo más fácil de superar y sobre todo tener a alguien a quién esperar cada que llegaba a casa, sin duda fueron parte importante y lo seguirán siendo.

A Arce por acompañarme en los últimos años de la carrera, por acompañarme en momentos importantes en mi vida y sobre todo por estar conmigo aprendiendo cosas juntos y a todos mis amigos que siempre me acompañaron desde inicio a fin pese a las circunstancias cuando inició la pandemia seguimos y seguiremos en contacto, a todos ustedes Julio, Victor, Rocio, Dany, Dianita, Luis, Cornelio, Ari, Ely y a mi amiga Edith por su cariño incondicional, a todos ustedes muchas gracias por enseñarme tanto y por hacer de mi estancia en

la universidad la mejor etapa de mi vida.

A mi asesor, el Dr. Jorge Cotzomi Paleta por brindarme su apoyo y tiempo para la realización del trabajo, por el espacio que me brindó desde el servicio social, prácticas profesionales hasta el trabajo de ahora, la convivencia que tuvimos durante esos años sin duda se quedarán guardadas y al profesor Daniel Juarez sin duda por ayudarme con los aparatos del laboratorio de la facultad y por enseñarme sobre todo a trabajar duro y ser una mejor persona.

A todos ustedes, muchas gracias.

Índice general

Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos	4
2. Antecedentes Históricos	5
2.1. Termoelectricidad	5
2.2. Materiales termoeléctricos	9
3. Marco teórico	11
3.1. La celda Peltier	11
3.1.1. Efecto Thompson	14
3.1.2. Efecto Seebeck	15
3.1.3. Efecto Peltier	16
3.1.4. Efecto Joule	17
3.2. Efecto termoeléctrico	18
3.3. Conductores termoeléctricos	19
3.3.1. Conductividad térmica	20
3.3.2. Factores que influyen la conductividad térmica	20
3.4. Semiconductores	21
3.5. Características de la placa termoeléctrica TEC1-12710.	21
3.5.1. Propiedades químicas del Bismuto	22
3.5.2. Propiedades químicas del Estaño.	22
3.6. Resistencia interna de la celda Peltier	22

3.7. Estudio de los coeficientes Peltier-Seebeck	23
3.8. Celdas Peltier comerciales	24
3.8.1. Lente de Fresnel	24
3.9. Análisis teórico	25
3.10. Eficiencia Termoeléctrica	27
3.10.1. Generación de energía Termoeléctrica	28
4. Análisis teórico experimental y resultados de los efectos térmicos-eléctricos	29
4.1. Termogenerador phywe	29
4.2. Sistema térmico para el estudio del efecto Seebeck . .	34
4.3. Efecto Peltier con una celda TEC1-12710	40
4.4. Medición y obtención de los coeficientes Peltier-Seebeck	46
4.4.1. Medición de la resistencia interna de una celda TEC1-12710	48
4.5. Mecanismo del seguidor solar	49
4.5.1. ¿Cómo funciona?	51
4.6. Seguidor solar.	52
4.6.1. Prueba 2 con seguidor solar	57
4.7. La celda Peltier en condiciones normales	58
4.8. Eficiencia en la práctica	62
5. Conclusiones	65
Apéndice	67

Índice de figuras

3.1.1.Celda Peltier	11
3.1.2.Vista interior de un módulo Peltier	12
3.1.3.Efecto Thompson	15
3.1.4.Termopar	16
3.1.5.Efecto Peltier	17
3.1.6.Efecto Joule	18
3.2.1.Efecto termoeléctrico	19
3.8.1.Placas Peltier	24
3.10.1.Generación de energía termoeléctrica	28
4.1.1.Experimento (Efecto Seebeck).	30
4.1.2.Experimento (Efecto Seebeck) diagrama técnico.	30
4.1.3.Diferencia térmica del termogenerador phywe	33
4.1.4.Diferencia térmica del termogenerador phywe 2	33
4.1.5.Efecto Peltier con interfaz de PASCO	34
4.2.1.Celda Peltier acoplada con pasta térmica	35
4.2.2.Celda dentro de un contenedor térmico	36
4.2.3.Vista de una celda Peltier en contacto con agua fría y caliente	37
4.2.4.Vista de una celda Peltier en contacto con agua fría y caliente (esquema técnico)	37
4.2.5.Valores registrados a partir de una diferencia térmica en un modulo peltier TEC1-12710	38
4.2.6.Valores registrados a partir de una diferencia térmica en un modulo peltier TEC1-12710	39

4.2.7.Gráfica diferencia de temperaturas ΔT	40
4.3.1.Diagrama del efecto Peltier	41
4.3.2.Experimento Peltier con fuente de voltaje	42
4.3.3.Gráfica de temperatura ($^{\circ}C$)	43
4.3.4.Gráfica de diferencia térmica	43
4.3.5.Voltaje en celda peltier 1	44
4.3.6.Voltaje en celda peltier 2	45
4.3.7.Voltaje generado por el efecto Seebeck	46
4.4.1.Diagrama técnico del circuito armado	46
4.4.2.Gráfica del coeficiente Seebeck	48
4.4.3.Gráfica de la resistencia interna de la celda peltier . .	49
4.5.1.Planos de la estructura del seguidor solar	50
4.5.2.Modelo de seguidor solar.	52
4.6.1.Seguidor solar colocado cuando el sol se encuentra perpendicular a la lente	53
4.6.2.Diagrama técnico del seguidor solar.	54
4.6.3.Temperatura de la celda peltier medida con arduino .	55
4.6.4.Diferencia térmica medida con arduino	55
4.6.5.Voltaje de las salidas de la celda	56
4.6.6.Gráfica de temperatura	57
4.6.7.Gráfica de voltaje	58
4.7.1.Celda Peltier puesta en la parte superior de un auto para capturar el calor del sol	59
4.7.2.Gráficos representativo de la temperatura que genera la celda peltier en un carro.	60
4.7.3.Gráfico representativo de la diferencia térmica generada por una celda peltier.	61
4.7.4.Voltaje medido por los terminales de la celda	62
5.0.1.Código 1 (Arduino)	67
5.0.2.Código 2 (Arduino)	68
5.0.3.Constancia 1	69
5.0.4.Constancia 2	70

5.0.5.Constancia 3		71
5.0.6.Constancia 4		72
5.0.7.Constancia 5		73

Índice de tablas

3.5.1.Especificaciones de rendimiento TEC1-12710	22
3.8.1.Clasificación de un concentrador solar	25
4.1.1.Valores obtenidos por el efecto Seebeck	31

Resumen

Una alternativa para disminuir el consumo energético es mediante el reciclaje de energía, transformar energía calorífica a energía eléctrica.

Hay dispositivos que requieren de altas temperaturas para su funcionamiento los cuales pueden tener mayor eficiencia energética mediante la captación de calor y su conversión a energía eléctrica útil, llamada “conversión termoeléctrica”.

La conversión de energía térmica a eléctrica y viceversa son fenómenos físicos asociados a la termodinámica y al electromagnetismo que podemos encontrar en las celdas Peltier.

El objetivo de nuestro trabajo es estudiar estos fenómenos físicos, implementar nuevas técnicas experimentales desarrollados en ambientes controlados, estudiar sistemas térmicos y en condiciones ambientales además del análisis teórico-experimental de una celda Peltier expuesta a temperatura ambiente.

Al hacer un análisis teórico con los efectos termoeléctricos relacionados en el trabajo se lograron respuestas que afirmaban la presencia de nuestro fenómeno físico y al mismo tiempo se hicieron observaciones en el modelo experimental para un mejoramiento en las técnicas de medición.

Capítulo 1

Introducción

La energía en forma de calor se encuentra desaprovechada en muchas máquinas y dispositivos utilizados de forma muy común, es por esto que existe una rama dedicada a la investigación y desarrollo de materiales termoeléctricos que son capaces de generar corriente eléctrica al aplicarle un gradiente de temperatura.

Este trabajo contempla la caracterización de un material termoeléctrico basado en Estaño y Bismuto, dopado y contenido dentro de una placa de 16 cm^2 sometida a cambios de temperatura controlada para que se mantuviera en el rango de rendimiento al que pertenece, los arreglos experimentales se describen con el objetivo de proponer nuevas técnicas de medición orientadas a la transferencia de energía térmica en nuestra celda Peltier al igual que las condiciones climáticas en las que estuvo sometido el experimento.

La implementación de las celdas Peltier será una alternativa para diferentes entornos en los que no se aprovecha la energía térmica en forma de calor y se puede convertir en una herramienta útil y práctica en el desarrollo sobre nuevas técnicas de energías limpias.

1.1. Objetivo general

Estudiar los fenómenos térmicos y eléctricos que se dan en una unión de Estaño (**Sn**) - Bismuto (**Bi**) contenidos en una celda Peltier sometida a cambios de temperatura y a cambios de potenciales eléctricos. Cuantificar parámetros Termoeléctricos como coeficientes Seebeck, Peltier, la resistencia interna de la celda y la eficiencia de los materiales Estaño – Bismuto. Comprender los cambios que se presentan en la celda Peltier al suministrar una corriente eléctrica mediante el efecto Joule. Diseñar un sistema experimental que ayude al estudio termoeléctrico del material.

1.2. Objetivos específicos

- Estudiar teóricamente los efectos Thomson, Peltier, Seebeck y Joule asociados a los efectos termoeléctricos.
- Reconocer las diferencias que existen entre los efectos Thomson, Peltier, Seebeck y Joule.
- Estudiar las propiedades de los tipos de celdas Estaño y Bismuto usadas.
- Caracterizar las celdas Estaño y Bismuto usadas.
- Diferenciar experimentalmente los efectos termoeléctricos asociados.
- Desarrollar un modelo de seguidor solar, tipo giroscopio, a fin de optimizar el proceso térmico y eléctrico.
- Desarrollar y programar en una placa de arduino la electrónica de adquisición para la toma de datos.
- Estudiar el fenómeno termoeléctrico bajo condiciones de laboratorio con el acoplamiento Estaño de Bismuto.
- Determinar los coeficientes Peltier–Seebeck.

Capítulo 2

Antecedentes Históricos

2.1. Termoelectricidad

En 1821, Johann Seebeck (1770 –1831) [19], universidad de Sevilla, un médico y físico alemán, observó que al aplicar un gradiente de temperatura entre las uniones de dos metales diferentes que formaban un bucle cerrado, o un lazo, se producía la deflexión de una brújula situada junto al circuito, es por esto que llamó a este efecto “termomagnetismo”. Años después, el físico danés Hans Christian Orsted (1777-1851) [14], un gran estudioso del electromagnetismo, rebautizó el descubrimiento como “efecto Seebeck” y la actualidad engloba cualquier unión de dos materiales conductores eléctricos sean o no metales. En la época de Seebeck aún no eran conocidos los materiales semiconductores, estos materiales son en los que actualmente se basan muchos de los dispositivos que consisten en el efecto que lleva su nombre.

Las tres cartas del físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) [16] a Abott Anton Mario Vasalle, profesor de física de la Royal University de Turin, escritas entre 1794 y 1796 demuestran que fue Volta quién observó por primera vez los efectos del fenómeno termoeléctrico. En ellas describe el experimento donde observó cómo los músculos del anca de una rana se contraen al pasar por ellos la corriente generada debido al calentamiento desigual de los extremos de un alambre de acero.

El físico francés Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) [3] publicó en 1834 en la revista francesa “Anales de física y química” un artículo acerca de la temperatura anormal registrada en las uniones de un bucle de dos metales distintos al hacer pasar una corriente eléctrica a través de él. Peltier no buscó una justificación al fenómeno que observó, ya que trabajaba en la demostración de las teorías de James Joule. Varios físicos buscaron la explicación a este fenómeno, pero no fué hasta 1838 que el ruso Heinrich Lenz realizó un experimento sencillo que consistía en hacer pasar una corriente eléctrica por la unión de antimonio y zinc, la cual se encontraba a su vez en contacto con una gota de agua que se congelaba al pasar la corriente en un sentido y se derretía al pasar en sentido contrario. Con este experimento quedó demostrado el efecto Peltier: efecto “contrario” al observado por Seebeck.

Fué el ingeniero y físico británico primer barón Kelvin William Thomson, estudioso en termodinámica, quien dedujo las “relaciones de Kelvin” alrededor de 1851 al demostrar que el efecto Seebeck y el efecto Peltier se interrelacionan añadiendo el “efecto Thomson”, que consta en la conversión de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa. En palabras exactas, un material homogéneo por el que circula un flujo de calor y que es sometido a un gradiente térmico generará una corriente eléctrica, o bien, un material homogéneo sometido a un gradiente térmico y por el que hacemos circular una corriente eléctrica intercambiará calor con el medio.

En 1885, el físico tercer Barón de Rayleigh John William Strutt, (ganador del premio nobel de física en 1904) publicó un estudio con resultados erróneos sobre la eficiencia térmica de un generador termoelectrico, este estudio dio pie a las primeras investigaciones ingenieriles acerca de la termoelectricidad. El físico alemán Edmund Altenkirch fue el que se dio a la tarea de corregir ese estudio en 1909, y para 1910 había calculado satisfactoriamente la eficiencia potencial de generadores termoelectricos y delineó los parámetros de los materiales necesarios para construir dispositivos prácticos. Los ren-

dimientos fueron muy bajos para los dispositivos estudiados: en su época sólo los metales eran los materiales disponibles.

En aquella época, los efectos termoeléctricos sólo habían sido aplicados en la medición de temperaturas y en los primeros generadores de corriente continua, que luego fueron sustituidos por generadores de inducción electromagnética, todo esto porque los dispositivos basados en efectos termoeléctricos tenía una eficiencia menor al 1 % [12]. En los años 30, el físico ruso Abram Fedorovich Ioffe publicó una serie de trabajos en los que predecía eficiencias en la transformación calor-electricidad de 2.5 a 4 %, mediante el uso de semiconductores.

Fue así como en 1932 creó en el Instituto Físico-Técnico de San Petersburgo un grupo de investigación en semiconductores termoeléctricos. Gracias a sus trabajos en fotoelectricidad, investigó la posibilidad de usar sulfuro de plomo como material termoeléctrico, y en 1937 mostró la posibilidad de crear semiconductores tipo N y tipo P sólo con sulfuro de talio al variar la cantidad de azufre respecto a su composición química, esto significó un gran avance.

Siguiendo los pasos de Ioffe, Yuri Petrovich Maslakovets dió a conocer a finales de los años treinta un dispositivo termoeléctrico con eficiencia térmica cercana al 3 % [12], que constaba de 74 termopares de sulfuro de plomo dopado con plomo, como elemento tipo N, y hierro, como elemento tipo P. El ejército Rojo se interesó en este dispositivo y fue utilizado para alimentar las baterías que garantizaban las comunicaciones de la estación de radio “Sever” a un radio de 1000 km, esto en los últimos meses de la Segunda Guerra Mundial. Este generador termoeléctrico, primero en su clase, tenía una potencia de 12 Watts cuando trabajaba con un salto térmico de 300 °C, el cual era generado con una estufa de leña, y su principal problema era la resistencia de contacto de las interconexiones. Al terminar la Segunda Guerra Mundial, Maslakovets continuó trabajando con su generador termoeléctrico y llegó a conseguir un rendimiento de más del 5 %, sustituyendo el hierro por ZnSb^1 y a partir de 1948

¹Antimoniuro de Zinc

se produjeron los primeros TEGs² comerciales en la URSS³ para el suministro de energía eléctrica de radioreceptores en áreas rurales, su suministro de calor eran lámparas de queroseno.

La teoría de la conversión de energía termoeléctrica en semiconductores fue desarrollada por Ioffe en 1949. En esta teoría establece el parámetro ZT ⁴ adimensional que se emplea actualmente como medida de la calidad termoeléctrica de un material. ZT se define como:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} T \quad (2.1)$$

donde α es el coeficiente de Seebeck, σ es la conductividad eléctrica, K (W/(m·k)) es la conductividad térmica y T (°k) es la temperatura absoluta. El trabajo fue publicado originalmente en 1950 por la academia de ciencias de la URSS como documento clasificado, y se mantuvo oculto a la comunidad científica internacional hasta 1957, publicado en el libro “Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling” [11].

En las décadas más actuales, los TEGs han sido fuentes de potencia en locaciones terrestres y extraterrestres, por ejemplo en las sondas Voyager 1 y Voyager 2 [12].

Existe una gran ventana de oportunidades en generadores Termoeléctricos para recuperar la energía térmica desperdiciada. Ejemplos de aplicaciones son en automóviles, donde se pueden utilizar TEGs de temperaturas intermedias (226-526 °C) para aprovechar la energía y reducir la contaminación, en plantas solares de altas temperaturas, sensores, dispositivos eléctricos y electrónicos, entre otros.

En la actualidad, la búsqueda de materiales nuevos con altos valores de ZT está llevando a la búsqueda de nuevas vías de formación de los materiales ya conocidos con el fin de aprovechar al máximo las mejoras y ventajas que la nanoestructuración del material ofrece.

²Generadores termoeléctricos

³Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), también conocida como Unión Soviética

⁴El parámetro adimensional Z tiene unidades de K^{-1} , por lo que se suele adimensionalizar multiplicando por la temperatura media $\bar{T}$ (que renombraremos como T), se denomina factor de mérito adimensional, y da una idea del rendimiento.

2.2. Materiales termoeléctricos

Desde el descubrimiento de los materiales termoeléctricos, su uso se ha limitado a termopares para mediciones de temperatura debido a su muy baja eficiencia. Fué solo en la década de 1960 cuando investigaciones relevantes sobre semiconductores termoeléctricos desarrollaron más aplicaciones en el campo de refrigeración y generación de energía.

Los materiales termoeléctricos convencionales, que son aleaciones de semiconductores dopados a granel o calcogenuro, se pueden agrupar en tres familias de acuerdo con el rango de temperatura en el que el rendimiento es óptimo: materiales basados Bi_2Te_3 ⁵ para aplicaciones de temperatura ambiente ($< 150^\circ C$), y materiales basados $PbTe$ ⁶ para un rango de temperatura intermedio ($150^\circ C - 500^\circ C$), y $SiGe$ ⁷ para su uso a temperaturas superiores a $500^\circ C$ [9]. El rango de temperatura se puede ampliar usando una combinación de materiales caracterizados por diferentes rangos de temperatura en una estructura segmentada.

Los Bi_2Te_3 son bien conocidos y pueden tener un ZT cerca de la unidad a temperatura ambiente. Sin embargo, ya que se oxidan y vaporizan fácilmente, estos materiales no se pueden utilizar para altas temperaturas aplicaciones en el aire. Alrededor del 70 % de los módulos termoeléctricos (TE) disponibles en el mercado utilizan Bismuto y Telurio como materiales funcionales. Recientemente, Mamur et al. [13] revisó las últimas investigaciones sobre el crecimiento de la nanoestructura Bi_2Te_3 por varios métodos, y su caracterización por teoría y enfoques analíticos. Los autores han concluido que la cifra adimensional (ZT) sube de 0.58 a 1.16 si los materiales se desarrollan en forma de nanoestructura.

El telururo de plomo ($PbTe$) es un buen material termoeléctrico para aplicaciones que requieren temperaturas medias hasta 626

⁵Telururo de Bismuto

⁶Telururo de Plomo

⁷Germanuro de Silicio

$^{\circ}\text{C}$. PbTe tiene un alto punto de fusión de 916°C , buena estabilidad química, baja presión de vapor y resistencia química robusta. Su alta cifra de adimensional, cercana a 0.8, permitió una mayor eficiencia y ser utilizada en varias misiones espaciales de la NASA. Investigaciones recientes han informado valores máximos de ZT de alrededor de 1.4 para materiales monofásicos basados en PbTe y 1.8 para materiales homogéneos de $PbTe - PbSe$ ⁸. Las aleaciones de silicio-germanio (SiGe) se encuentran entre los mejores materiales TE reportados en la literatura para aplicaciones de alta temperatura ($T_{\text{ladocaliente}} > 500^{\circ}\text{C}$). Además, son uno de los más baratos y la mayoría de los materiales termoeléctricos no tóxicos.

⁸Seleniuro de Plomo

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. La celda Peltier

Una celda Peltier se compone de uniones de metales o de semiconductores tipo P y N [18]. Son dispositivos termoeléctricos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un conductor o semiconductor cuando una corriente eléctrica lo atraviesa. La combinación de cualquier elemento metálico y sus aleaciones o elementos semiconductores y compuestos dará como resultado una corriente [15]. Consolidan una estructura de celda como lo muestra la figura.

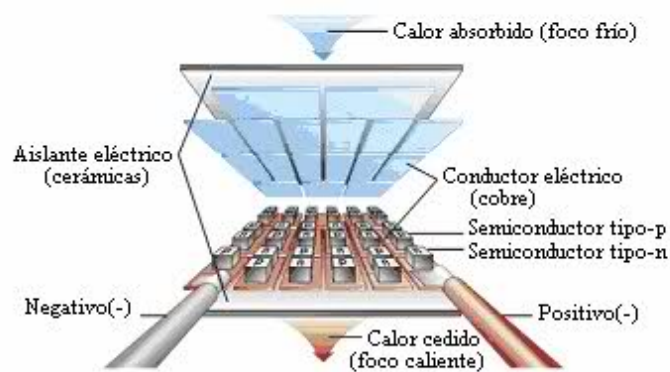


Figura 3.1.1: Estructura interna de una celda Peltier. [6]

Los bloques P y N están conectados en serie por medio de unas placas conductoras de cobre, estas placas sirven como puentes de conexión entre cada bloque que permiten el flujo térmico-eléctrico, cada par de bloques se entrelaza uno con otro conectando con una placa conductora del mismo material (cobre) en la parte inferior y en la parte superior, su unión tiene la forma de una onda cuadrada. La figura 3.1.2 muestra la conexión que tienen éstos bloques en una celda Peltier comercial modelo TEC1-12706.



Figura 3.1.2: Interior de una celda peltier TEC1-12706.

Las celdas que se comercializan en el mercado esencialmente están compuestas por diferentes elementos (conductores y semiconductores) entre ellos destacan: Teluro de Bismuto, Bi_2Te_3 y Selenio de Antimonio $SbSe$, ya que estos materiales son buenos para el paso de corriente eléctrica, mientras que no lo son para la transferencia del

calor a través de ellos, permitiendo que se genere un mejor aislamiento térmico. De esa forma se logra la alta temperatura de una de las caras y que no afecte la baja temperatura de la otra cara.

Al aplicar una diferencia de potencial sobre la celda se genera un flujo de calor por unidad de tiempo o potencia calorífica en la cara caliente [10], esto se puede determinar mediante la ecuación:

$$Q_{pc} = \alpha T_c I \quad (3.1)$$

Donde Q_{pc} es la cesión de calor por unidad de tiempo, T_c (Celcius) es la temperatura de la cara caliente, α ($\frac{mV}{^\circ C}$), es el coeficiente Seebeck e I (Amperes) la corriente que atraviesa el circuito.

Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo o potencia calorífica en la cara fría está dada por la ecuación:

$$Q_{pf} = \alpha T_f I \quad (3.2)$$

Siendo ésta vez Q_{pf} la pérdida de calor también por unidad de tiempo T_f (Celcius) la temperatura de la cara fría. Por otro lado, si se consideran las pérdidas por unidad de tiempo por efecto Joule, las cuáles se supone que se reparten mitad para cada cara, éstas quedarán expresadas por la ecuación:

$$Q_j = \frac{1}{2} I^2 R \quad (3.3)$$

Donde Q_j representa la pérdida de energía en forma de calor por unidad de tiempo, I es la corriente eléctrica y R (ohm) es la resistencia eléctrica de la celda Peltier.

La diferencia de temperaturas entre ambas caras producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la cara fría, cuantificable mediante la expresión:

$$Q_{CT} = \frac{T_c - T_f}{R_T} I^2 R \quad (3.4)$$

En dónde Q_{CT} es el calor producido por la conducción térmica entre ambas caras (caliente y fría), R_T representa la resistencia térmica entre la cara caliente y la fría.

El flujo neto calorífico absorbido por la cara fría, seguirá haciendo el balance energético por medio de la ecuación:

$$Q_f = Q_{pf} - Q_j - Q_{CT} = \alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_T} I^2 R \quad (3.5)$$

Mientras que el calor cedido y que debe ser disipado a través de la cara caliente será como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q_c = Q_{pc} + Q_j - Q_{CT} = \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_T} I^2 R \quad (3.6)$$

Utilizando el primer principio de la termodinámica, la potencia eléctrica suministrada será la diferencia de los dos flujos caloríficos de disipación y absorción concluyendo ésto en la ecuación:

$$P_e^1 = Q_c - Q_f = \alpha(T_c - T_f)I + I^2 R = \alpha \Delta T I + I^2 R \quad (3.7)$$

3.1.1. Efecto Thompson

La conducción de calor a lo largo de los alambres de un par termoelectrónico que no transporta corriente produce una distribución uniforme de temperatura en cada alambre. Si existe corriente, se altera la distribución de temperatura en cada alambre en cantidad que no se debe enteramente al efecto Joule.

Este cambio adicional en la distribución de temperatura se le llama Efecto Thompson. Sus principales características del efecto Thompson son:

a. La velocidad con que se transfiere el calor Thompson en una región pequeña de un alambre que conduce una corriente I y que soporta una diferencia de temperatura dT es igual a σI , siendo σ el coeficiente de Thompson.

¹Potencia eléctrica

b. El calor Thompson es *reversible*.

c. Se acepta convencionalmente que σ tiene un valor positivo cuando una corriente de sentido opuesto al del gradiente de temperatura produce una absorción de calor por el conductor.

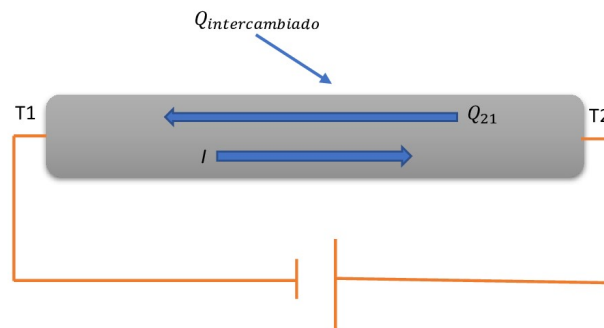


Figura 3.1.3: Al circular una corriente por un conductor homogéneo con temperatura no homogénea, se absorbe o libera calor.

3.1.2. Efecto Seebeck

Un par termoeléctrico formado por dos conductores diferentes A y B tiene sus uniones en contacto con dos fuentes diferentes de calor como se muestra en la fig. 3.1.3.

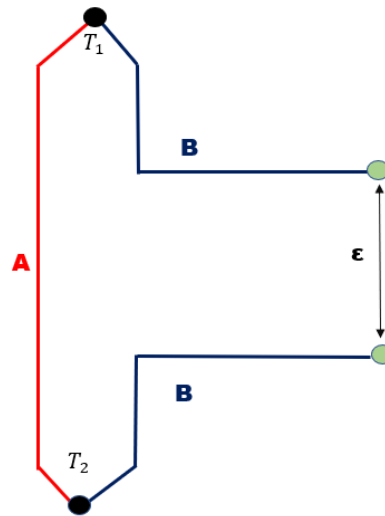


Figura 3.1.4: Termopar formado por los conductores A y B con soldaduras a T_1 y T_2

Llamemos a la unión más caliente temperatura T_1 soldadura de prueba y a la otra temperatura T_2 soldadura de referencia. La existencia de una fem^2 térmica en el circuito se llama *Efecto Seebeck*.

Cuando se soldan dos conductores diferentes para formar dos uniones y las dos uniones se mantienen a temperaturas diferentes, la difusión de los portadores de carga tienen lugar en las uniones a diferentes velocidades.

3.1.3. Efecto Peltier

Consideremos un par termoelectrónico para el efecto Peltier con sus uniones a la misma temperatura, además, si por medio de una batería exterior se produce una corriente en el par termoelectrónico, las temperaturas de las uniones cambian, éste cambio de temperatura adicional es el *Efecto Peltier*. Entre sus características principales se destacan las siguientes:

a. El calor Peltier es reversible. Cuando se invierte el sentido de la corriente manteniendo su magnitud, el calor Peltier es el mismo

²Fuerza electromotriz ó voltage inducido.

pero en sentido opuesto.

b. El coeficiente Peltier depende de la temperatura y de los materiales de la soldadura, siendo independiente de la temperatura de la otra unión.

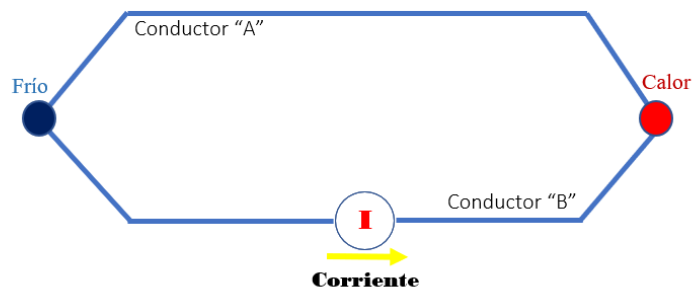


Figura 3.1.5: Cambio de temperatura de ambas uniones producida por una corriente eléctrica.

3.1.4. Efecto Joule

Si la fuerza electromotriz (*fem*) térmica ε_{AB} no se equilibra por una *fem* externa, existe una corriente I cuyo valor se puede ajustar variando la *fem* externa.

Mientras existe una corriente eléctrica, se disipa una energía eléctrica de valor $I^2 R$ en el circuito.

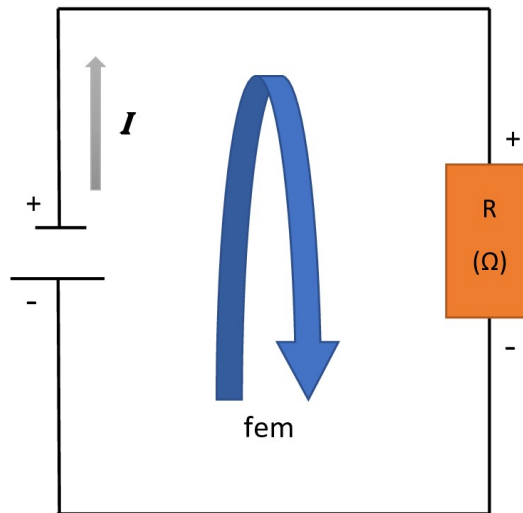


Figura 3.1.6: Cuando la electricidad circula por un conductor o una resistencia se produce calor.

3.2. Efecto termoeléctrico

El efecto termoeléctrico en un material conductor o semiconductor relaciona el flujo de calor que lo recorre con la corriente eléctrica que lo atraviesa, es decir, tal y como se muestra en la Figura 3.2.1, en un material termoeléctrico al aplicarle una fuente de calor en un extremo del conductor (T_2) origina que los electrones se muevan hacia la parte fría del conductor (T_1), generando una corriente eléctrica. En cambio, si a ese conductor se le aplica una corriente eléctrica, puede producir el efecto contrario [1].

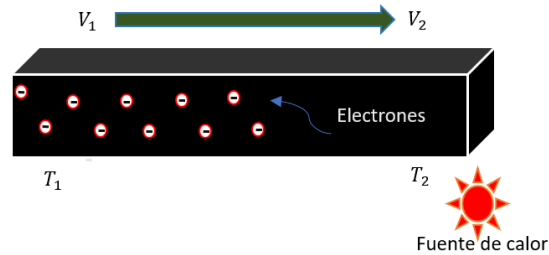


Figura 3.2.1: Efecto Termoeléctrico.

A escala atómica (en especial, portadores de carga), un gradiente de temperatura aplicado provoca el movimiento de portadores cargados en el material, si hay electrones o huecos, para difundir desde el lado caliente al lado frío, similar a un gas clásico que se expande cuando se calienta, por consiguiente, la corriente es inducida térmicamente.

3.3. Conductores termoeléctricos

Los portadores de carga en los materiales (*electrones en metales, electrones y huecos en los semiconductores, iones en los conductores iónicos*³) se difundirán cuando un extremo de un conductor está a una temperatura diferente del otro. Portadores calientes se difundirán desde el extremo caliente al extremo frío, pues hay menor densidad de portadores calientes en el extremo frío del conductor. Portadores fríos se difundirán desde el extremo frío al extremo caliente por la misma razón.

En un módulo termoeléctrico, si los electrones por exceso de un elemento tipo N (nivel alto de energía) pasan al elemento tipo P (nivel bajo de energía) se desprenderá energía, ya que estarán pasando de un nivel energético superior a un nivel energético inferior.

³Conductores iónicos: Materiales que presentan conductividad y es debida al movimiento de átomos o iones en el sólido.

Los metales tienen una alta conductividad eléctrica, mientras que los aislantes tienen una conductividad eléctrica muy baja, debido a su estructura atómica. Por esta misma razón, debido a su estructura, los metales son muy buenos conductores del calor, al contrario que los aislantes. [8]

3.3.1. Conductividad térmica

Los conductores térmicos más excepcionales son los metales debido a su disposición electrónica interna. Los iones metálicos están apretados en forma de red. Estos iones vibran constantemente, lo que genera calor.

La estructura molecular de los metales también incluye electrones libres. Estos electrones deslocalizados transportan grandes cantidades de energía a medida que se mueven a través de la red. A medida que estos electrones colisionan con la red troncal, excitan la estructura iónica y hacen que vibre más rápidamente. El aumento de la vibración de la red comienza a generar más calor. Debido al movimiento de los electrones libres presentes en el metal, el calor generado por la vibración iónica puede transferirse a través de la sustancia de manera más eficiente.

3.3.2. Factores que influyen en la conductividad térmica

Una característica muy común que puede influir en el valor de la conductividad térmica de un material, es su porosidad. El aire tiene una conductividad térmica $0.02 \text{ W}/(m/^{\circ}C)$ a temperatura ambiente ($20\text{-}25^{\circ}C$).

Este valor es considerablemente bajo respecto a la mayoría de los materiales sólidos. Cuando el aire es atrapado en los poros de una sustancia puede disminuir la velocidad a la cual el calor puede pasar en forma efectiva a través de ellos. El tamaño del poro, su distribución, forma y conectividad, todos influyen en la porosidad de un material. Una porosidad elevada disminuirá la conductividad térmica. Otros factores externos que pueden impactar en la conductividad

térmica es la humedad y la dirección del flujo de calor.

El agua y el hielo tienen una mayor conductividad térmica que el aire. Si un material es expuesto a un ambiente húmedo esta puede potencialmente ser absorbida y consecuentemente incrementara el valor de la conductividad térmica. La estructura molecular de un material también puede potencialmente restringir el flujo de calor.

3.4. Semiconductores

Los semiconductores más utilizados como el Silicio poseen cuatro electrones en su última capa y por ello se une a sus átomos vecinos mediante enlaces covalentes.

A temperaturas bajas los cuatro electrones están formando dichos enlaces, por lo que permanecen ligados a los átomos y no pueden moverse aunque se aplique un campo eléctrico exterior, esto es, se comportan como aislantes.

A temperaturas superiores, como la temperatura ambiente, hay electrones que poseen suficiente energía térmica como para saltar de su enlace covalente a niveles energéticos superiores donde no están ligados.

Estos electrones sí pueden moverse en caso de aplicarse un campo eléctrico exterior, y se comportan como conductores (aunque no tan buenos como los metales). Si se aumenta más aún la temperatura, más electrones se desligan de sus enlaces y contribuyen a la corriente eléctrica.

3.5. Características de la placa termoeléctrica TEC1-12710.

Este modelo lleva en su parte interior 127 termopares y posee una dimensión de 40 x 40 milímetros, se encuentra fabricado a base de materiales de Estaño y Bismuto y alcanza diferencias superiores a los 70 grados centígrados entre sus caras fría y caliente como lo muestra la tabla 3.5.1.

Información adicional:

Items	Valores	Descripción
$T_c [^{\circ}C]$	27 - 50	Temperatura del lado caliente expuesta al medio ambiente
ΔT_{max}	70 - 79	Diferencia máxima de temperatura entre el lado frío y caliente
V_{max}	16 - 17.2	Voltaje aplicado al módulo para una ΔT_{max}
I_{max}	10.1 - 10.1	Flujo de corriente para obtener una ΔT_{max}
Q_{max}	101 - 110	Capacidad de enfriamiento
Resistencia (<i>ohms</i>)	1.25 - 1.38	Resistencia del módulo al paso de la corriente

Tabla 3.5.1: Especificaciones de la celda Peltier TEC1-12710.

- Material cerámico: Al_2O_3 (óxido de aluminio).
- Soldadura: BiSn (Estaño y Bismuto) punto de fusión $138^{\circ}C$.

3.5.1. Propiedades químicas del Bismuto

Este elemento en la naturaleza está presente en forma de metal libre y en minerales como la Bismutita (Carbonato) y la Bismutinita (doble Sulfuro de Bismuto y Teluro), en los que se encuentra acompañado de otros elementos, fundamentalmente Plomo y Antimonio, el Bismuto tiene un carácter cristalino, se caracteriza por su color pálido y blanquizco con suaves tintes rosados

En compuestos, tiene **valencias de +3** (Bismuto (III)) o **+5** (Bismuto (V)) [17], siendo más estables los compuestos de Bismuto trivalente.

3.5.2. Propiedades químicas del Estaño.

El Estaño puro tiene dos variantes alotrópicas: el Estaño gris, polvo no metálico, *Semiconductor*, de estructura cúbica y estable a temperaturas inferiores a $13.2^{\circ}C$, que es muy frágil y tiene un peso específico más bajo que el blanco; y el Estaño blanco, el normal, metálico, conductor eléctrico, de estructura tetragonal y estable a temperaturas por encima de $13.2^{\circ}C$.

3.6. Resistencia interna de la celda Peltier

La resistencia eléctrica es la oposición que tiene una carga al pasar por un conductor, es decir, matemáticamente se expresa con la

siguiente ecuación:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (3.8)$$

La resistividad (ρ) depende del material y de su temperatura, sus unidades son ($\Omega \cdot m$) y la resistencia será mayor o menor si la longitud (l) y la sección (S) cambian su valor.

Para un módulo peltier la resistencia interna se obtiene directamente de la *ley de ohm*, es decir, tomamos los valores del voltaje y corriente que le aplicamos a dicha celda para obtener la resistencia de la misma. La variación de la resistencia interna es directamente proporcional a la temperatura de la celda, no mantiene un valor constante.

Cuando elevamos la temperatura de un material los átomos ganan energía interna (*energía cinética*), lo que produce una mayor probabilidad de choques entre ellas. Este fenómeno se traduce en el macro mundo como un aumento en la resistividad. Es importante mencionar que la resistividad es el recíproco de la conductividad.

3.7. Estudio de los coeficientes Peltier-Seebeck

Cuando la intensidad eléctrica es nula, pero existe una diferencia de temperaturas, aparecerá una fuerza electromotriz (*fem*), a éste fenómeno lo conocemos como efecto Seebeck. El coeficiente Seebeck α , mide la *intensidad* del efecto y se denomina la **potencia termo-eléctrica** del material.

Por otra parte, si a través de un sistema con capacidad termo-eléctrica se hace circular una intensidad de corriente, debido al acoplamiento de flujos, aparecerá una diferencia de temperaturas. Es el efecto inverso al anterior y se denomina efecto Peltier. Cuando se establece la corriente, la diferencia de temperaturas va aumentando, hasta que se alcanza un estado estacionario, en el que el flujo total de calor en el sistema se hace nulo (por ello las temperaturas dejan de variar).

3.8. Celdas Peltier comerciales

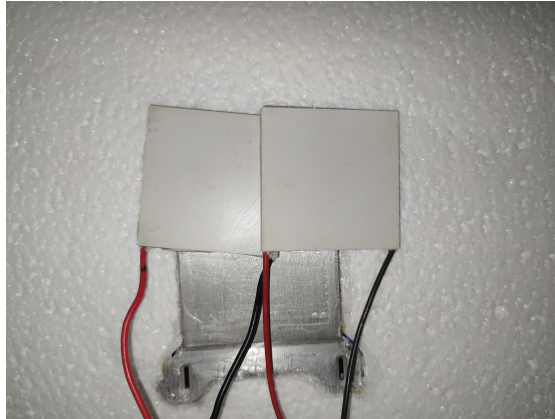


Figura 3.8.1: Imagen de una auténtica celda Peltier

3.8.1. Lente de Fresnel

Ante la necesidad de construir una gran lente para un faro con una apropiada longitud focal, pero incapaz de soportar el gran peso de una lente doble convexa de ese tamaño, el físico francés Augustin Fresnel (1788-1827) razonó que sería la curvatura de la superficie lo que le daría la potencia de enfoque. Entonces, reprodujo la curvatura de la superficie de la lente gruesa en secciones, manteniendo la misma longitud focal con una sola fracción del peso.

El acrílico transmite más luz que el vidrio. Hasta un 92 % de la luz se transmite a través del acrílico, mientras que en el vidrio la transmisión solo alcanza un rango del 80 al 90 %

Las lentes de Fresnel son plásticos fabricados de la misma forma cuya misión es hacer que los rayos de luz se comporten, al atravesarlas, como cuando atraviesan lentes plano convexas. Los rayos de luz que llegan paralelos al eje óptico tienden a concentrarse en un punto o foco (se focalizan). Los rayos que salen del foco atraviesan la lente y salen paralelos al eje óptico en un tubo de luz, es decir, colimados.

Un dato importante que se puede obtener para concentradores de

luz solar, es la Razón de Concentración, C . Se le define como el cociente del área efectiva de apertura A_a entre el área del receptor A_r . El área efectiva de apertura se refiere al área proyectada no sombreada del sistema óptico. Se expresa de la siguiente forma:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.9)$$

Hay una tabla que indica la clasificación de los concentradores solares según la relación de concentración.

<i>Relación de concentración (C)</i>	<i>Nivel</i>
2 - 10	BAJA
10 - 100	MEDIA
>100	ALTA

Tabla 3.8.1: Relación de concentración.

3.9. Análisis teórico

Un sistema termodinámico se trata de una región del espacio dentro de la cual existen diferentes componentes que interactúan entre sí, intercambiando energía. Un sistema posee una frontera que lo delimita, es decir, puede ser material (las paredes de un recipiente, por ejemplo).

La zona que rodea al sistema y con la cuál éste interactúa mediante intercambios energéticos o materiales se denomina el ambiente o el entorno, que es la región desde la cual los observadores hacen las medidas acerca de éste e infieren sus propiedades.

Cuando en un sistema termodinámico hay simultáneamente un flujo térmico (asociado con una diferencia de temperatura ΔT) y un flujo de carga eléctrica (asociado a una fuerza electromotriz $\Delta \varepsilon$), habrá una producción de entropía, que en la aproximación lineal se escribirá como [7]:

$$\begin{pmatrix} J_Q \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \frac{\Delta T}{T^2} \\ \frac{\Delta \varepsilon}{T} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Donde: J_Q es el flujo de calor, I es la corriente eléctrica y T es la temperatura media del sistema. Los coeficientes L_{11} y L_{22} se interpretan en términos de conductividad térmica y eléctrica, respectivamente, mientras que, las magnitudes L_{12} y L_{21} son coeficientes de acoplamiento. Representan el efecto de una **diferencia de potencial** sobre una corriente de **entropía** y el efecto de una **diferencia de temperatura** sobre una **corriente eléctrica**, respectivamente. Cuando estas dos contribuciones independientes a la entropía son dadas, debe haber una relación lineal entre los flujos y las diferentes fuerzas [5]. Además, el flujo de calor será acoplado junto con el flujo de carga de tal manera que: Resolviendo la matriz de coeficientes nos queda.

$$J_Q = L_{11} \frac{\Delta T}{T^2} + L_{12} \frac{\Delta \varepsilon}{T} \quad (3.11)$$

$$I = L_{21} \frac{\Delta T}{T^2} + L_{22} \frac{\Delta \varepsilon}{T} \quad (3.12)$$

Si consideramos ahora un sistema que obedece al anterior acoplamiento de ecuaciones, cuando la intensidad eléctrica tiende a cero, pero hay una diferencia de temperatura, en la segunda ecuación se concluye que aparece una fuerza electromotriz dada por la ecuación.

$$\Delta \varepsilon = -\frac{L_{21}}{L_{22}} \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \Delta T \quad (3.13)$$

$$\Delta \varepsilon = -\alpha \Delta T \quad (3.14)$$

Este fenómeno se llama efecto Seebeck [7], donde el coeficiente α mide la intensidad del efecto seebeck. Ahora, si una corriente circula por un sistema con capacidad termoeléctrica, debido al acoplamiento de caudales, aparecerá una diferencia de temperatura, es el efecto contrario al anterior, el efecto Peltier. Cuando aparece la corriente, la diferencia de temperatura aumenta, hasta que se alcanza un estado estable, donde el calor total del flujo en el sistema se vuelve cero. Sustituyendo esa condición en las ecuaciones anteriores es una

relación lineal entre la diferencia de temperatura aplicada, esto hace que la intensidad que corre a través del sistema este dado por la ecuación.

$$\Delta T = \frac{T^2}{L_{21} - \frac{L_{22} * L_{11}}{L_{12}}} * I \quad (3.15)$$

$$\Delta T = \beta * I \quad (3.16)$$

Donde: β es el coeficiente de Peltier, L_{11} , L_{12} , L_{21} y L_{22} se denominan coeficientes cinéticos y son propiedades del medio tales como conductividad, conductividad térmica, etc.

Un salto térmico de 70 grados centígrados significa que si el lado caliente de la celda se ha estabilizado a una temperatura de 45 grados [2], en el lado frío existe una temperatura de $45^{\circ}C - 70^{\circ}C = -25^{\circ}C$. A nivel práctico, debido a las inevitables pérdidas de transferencia de calor entre celda y disipador es difícil alcanzar este salto térmico.

3.10. Eficiencia Termoeléctrica

El valor ZT se utiliza para determinar la eficiencia de los termopares y los generadores termoeléctricos, es un índice adimensional que crece con el cuadrado del coeficiente de Seebeck, con el promedio de la temperatura de operación absoluta y la conductividad eléctrica. Disminuye con la conductividad térmica específica. Todos los factores dependen de la temperatura. Se define mediante la ecuación:

$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2 T}{k} \quad (3.17)$$

donde σ , α y k son la conductividad eléctrica, el coeficiente de Seebeck y la conductividad térmica de el material, respectivamente. Por lo tanto, un buen material termoeléctrico debe tener valores altos tanto para la conductividad eléctrica como para el coeficiente de Seebeck, pero debe tener una conductividad térmica baja. La alta conductividad eléctrica reduce el calentamiento en Joules y aumenta

la tensión termoeléctrica generada, mientras que la baja conductividad térmica reduce la transferencia de calor entre las uniones.

3.10.1. Generación de energía Termoeléctrica

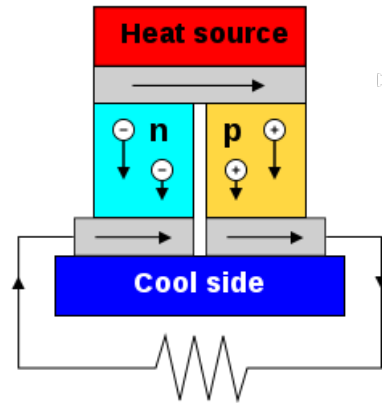


Figura 3.10.1: Generación de energía a partir del efecto Seebeck. [20]

Este dispositivo mantiene un gradiente de temperatura entre la unión de la fuente y la unión del lado frío. La unión de la fuente de calor mantiene alta temperatura mientras que la unión del disipador de calor absorbe el calor manteniendo la unión fría con respecto a la unión de la fuente. Por tanto, se mantiene un gradiente de temperatura entre los dos cruces. Este gradiente hace que los portadores de carga se difundan del lado caliente al lado frío, lo que resulta en un flujo de voltaje o corriente a través de las uniones.

La eficiencia es proporcional a $(1 + ZT)^{\frac{1}{2}}$ y alcanza la eficiencia de Carnot si ZT tiende a infinito. La eficiencia de los generadores termoeléctricos es mucho menor que la de un generador mecánico.

Capítulo 4

Análisis teórico experimental y resultados de los efectos térmicos–eléctricos

4.1. Termogenerador phywe

Un generador termoeléctrico phywe [21] convierte la energía térmica en energía eléctrica directamente. También se ha utilizado para demostrar el efecto Seebeck y el efecto Peltier.

Está conformado por dos placas de cobre niquelado con orificios en la parte lateral superior para colocar un par de termómetros ó termopares para medir la temperatura de cada extremo. Cuenta con dos recipientes de agua con lados abiertos que se utilizan como acumuladores de calor y un termostato de inmersión con el que mediante un contenedor de agua que soporta los $100^{\circ}C$ hará circular agua a temperatura constante para crear una diferencia térmica en nuestro termogenerador. Para la obtención de datos se hicieron pruebas a diferentes temperaturas analizando los resultados del voltaje.

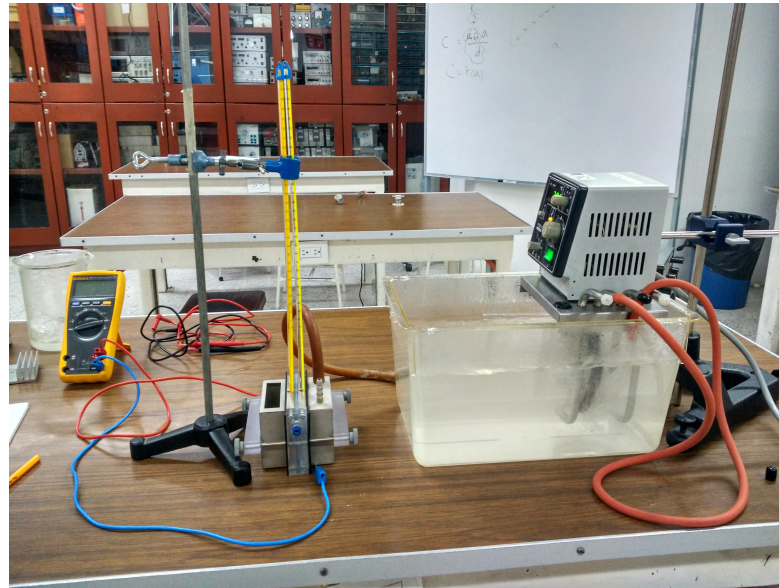


Figura 4.1.1: Sistema para obtener una diferencia de temperatura en un termogenerador Phywe.

En el siguiente esquema se muestra el montaje de nuestro sistema térmico para detallar cada elemento del experimento.

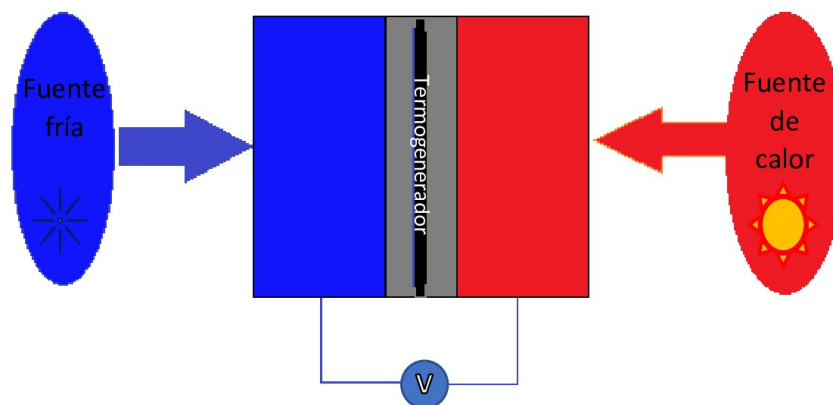


Figura 4.1.2: Diagrama técnico en un termogenerador phywe para la obtención de una diferencia térmica.

Durante el proceso del experimento con el cuál se hizo circular agua caliente mediante el termostato de inmersión en uno de los contenedores que se encuentran en contacto directo con el termogenerador mientras que el segundo contenedor que se encuentra en la parte opuesta del termogenerador contiene agua fría para generar la diferencia térmica que generaremos, se registraron los valores de temperatura y voltaje en tiempos aproximados de 10 minutos por cada lectura de datos que tomamos para dar una idea inicial de la energía eléctrica que se obtiene al tener una diferencia térmica en el termogenerador. La tabla que se muestra a continuación muestra los valores máximos obtenidos durante las mediciones que se hicieron dentro del laboratorio de la facultad FCFM¹:

$T_{\text{termostato}} [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura $c [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura $f [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	Voltaje [V]
13	13	6	7	0.316
40	37	14	23	0.995
80	75	20	55	1.755

Tabla 4.1.1: Tabla de valores que representan el voltaje obtenido a diferentes temperaturas.

Podemos observar que la generación de voltaje depende de la diferencia térmica que logremos generar, para mantener esa ΔT constante debemos tener en éste caso un flujo constante de ambas caras del termogenerador a la misma temperatura.

Por otra parte se realizó el proceso inverso, esta vez conectamos una fuente de voltaje y colocamos el termogenerador phywe. El generador termoeléctrico contiene dentro de él una celda Peltier la cuál soporta 6.4 A de corriente, al tomar en cuenta la cantidad de energía suministrada debemos contar con un buen sistema de disipación de calor, al hacer circular corriente eléctrica en el termogenerador este inmediatamente comienza a calentar una de sus caras mientras que la cara opuesta se enfría relacionando el fenómeno termoeléctrico con

¹Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP.

la siguiente expresión [1]:

$$Q_{pc} = \alpha T_c I \quad (4.1)$$

Siendo Q_{pc} ($cal/^{\circ}C$) el calor de la cara caliente de la celda, al tener un flujo de corriente dentro de nuestro termogenerador el flujo de calor o potencia calorífica incrementa.

Para nuestra prueba se suministró 10V y 3A de corriente de una fuente de voltaje con el fin de ver el comportamiento de la temperatura en la celda Peltier que se encuentra dentro de nuestro termogenerador, se registraron los valores con una interface universal 850 de PASCO², con dos termopares conectados en dos de sus terminales, posteriormente se observó un incremento y decrecimiento de temperatura por unidad de tiempo. Las siguientes gráficas muestran que durante un tiempo t la temperatura de una de las caras del termogenerador aumenta mientras que la cara opuesta disminuye. La medición que prosiguió se añadió un disipador de calor a la parte fría de nuestro termogenerador para ver la diferencia que había entre una y otra. Ambas pruebas se sometieron a las mismas condiciones ambientales, las gráficas que resultaron son las siguientes:

²La Interfaz Universal 850 PASCO es una interfaz de adquisición de datos multipuerto vía USB (Bus Serial Universal) diseñada para su uso con cualquier sensor PASCO. Los usuarios pueden enchufar un sensor en uno de los doce puertos de entrada en la interfaz y comenzar a recolectar datos.

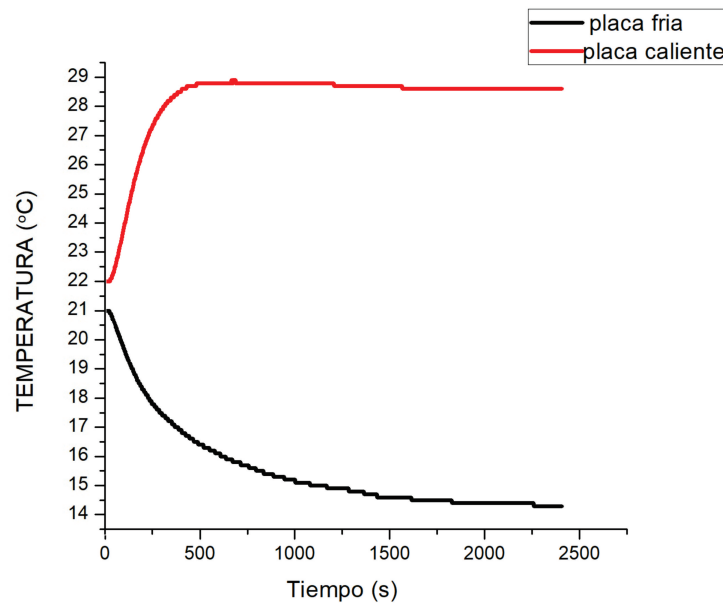


Figura 4.1.3: Gráfica que muestra el comportamiento de la temperatura con un disipador de calor.

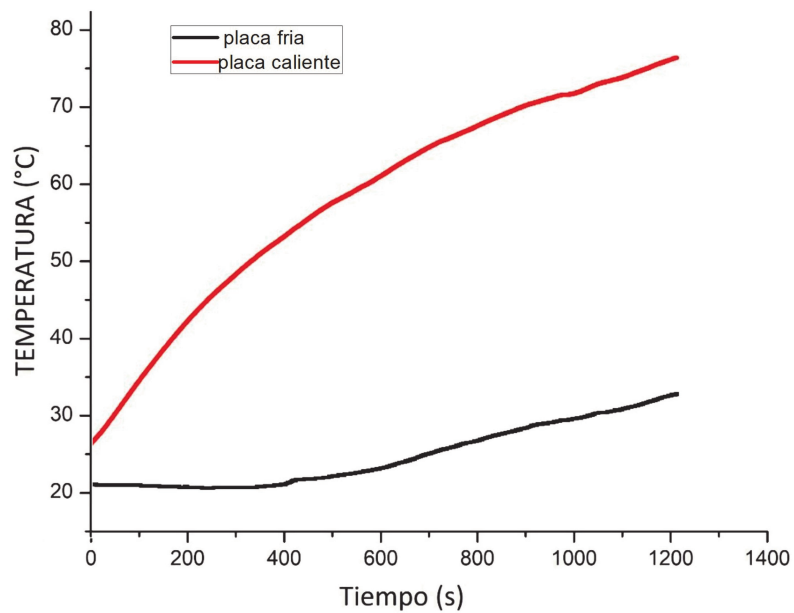


Figura 4.1.4: Gráfica que muestra el comportamiento de la temperatura sin un disipador de calor.

De lo anterior se infiere que en la prueba donde no se colocó un disipador de calor, figura 4.1.4, en un tiempo $t = 200s$. (aproximadamente 3 minutos) la temperatura se elevó hasta los $40^{\circ}C$. En el lado opuesto del termogenerador la temperatura se mantuvo constante por un tiempo muy corto y en $t = 400s$. (aproximadamente 6 minutos) comenzó a subir su temperatura hasta los $32.8^{\circ}C$ obteniendo así una $\Delta T = 43.6^{\circ}C$.

En la figura 4.1.5 se muestra el experimento realizado con y sin disipador sobre una cara del termogenerador phywe.



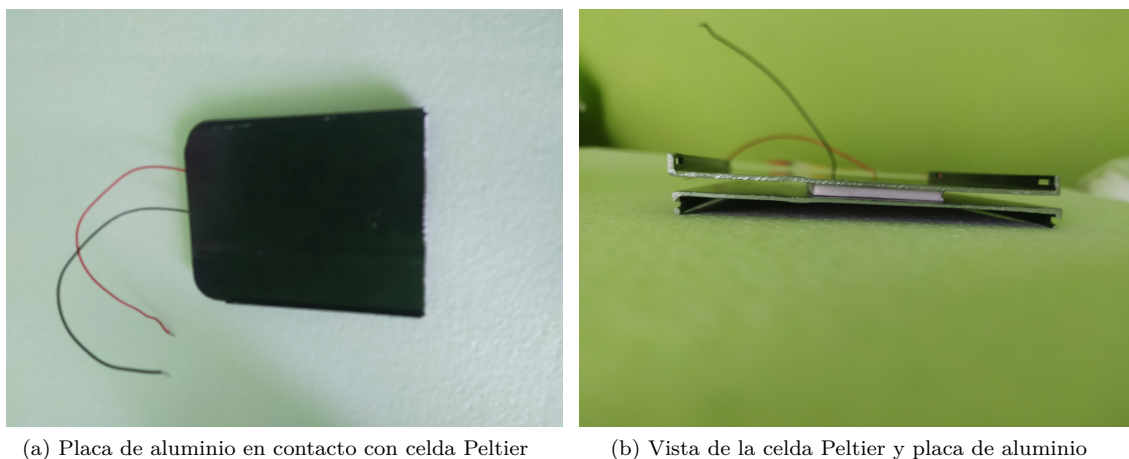
Figura 4.1.5: Experimento que se llevó a cabo en el laboratorio de la FCFM midiendo la diferencia de temperaturas con un termogenerador phywe y una interaz de PASCO

4.2. Sistema térmico para el estudio del efecto Seebeck

Después de haber medido con el termogenerador phywe de laboratorio y registrar los datos correspondientes (diferencia térmica y voltaje) se procedió a armar un segundo experimento con la finalidad de analizar las mediciones en un sistema térmico diferente

utilizando una celda Peltier. Esta vez se pretende aplicar el efecto termoeléctrico sin un consumo energético como una fuente de voltaje, un disipador conectado a un ventilador, o la circulación de agua caliente con el termostato, todos los aparatos que se ocuparon consumen energía eléctrica y se pretende utilizar la celda Peltier de tal forma que ahorre ese consumo energético obteniendo resultados en cuanto a generación de voltaje y corriente cercanos a los del termogenerador.

Para el estudio del efecto (Seebeck) se armó un sistema térmico con paredes adiabáticas con el objetivo de medir la temperatura de ambos lados de la celda Peltier modelo **TEC1-12710**.



(a) Placa de aluminio en contacto con celda Peltier

(b) Vista de la celda Peltier y placa de aluminio

Figura 4.2.1: Celda Peltier acoplada con pasta térmica

En ambos lados de la celda Peltier se colocó pasta térmica para tener mejor contacto con las placas de aluminio y tener mejor transferencia de calor.

Utilizamos una hielera de unicel (aislante térmico) para evitar una transferencia de energía calorífica con el medio ambiente, mediante

estas paredes adiabáticas la placa conductora de calor tendría contacto con ambas caras de nuestra celda Peltier.

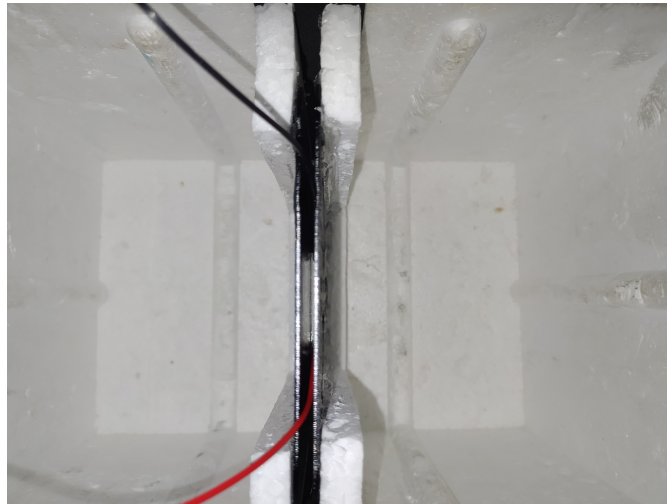


Figura 4.2.2: Celda Peltier contenida en un sistema térmicamente aislado.

Una vez colocada la separación se verificó que no hubiera transferencia de energía térmica o probables fugas. Después se colocó agua caliente con temperatura inicial (T_i) de $86^{\circ}C$ y para la parte fría se colocó hielo lo más cercano a la placa de aluminio de tal forma que tocara ésta placa que tenía contacto con nuestra celda Peltier para lograr medir una diferencia térmica ΔT . Con el uso de termopares tipo K³ conectados a una interfaz PASCO se registró la temperatura en ambos lados de nuestra celda Peltier así como el voltaje generado por esta diferencia térmica.

³Un termopar tipo K es un cable de teflón de 1 metro de longitud, cuenta con una unión de 0.792 mm. lo que lo hace fácilmente maniobrable para espacios pequeños, su rango de medición es de: $-40^{\circ}C$ a $260^{\circ}C$

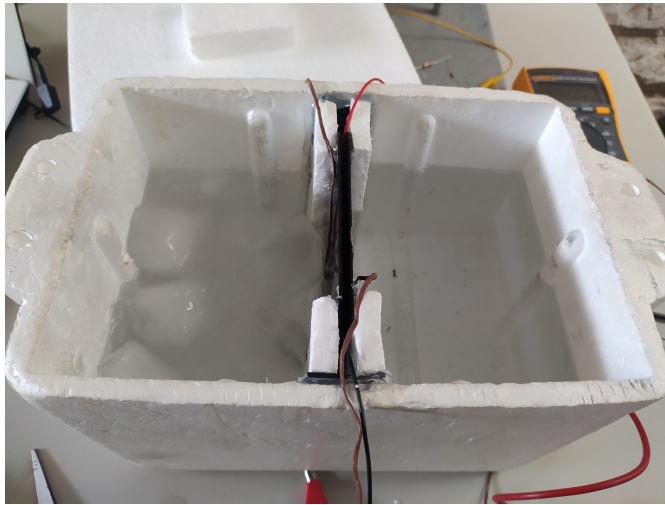


Figura 4.2.3: Módulo Peltier en contacto con agua caliente y fría, ambos lados aislados uno del otro.

A continuación se muestra un esquema técnico que detalla los componentes que se muestran en la imagen 4.2.3

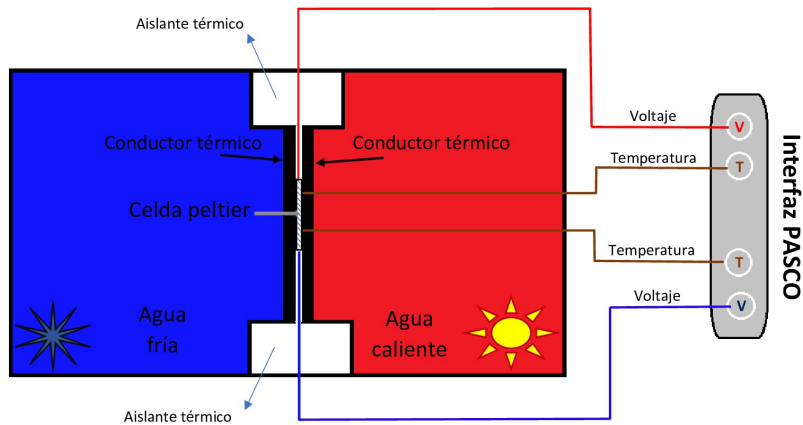


Figura 4.2.4: Contacto de una placa Peltier con paredes adiabáticas (esquema técnico)

Una vez ajustando los parámetros a medir en la interfaz PASCO, voltaje (V), temperatura(T) y corriente(A) con ayuda de nuestro or-

denador se graficaron estos parámetros en un periodo de 24 minutos continuamente.

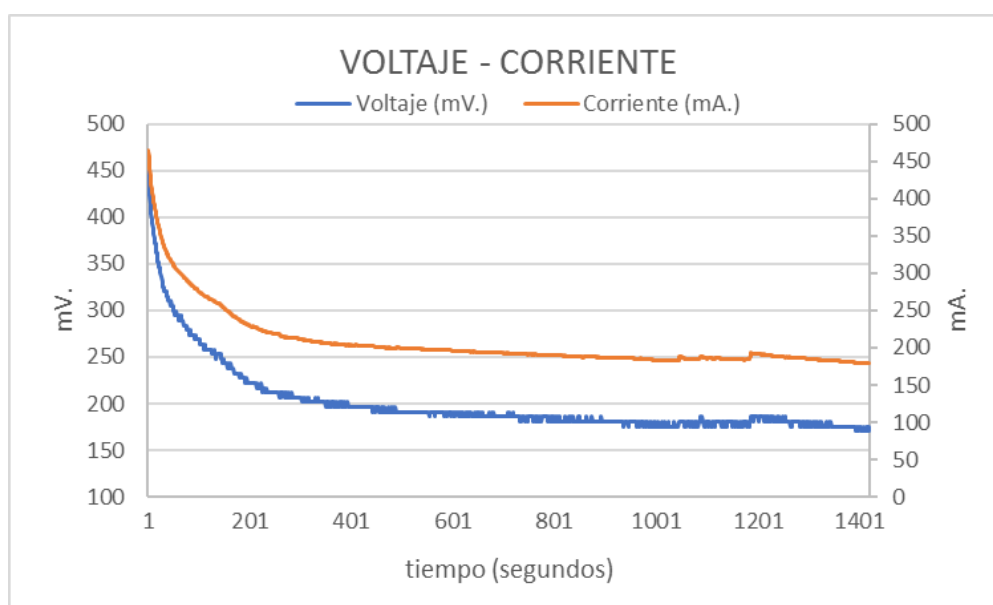


Figura 4.2.5: Gráfica de voltaje-corriente en un tiempo ($t=24$ min.), su decrecimiento al inicio se debe al no haber una mezcla homogénea en todo el sistema térmico.

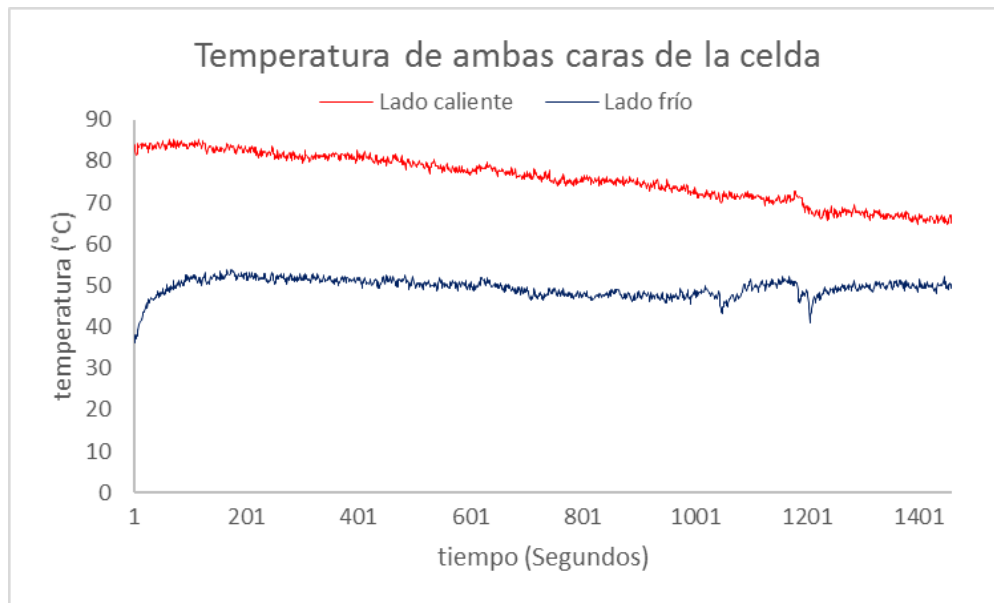


Figura 4.2.6: Temperatura de ambos lados de las placas que contienen una celda Peltier sometida a una diferencia térmica

La gráfica 4.2.5 muestra los valores obtenidos de voltaje y corriente de la celda Peltier en un intervalo de tiempo de 24 minutos.

Observamos cómo al inicio de las mediciones logra un valor por encima de los 400 mV (milivolts) y lo mismo sucede para la corriente, a los pocos segundos notamos un decrecimiento respecto a nuestros valores iniciales, a esto le asociamos que la ΔT varía debido a la transferencia térmica que provoca el contacto de nuestra placa conductora junto con la celda Peltier, el calor conservado en el contenedor con agua caliente transfiere de su energía hacia el lado opuesto y para mantener los valores iniciales de voltaje y corriente era necesario un movimiento que homogeneizara el agua del contenedor con agua fría, sin embargo segundos después los valores de voltaje y corriente se mantuvieron constantes hasta finalizar la medición.

De la gráfica 4.2.6 es un poco difícil apreciar los valores de la ΔT así que en la gráfica de a continuación se muestran los valores de esta variable y su comportamiento.

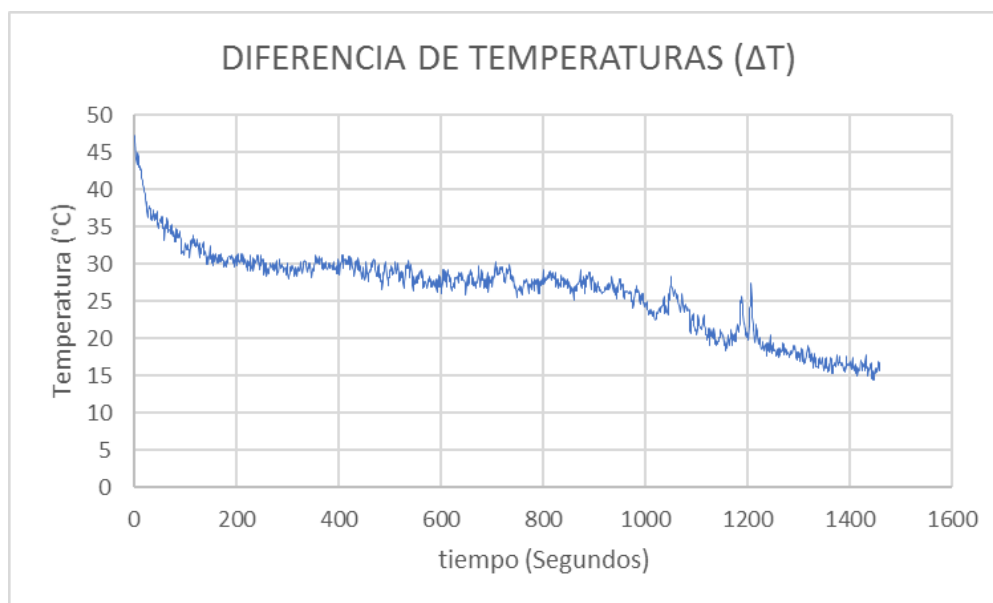


Figura 4.2.7: Diferencia de temperaturas de la celda Peltier contenida dentro de un sistema térmico con una diferencia de temperatura.

Dados los resultados obtenidos con nuestro experimento en esta sección, se toman los datos relacionados con la temperatura de ambas caras de nuestra celda Peltier para sustraer de ellos una diferencia térmica que nos ayudará a relacionar con la gráfica 4.2.5 la cantidad de energía eléctrica que produce una diferencia de temperatura en nuestro sistema térmico Peltier, de esta forma tendremos valores de voltaje y corriente eléctrica generados por una fuente de energía térmica diferente (agua caliente).

4.3. Efecto Peltier con una celda TEC1-12710

Con la finalidad de hallar el coeficiente Seebeck y la resistencia interna de la celda se procedió a hacer el siguiente arreglo experimental.

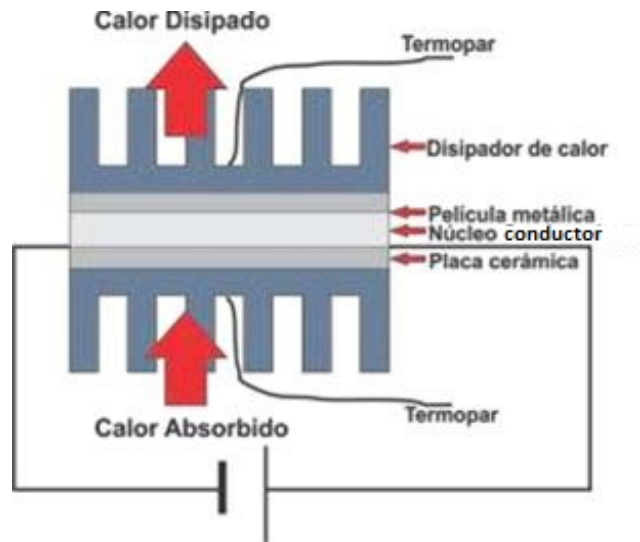
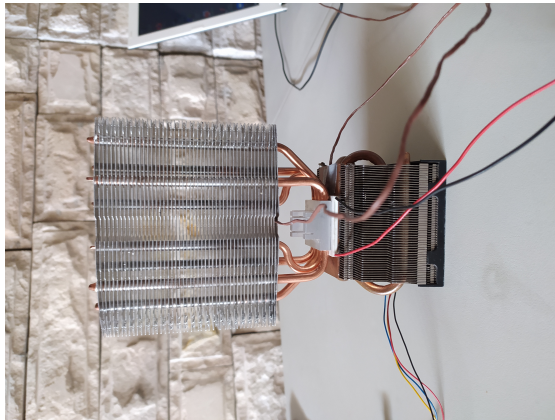


Figura 4.3.1: Arreglo de celda Peltier con dos disipadores de calor, dos termopares tipo k para medir su temperatura y una fuente de voltaje

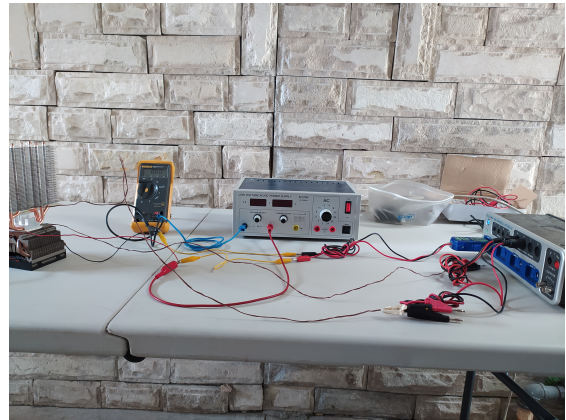
Con el arreglo experimental que se muestra en la figura 4.3.1 se pretende hallar el coeficiente Seebeck, en nuestro experimento pasado con paredes adiabáticas y una celda Peltier se registraron datos de voltaje y diferencia térmica por parte de nuestra celda peltier, ahora se pretende hacer uso de una fuente de voltaje para generar esa diferencia de temperaturas (efecto Peltier) y tomar datos del voltaje que produce la celda así como el voltaje dado por la fuente.

podemos notar qué, al suministrarle una cantidad de voltaje y corriente eléctrica a nuestra celda peltier tiende a liberar calor por una parte de sus caras mientras que en el lado opuesto absorberá ese calor, por eso es importante que ambos disipadores que coloquemos ocupen mayor parte del área total de la celda, los resultados dependen de una buena manera de disipación de energía calorífica.

De acuerdo a las especificaciones de la tabla 3.5.1, nuestra celda tiene rangos de operación los cuáles se deben respetar para evitar dañarla, para nuestro caso ocuparemos **5 ampers** de corriente y **15 volts** en los terminales de la celda.



(a) Celda Peltier con dos disipadores de calor



(b) Circuito armado con nuestro sistema Peltier

Figura 4.3.2: Experimento Peltier con fuente de voltaje

Se untó pasta térmica entre los disipadores y la celda Peltier para que el calor generado por la celda pueda moverse a lo largo de la pasta térmica y llegar al disipador que, a través de su estructura con materiales de aluminio (buenos conductores de calor), lo enviará al exterior (medio ambiente), dado que los disipadores de calor tienen superficies metálicas, existen irregularidades que son tapadas por la pasta para lograr un mejor contacto entre ambas partes, una vez asegurándonos de que la pasta térmica cubriera bien ambas superficies de nuestra celda y el disipador se situaron las puntas de los termopares tipo K de tal manera que tocaran la parte de en medio de nuestra celda y tener un registro en ambas caras para medir su temperatura. El tiempo de medición para éste experimento fué de 5 minutos con el objetivo de crear una ΔT que estuviera en el rango de medición para la celda obteniendo así las siguientes gráficas:

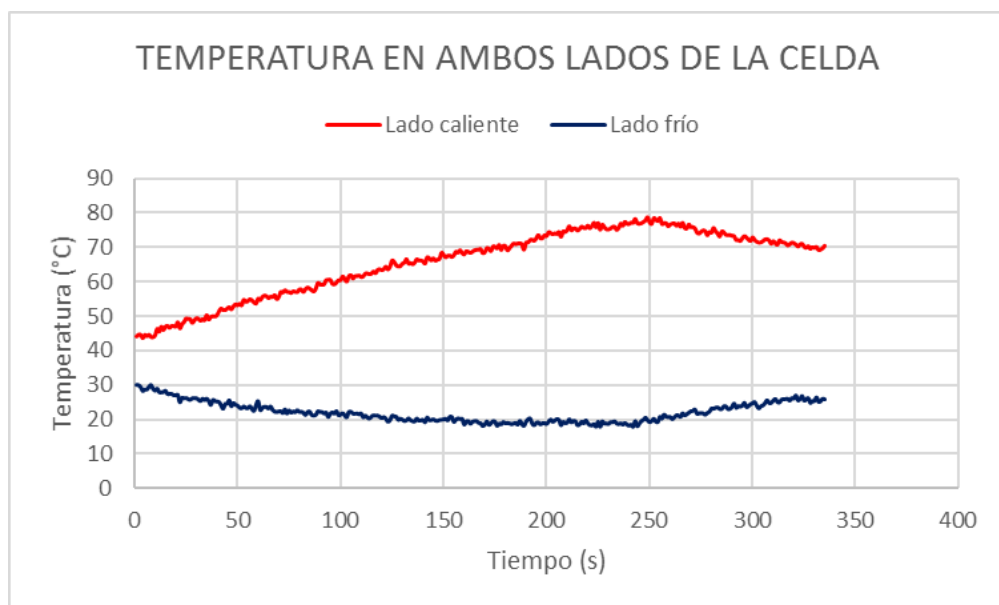


Figura 4.3.3: Incremento y decremento de temperatura en la celda Peltier conectada a una fuente de voltaje.

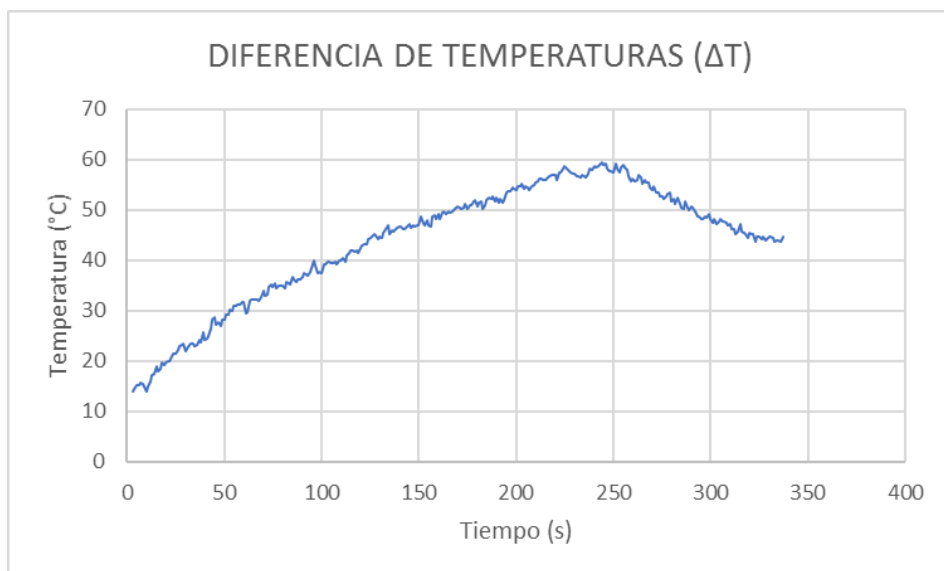


Figura 4.3.4: Diferencia térmica de la celda Peltier, cuando la fuente de voltaje se apaga se puede notar un decrecimiento en la temperatura, esto se debe a que tiene que alcanzar eventualmente el equilibrio térmico.

Se puede observar de la figura 4.3.4 un incremento en la ΔT durante el tiempo al que estuvo conectado nuestro sistema térmico en la fuente de voltaje.

La diferencia de temperatura dependerá de los siguientes factores: la corriente eléctrica que le suministremos a nuestra celda Peltier, el medio al que esté sometido así como un buen disipador de calor. Es importante acentuar este último debido a que hay un incremento de temperatura en una cara de la celda. Para evitar ese incremento de calor en la cara opuesta de la celda con el uso de un buen disipador de calor mantendremos la ΔT constante, al menos un periodo corto de tiempo mientras registramos datos y procedemos a realizar las operaciones correspondientes para la obtención de la constante Seebeck y la resistencia interna de nuestra celda Peltier (TEC1-12710).

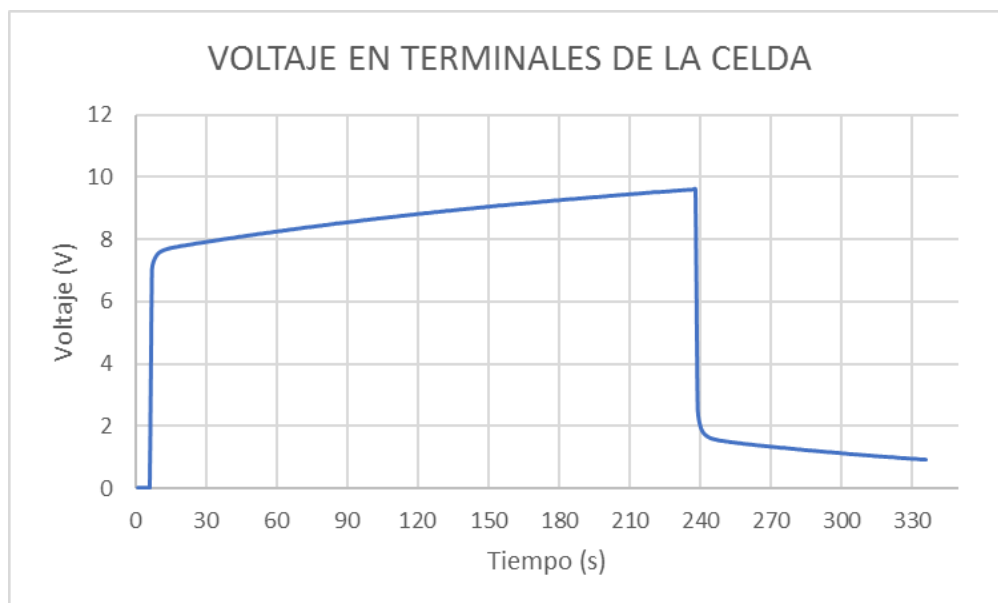


Figura 4.3.5: Voltaje en las terminales de la celda registrado durante el suministro de energía eléctrica desde una fuente de voltaje.

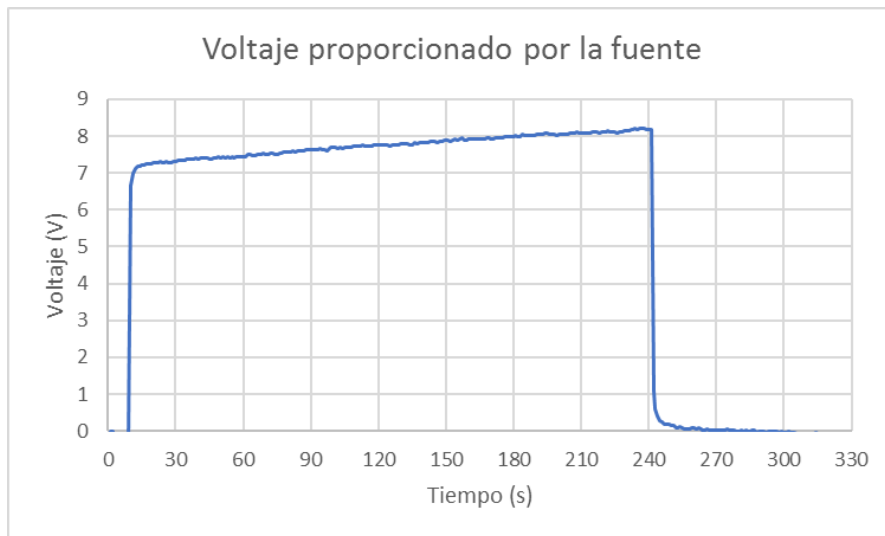


Figura 4.3.6: Gráfica que muestra la cantidad de voltaje recibida de una fuente de energía eléctrica cuyo incremento se debe a la variación en la resistencia interna de la celda Peltier.

De los resultados que se muestran en las figuras 4.3.5 y 4.3.6 se observa un voltaje diferente aunque las gráficas parezcan ser las mismas, tienen el mismo comportamiento pues aumenta el valor del voltaje respecto al tiempo en ambos casos, sin embargo, el voltaje medido en las terminales de la celda al apagar la fuente se debe al efecto Seebeck, el cual se produce al existir una diferencia entre la temperatura de ambos lados de la celda que se mantiene por un tiempo t durante el flujo de energía eléctrica que se le suministró y podemos ver como este efecto disminuye al disminuir esta diferencia de temperatura. Mientras que el aumento en el voltaje cuando la fuente esta encendida se debe tanto al efecto Seebeck como al cambio de la resistencia interna de la celda, la cual se ve afectada por la temperatura de la celda.

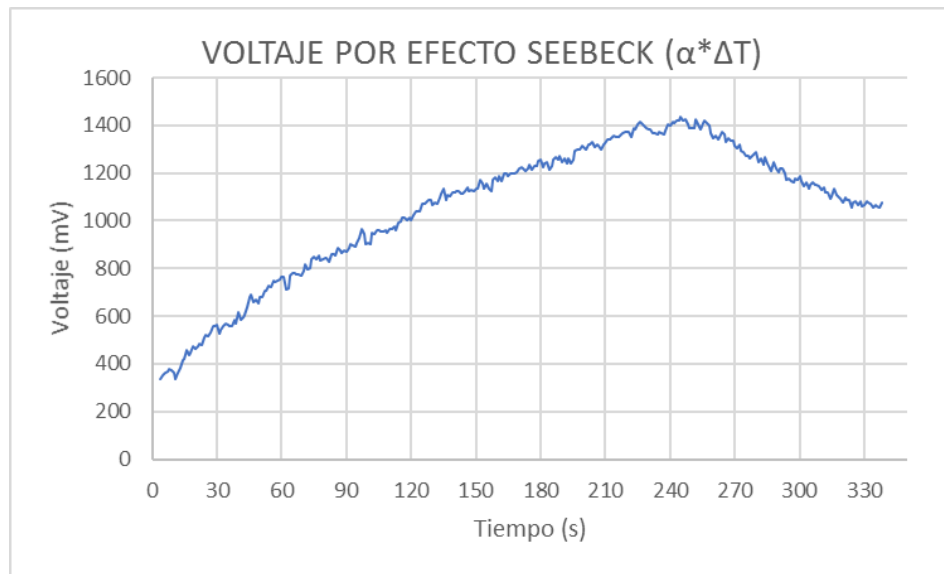


Figura 4.3.7: Voltaje generado por el efecto Seebeck cuyos valores varían por la diferencia térmica a la que se sometió la celda Peltier.

4.4. Medición y obtención de los coeficientes Peltier-Seebeck

La figura siguiente muestra el diagrama técnico que se efectuó en nuestro arreglo experimental ilustrado en la figura 4.3.2(b)

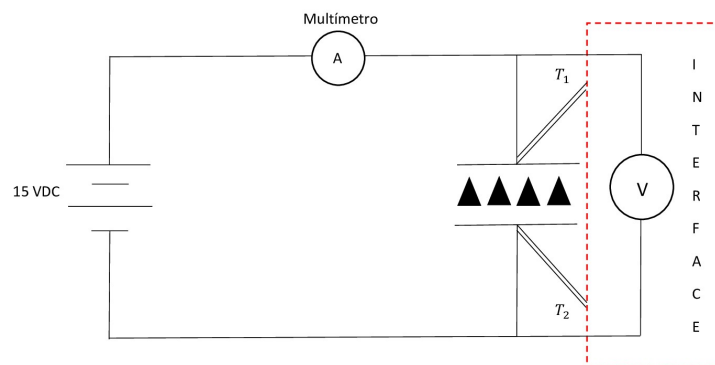


Figura 4.4.1: Diagrama técnico que muestra de manera más detallada el circuito que se empleó para la conexión de nuestro sistema térmico a una interfaz de PASCO.

Podemos ver qué, T_1 y T_2 están conectados a nuestra interfaz de PASCO mediante dos termopares tipo K que tocarán una cara de la celda Peltier correspondiente, el software que viene incluido en la interfaz PASCO cuenta con sensores de temperatura que nos permitirán medir directamente la temperatura de ambas caras de la celda al mismo tiempo las terminales de la celda para medir el voltaje de la misma, de igual manera estarán conectadas a la misma interfaz con sus sensores de voltaje que incluye el software registrando datos en un ordenador con frecuencia de 1 Hz, ésta frecuencia es importante debido a la precisión que quieras tener en tus mediciones.

Se toman mediciones de la temperatura en los dos lados de la celda peltier y el voltaje en sus terminales cada segundo. Inicialmente los dos lados de la celda se encuentran a $26^{\circ}C$ con 0 Volts en sus terminales, la fuente se enciende a los 5 segundos y se apaga a los 237 segundos. Durante el tiempo que la fuente permanece encendida el voltaje medido en las terminales de la celda está dado por:

$$V_t = V + V_f \quad (4.2)$$

donde V_t es el voltaje total en las terminales de la celda y V_f el voltaje proporcionado por la fuente.

Se obtiene el coeficiente de Seebeck (α) aplicando la siguiente ecuación:

$$V = \alpha \Delta T \quad (4.3)$$

solamente cuando la fuente ya ha sido apagada, donde α ($\frac{mV}{^{\circ}C}$) es el coeficiente de Seebeck y ΔT es la diferencia de temperatura entre el lado de la celda que absorbe calor y el que lo disipa.

La relación entre el coeficiente de Peltier y el coeficiente de Seebeck está dada por:

$$\beta = \alpha T \quad (4.4)$$

siendo T la temperatura de la unión.

El resultado se muestra en la Figura 4.4.2, donde se observan valores de α dispersos, por lo tanto se toma el valor medio ($\alpha = 24.14 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$).

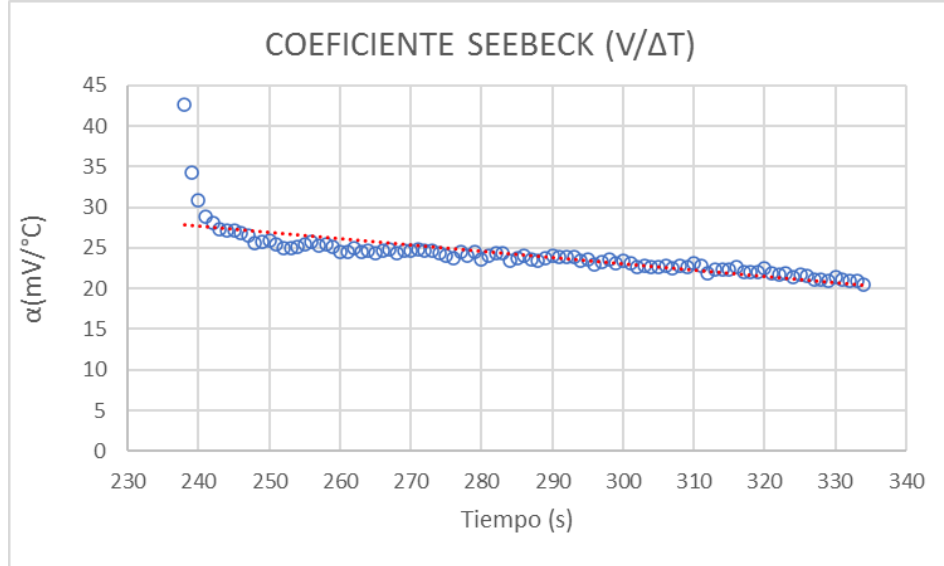


Figura 4.4.2: Coeficiente Seebeck y su línea de tendencia

4.4.1. Medición de la resistencia interna de una celda TEC1-12710

Después de haber registrado los valores de los voltajes obtenidos por el efecto Seebeck y el voltaje dado por la fuente, aplicamos la ley de *ohm* para hallar la resistencia interna de nuestra celda Peltier, donde, el voltaje que ocuparemos será V_f voltaje de la fuente y como la corriente suministrada a la celda fué la misma (no cambió durante las mediciones) se toma I_f , la expresión queda de la siguiente manera:

$$R_{int} = \frac{V_f}{I_f} \quad (4.5)$$

Ahora, con nuestro registro de datos en el ordenador se substituyó cada valor en la ecuación (4.5) para hallar la resistencia interna de nuestra celda Peltier como se muestra en la figura 4.4.3.

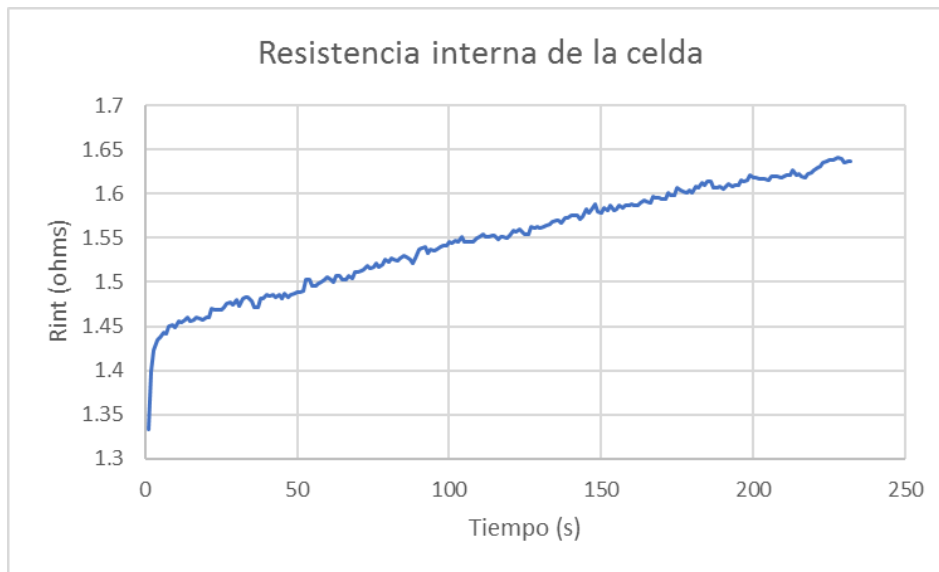


Figura 4.4.3: Resistencia interna de la celda peltier

Se observa que la resistencia eléctrica de la celda Peltier no presenta un valor constante, sino que se ve un incremento de este. Para explicar este efecto, se plantea que se debe al aumento en la temperatura de la celda. La celda peltier que ocupamos tiene una resistencia de 1.25Ω a una temperatura de 27°C (ver tabla 3.5.1) por lo que al tener un incremento en su temperatura la resistencia interna tiende a aumentar.

4.5. Mecanismo del seguidor solar

El diseño de un seguidor solar se pensó para la automatización del manejo en la medición de nuestra celda Peltier, al conocer los valores de voltaje, corriente y temperatura obtenidos mediante sistemas térmicos diferentes se quiso llegar a medir durante un periodo mayor de tiempo y sobre todo llevar nuestras pruebas hacia el exterior utilizando como fuente de energía calorífica la energía del sol. El mecanismo se maneja con electrónica de arduino la cuál con programación que se incluye dentro del software de la plataforma se creó un código que

se muestra en la figura 5.0.1, éste código se adjunta en una placa de arduino mega y se conecta en los pines correspondientes que se dirigen hacia dos sensores de temperatura tipo MAX6675 y un sensor de voltaje tipo FZ0430. Para la parte móvil del seguidor se muestra en la siguiente figura el plano del diseño final de nuestro seguidor solar.

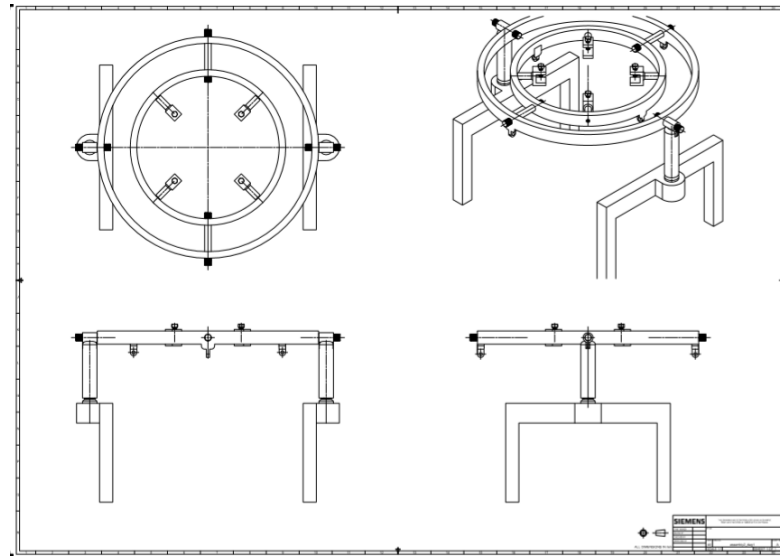


Figura 4.5.1: Plano de modelación del seguidor solar

En la figura 4.5.1 observamos dos discos de diferente tamaño para permitirle moverse con dos grados de libertad. En el anillo pequeño lleva consigo 4 garras para sujetar las lentes que, además, se ajustarán al tamaño de las lentes que vayamos a colocar.

En la parte inferior de la celda se utilizarán disipadores de calor tomando en cuenta que necesitamos efectuar una diferencia de temperatura y estos nos ayudarán a disipar el calor de la parte opuesta de la celda. Dentro de nuestro circuito que irá conectado con la placa de arduino se conectarán dos sensores, uno para medir la temperatura que la celda alcance y el otro nos medirá de manera directa el voltaje.

4.5.1. ¿Cómo funciona?

El prototipo que se encuentra en la Figura 4.5.2 es el diseño armado final que obtuvimos después de un análisis de cómo hacer incidir un rayo de luz que atravesará una lente convergente con el objetivo de apuntar a la celda peltier en el foco del rayo para medir la temperatura en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) de la parte superior de la celda, mientras que en el lado inferior de la misma colocamos un disipador de calor para mantener una (ΔT) óptima y llevar un registro del voltaje y corriente eléctrica generado. Con ayuda de la programación arduino haremos que los anillos que sobresalen en nuestro modelo se muevan de la siguiente manera:

- Anillo 1: Se mueve en dirección del ángulo cenital, es decir, tiene una inclinación de 0° a 90° respecto al sol. De esta manera el anillo hace que nuestra lente se encuentre en una posición ortogonal al haz de luz.

- Anillo 2: Tiene una movilidad en el ángulo azimutal, éste anillo mueve la lente con la misma trayectoria que lleva el sol, con un ángulo de longitud que va de 0° hasta 180° .

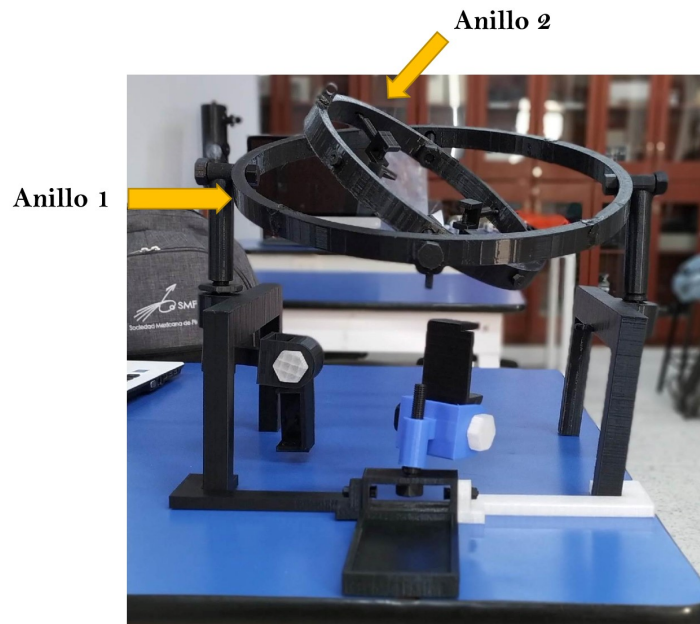


Figura 4.5.2: Modelo de seguidor solar.

4.6. Seguidor solar.

Para nuestra toma de datos se procedió a colocar una lente de fresnel de 12 cm. de diametro qué, de acuerdo con la tabla 3.8.1, presenta un nivel MEDIO respecto a su relación de concentración debido a que el área de nuestra lente (área efectiva de apertura) equivale a 113 cm^2 mientras que el área del receptor fué de 3.14 cm^2 . Si hacemos el cociente pra obtener la relación de concentración nos dá un valor entre 10 - 100.

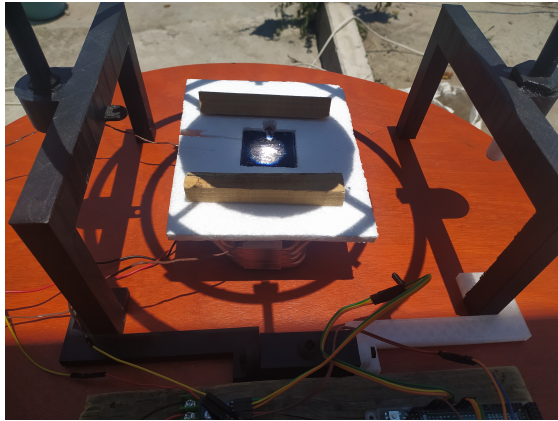
Se tomaron lecturas de la temperatura de ambos lados de nuestra celda colocando un disipador en la parte de abajo para mantener una ΔT óptima. La cantidad de luz que recubre una superficie depende de la inclinación con que inciden los rayos en ella, la máxima energía calorífica por cm^2 la obtendremos cuando tengamos nuestra lente totalmente perpendicular al sol, de ésta manera ajustando su

distancia focal podremos medir cierta cantidad de energía y una diferencia de potencial producida por nuestra celda peltier, Los datos presentados a continuación se midieron al rededor de las 12:00 horas del día siendo éste horario y ángulo de inclinación los que tienen los rayos solares como punto máximo de energía.

Calculamos la declinación solar mediante la ecuación [4]:

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (4.6)$$

Siendo n el día que vamos a ocupar para medir. De ésta manera tendríamos el ángulo de inclinación respecto al sol en su posición perpendicular respecto al ángulo zenital.



(a) Seguidor solar enfocando rayos solares en nuestra celda



(b) Enfóque de rayos solares sobre la celda

Figura 4.6.1: Seguidor solar colocado cuando el sol se encuentra perpendicular a la lente

Para las siguientes mediciones llevamos nuestro seguidor en un lugar donde tuviera espacio para poder medir y que llegaran de forma directa los rayos del sol atravesando nuestra lente fresnel. Se creó un esquema del experimento para mostrar cada componente y la estructura que tuvo.

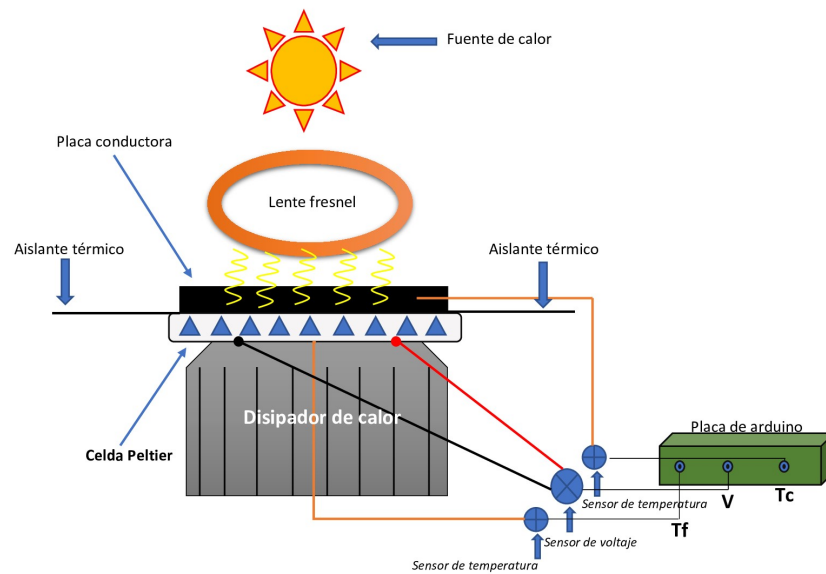


Figura 4.6.2: Montaje de una lente fresnel en nuestro seguidor solar (esquema técnico)

La primera prueba fué con la finalidad de medir los valores máximos de nuestra celda, se propuso empezar las mediciones en un periodo de aproximadamente una hora la cuál nos permitiría concentrar el calor en el área de la celda cuando la posición del sol se encontrara perpendicular a nuestro seguidor.

Los termopares conectados al disipador y a la celda Peltier, se trataron de colocar lo más cerca posible del centro de la celda para medir con mayor precisión su energía térmica. Las terminales de la celda Peltier los conectamos al circuito armado en conjunto mediante la plataforma de arduino, adjuntamos el código que nos permitió medir temperatura y voltaje de la celda TEC1-12710. De las mediciones tomadas en nuestra placa de arduino al ordenador generamos los gráficos siguientes.

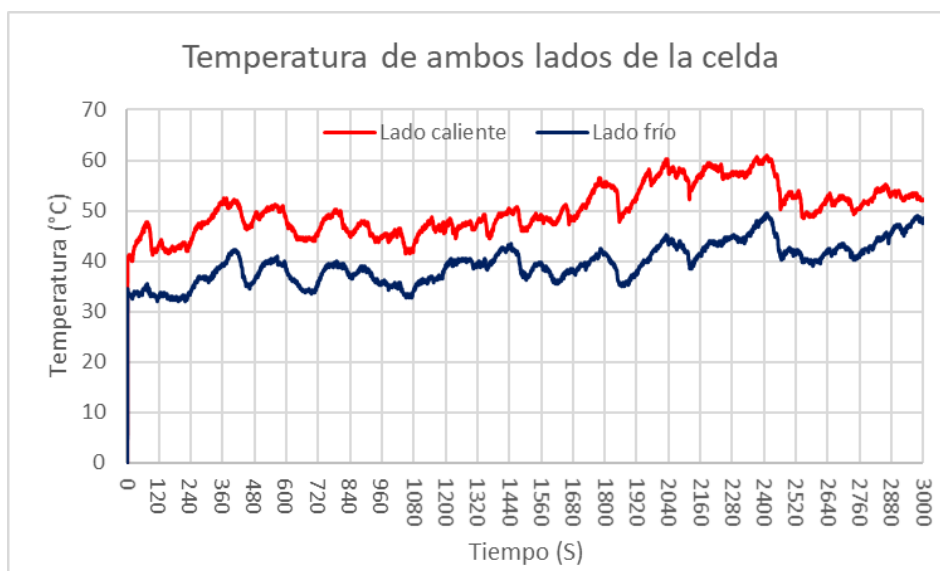


Figura 4.6.3: Temperatura medida en ambas caras de la celda Peltier registrada en una placa de arduino.

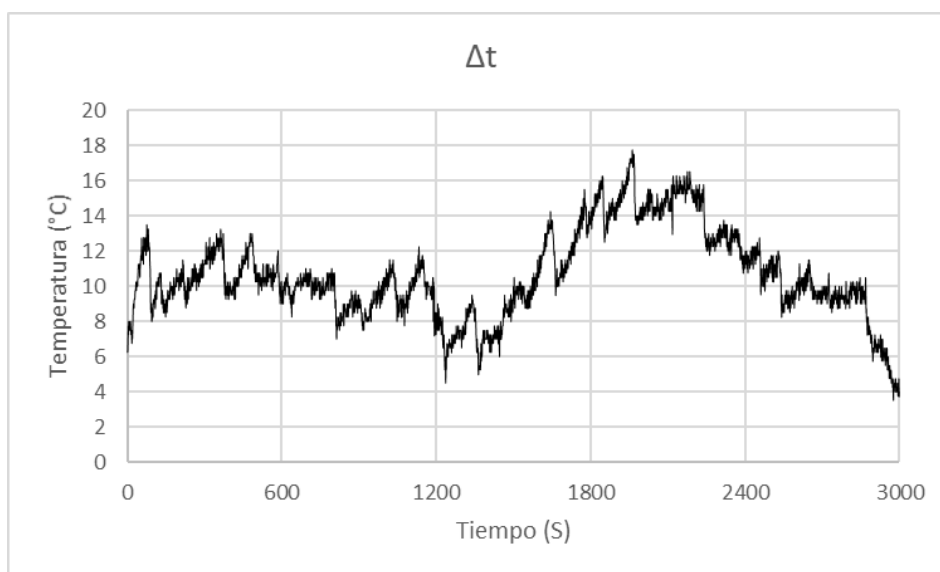


Figura 4.6.4: Diferencia de temperatura mostrando una variación en cada punto debido a los cambios de temperatura a los que estaba expuesto nuestro sistema térmico.

La diferencia que se obtuvo fue pequeña puesto que no colocamos un disipador de grandes dimensiones, además, se planeaba medir la respuesta que tendría la celda en cuanto al voltaje al ser una cantidad pequeña de la ΔT el voltaje generado por el módulo peltier se mantuvo en un rango de **300 mV** suficientemente buenos para una diferencia térmica pequeña, del orden promedio de 10°C

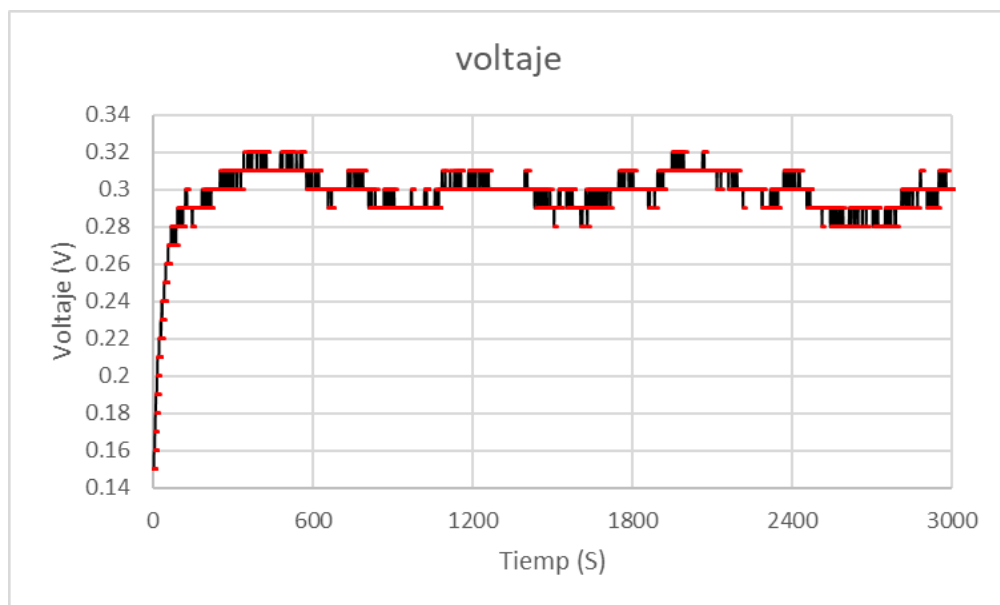


Figura 4.6.5: Voltaje de la celda Peltier generado por una $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$.

En los valores que registró la placa de arduino se evaluó el ruido del sistema conectando la señal de tierra a una señal analógica de nuestra placa y tuvimos como resultado valores de **cero**, y esto se debe a que el ruido electrónico está por debajo de la resolución de los datos que se están tomando que son del orden de mV. (milivolts) por lo tanto no afectan los resultados obtenidos con nuestra placa de arduino.

La corriente producida por nuestra celda Peltier se aproximaba a los **100 mA.** y se mantenía constante en tanto el voltaje mantuviera el mismo comportamiento.

4.6.1. Prueba 2 con seguidor solar

Para la segunda prueba utilizamos exactamente el mismo procedimiento, ahora medimos en un periodo de 2 horas aprox. se manipuló de forma manual nuestro seguidor solar logrando enfocar el rayo de luz con nuestra lente de forma perpendicular y así mismo tener la mejor recepción de calor en nuestra celda.

La hora a la que nos dispusimos a medir fué a las 10:30 - 12:30 A.M. La Temperatura ambiente a la que nos encontrabamos inicialmente rondaba entre los 18° hasta alcanzar una temperatura de 22° al concluir nuestras mediciones. Generando las mismas gráficas para comparar se obtuvo lo siguiente.

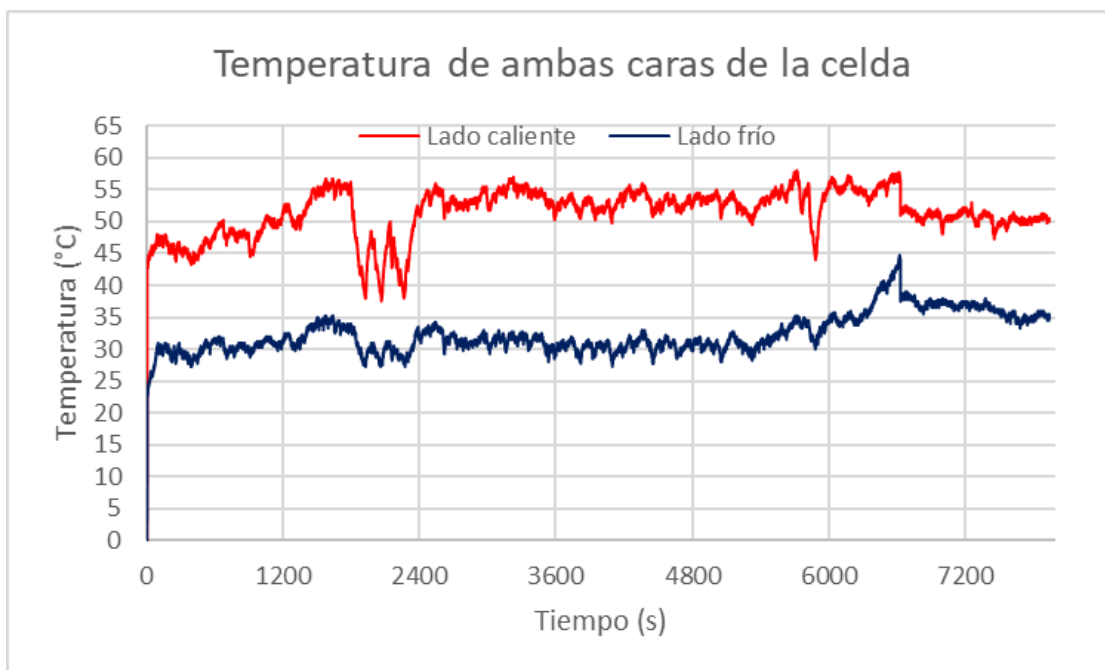


Figura 4.6.6: Temperatura medida en ambas caras de la celda Peltier, las variaciones de temperatura se deben a las condiciones ambientales que se presentaron durante las mediciones.

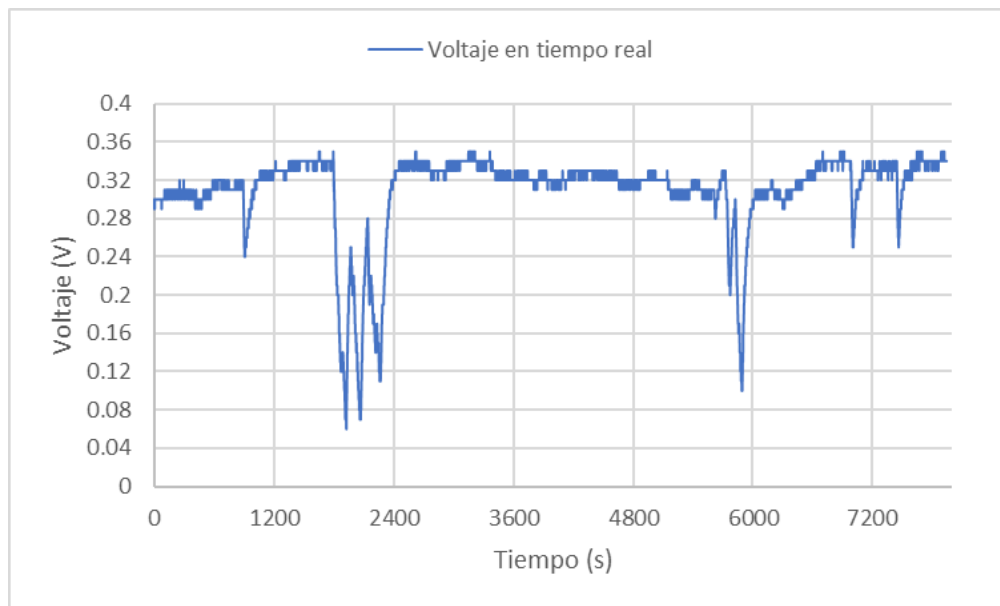


Figura 4.6.7: Voltaje medido en tiempo real de la celda Peltier

Las variaciones que se ven en los gráficos (picos de la curva) se deben a que durante la toma de datos se interpuso una nube la cuál taparía el sol y con ésta los rayos que incidían sobre nuestra lente, hubo un cambio en la temperatura de nuestro sistema, solo fueron minutos los que estuvo oponiéndose a nuestras mediciones en dos ocasiones, notamos también que esa variación se reflejó en el voltaje que junto con la temperatura se registraban los valores en tiempos reales.

Para éste caso la diferencia térmica promedio fué de unos 19°C . mientras que el voltaje máximo logrado alcanzó los **350mV**. Una diferencia de unos 50 mV. respecto a la prueba uno.

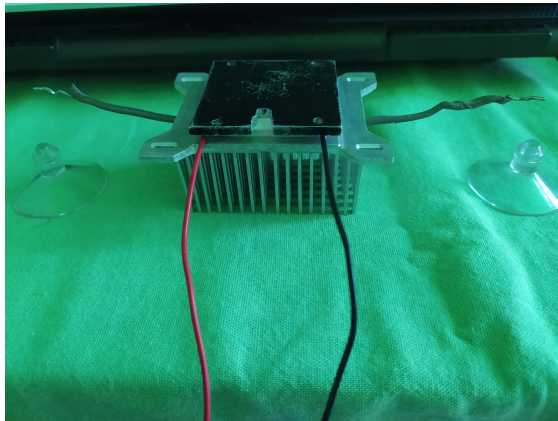
4.7. La celda Peltier en condiciones normales

Siguiendo con la intención de ocupar la fuente de energía calorífica solar nos dispusimos a hacer una última prueba pero cambiando

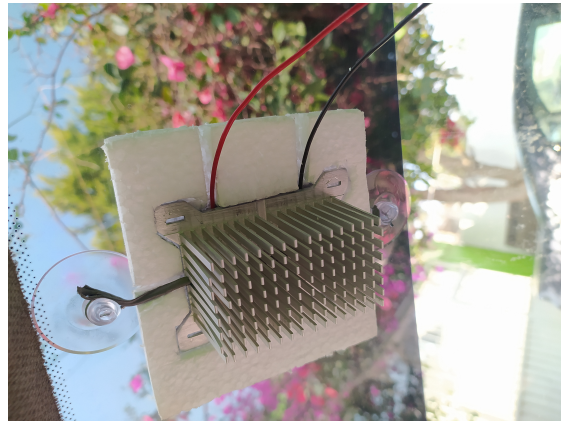
nuestro sistema térmico, esta vez se pretendió medir en un ambiente más cotidiano como el uso de un automóvil utilizando la misma celda Peltier y la misma aplicación del fenómeno termoeléctrico para hallar una toma de datos de la cantidad de energía que puede generar nuestra celda en un día común y con cielo despejado.

Cabe mencionar que la región en la que habito el clima es templado subhúmedo con una temperatura máxima promedio de alrededor de 25°C y se presenta en los meses de abril y mayo, ésto en el estado de Tlaxcala.

Los polarizados dentro de los parámetros normales y reglamentarios se encuentra una franja de aprox. 20 cm. de ancho. tiene hasta un 5 % de transparencia para el parasol. la ventaja es el color negro del polarizado, qué, comparado con el resto del cristal es más caliente cuando se expone al sol, se colocó la parte caliente de la celda y se sujetó de tal forma que con el movimiento del auto no se cayera, en la siguiente figura se muestra la colocación de nuestra celda.



(a) Celda Peltier montada en un disipador



(b) Celda Peltier colocada en parabrisas de un auto

Figura 4.7.1: Celda Peltier puesta en la parte superior de un auto para capturar el calor del sol

En la figura podemos observar que el disipador cuenta con múltiples tiras del mismo material unidas a la placa de arriba y funcionan

de tal forma que, cuando entra ventilación por éstas tiras la energía calorífica absorbida por la parte superior se disipa con mayor facilidad pues le permite entrar en contacto directo con el aire del medio ambiente al que se somete, en éste caso el aire que entra por la ventilación de las ventanas. Las terminales de la celda van conectadas con el mismo circuito empleado para nuestro seguidor solar, con los termopares tipo K y el sensor de voltaje obtuvimos las siguientes gráficas:

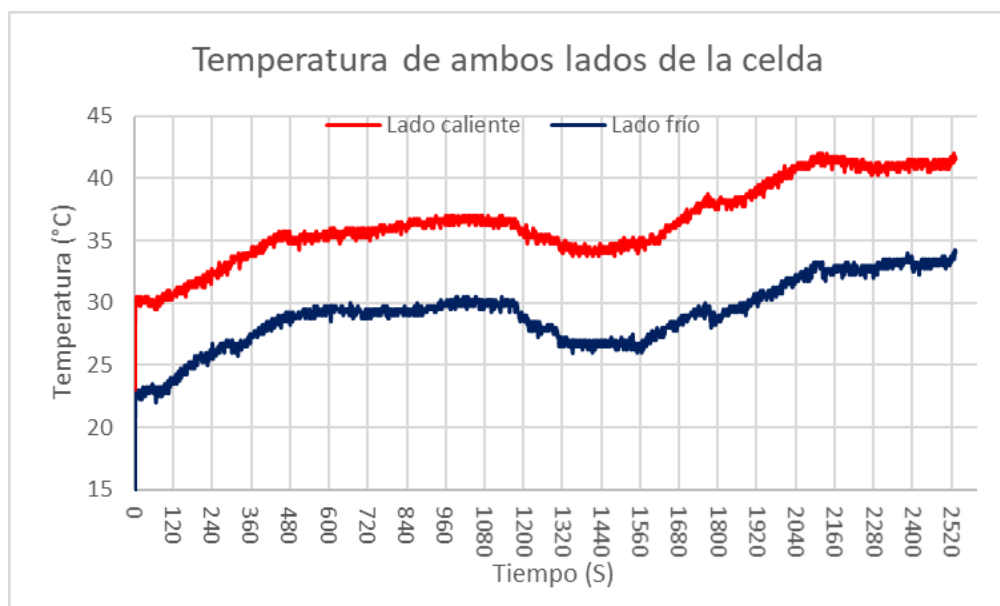


Figura 4.7.2: Temperatura de lado caliente y lado frío de la celda colocada dentro de un automóvil.

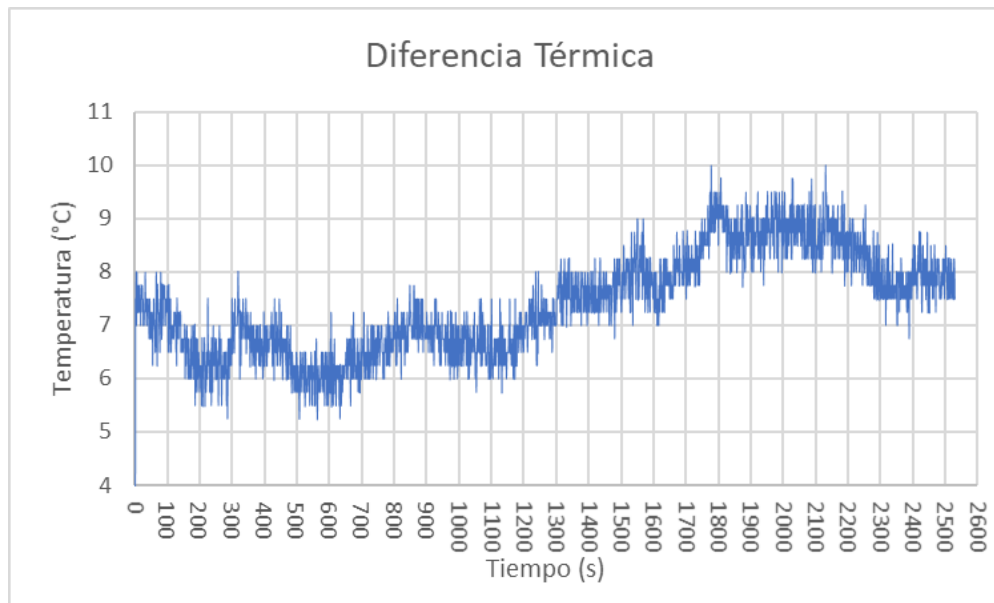


Figura 4.7.3: Diferencia térmica obtenida por un carro en movimiento

La diferencia de temperatura obtenida en nuestro sistema térmico dentro de un automóvil varía con el tiempo del recorrido que se le hizo, a pesar de ser pequeña su magnitud del orden de 10°C debemos mencionar que no estamos ocupando ninguna fuente que consuma energía por lo que en un arreglo en serie de celdas Peltier podría obtener mejoras en las mediciones.

El voltaje medido sobre la diferencia térmica representada en la figura 4.7.3 es pequeña a comparación de los valores obtenidos con nuestro seguidor solar. El voltaje registrado se muestra en la siguiente gráfica.

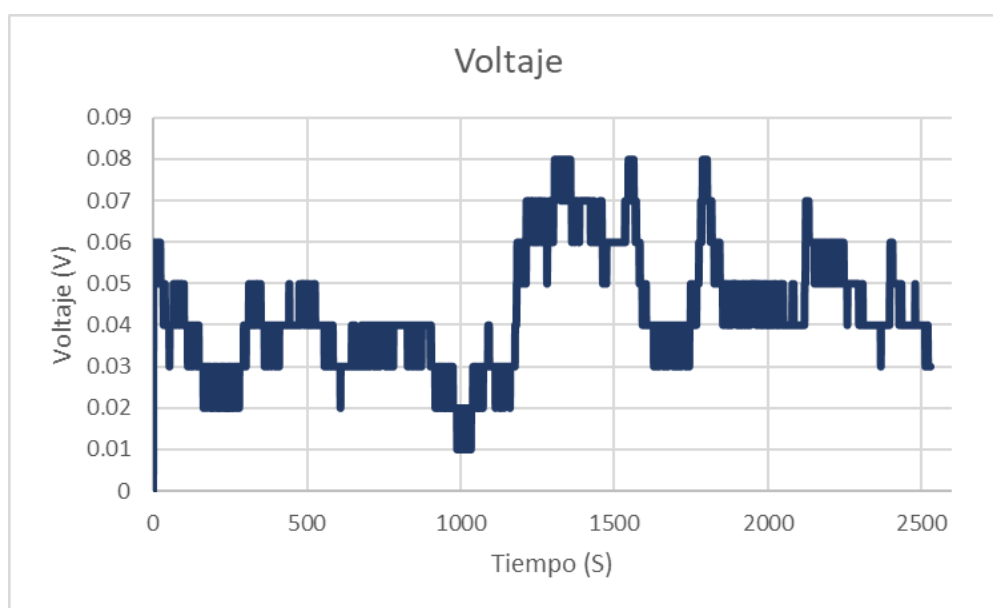


Figura 4.7.4: Voltaje medido de la celda Peltier registrado con una tarjeta de arduino dentro de un automóvil circulando.

Resaltemos qué, la variación en la temperatura es pequeña y medimos valores del voltaje cercanos a los **80 mV** como valor máximo sin embargo, fué en un periodo de tiempo corto, aproximadamente 40 minutos de camino conduciendo, recordemos que una jornada laboral de un taxista en horas pico abarca un aproximado de 6 horas conduciendo, se puede mejorar éste resultado con una conexión en serie de celdas peltier que abarquen un área mayor sin afectar el panorama visible del parabrisas del automóvil.

4.8. Eficiencia en la práctica

En la vida real, la eficiencia operativa de una celda Peltier depende de una serie de factores externos que se enumeran a continuación, lo que pueden contribuir a reducir enormemente la eficiencia tanto en la celda como del sistema en general:

- Temperatura de la celda

- Orientación de la celda
- Época del año
- Disipador de calor

Los factores que tienen el mayor impacto en la eficiencia de la celda son la temperatura y la capacidad que se pueda lograr de disipar la energía del lado opuesto, en general una diferencia térmica es un factor primordial para resultados eficientes.

Capítulo 5

Conclusiones

Las leyes físicas nos muestran un panorama teórico en el que es necesario un buen manejo de las habilidades para desarrollar sistemas controlables y óptimos con el propósito de refutar la teoría en un sistema aplicado sobre las condiciones que éste requiera.

La transferencia de calor efectiva requiere de conductores térmicos eficientes. Cada conductor térmico tiene propiedades químicas y físicas únicas que permiten que las propiedades de calentamiento se utilicen de forma beneficiosa.

En condiciones controladas los resultados del coeficiente Seebeck y la resistencia interna de la celda Peltier fueron los esperados de acuerdo a nuestro modelo experimental y a la cantidad de energía eléctrica a las que se sometió.

La potencia eléctrica que necesita nuestra celda Peltier para generar una ΔT de $52.5^{\circ}C$ será $43.58W$ aplicando la ecuación 3.7, esto se aplica para la refrigeración termoeléctrica debido a la pérdida de energía calorífica en nuestra celda Peltier permitiendo usar la parte opuesta de la celda como lado de congelamiento.

Para tener una generación eléctrica óptima en la celda Peltier TEC1-12710 es necesario mantener una ΔT constante, en condiciones controladas con un termogenerador y un sistema de circulación de energía térmica constante se obtienen respuestas de voltaje de alrededor de $1.7V$ pero con la condición de un consumo energético, sin embargo para una generación de voltaje por parte de la celda Pel-

tier en un sistema térmico sin consumo de otras fuentes de energías eléctricas presenta valores menores, al rededor de 200mV y 250mA de corriente eléctrica, si tomamos en cuenta un arreglo en serie o en paralelo de dichas celdas se generan una potencia eléctrica superior.

Como fuente de energía térmica proporcionada por el sol se concluye que el uso de una lente de fresnel nos genera una diferencia térmica optima para la generación de un voltaje lo suficientemente bueno, en éste caso 350mV. a temperatura ambiente ($22^{\circ}C$) en un día despejado y con un disipador de calor cuya superficie abarca las dimensiones de nuestra celda Peltier.

El uso de la celda Peltier nos ayuda a tener un mejor entendimiento a cerca de fenómenos termoeléctricos asociados, tanto el efecto Peltier como el efecto Seebeck, los resultados registrados en éste trabajo se mantienen para su uso como referencia de sus posibles aplicaciones en trabajos posteriores relacionando una diferencia térmica de una energía eléctrica.

Apéndice

- Código de aduino para la medición de temperatura y voltaje en nuestro sistema térmico.

```
#include "max6675.h"

int ktcSO = 10;
int ktcCS = 11;
int ktcCLK = 12;
int ktcSO1 = 5;
int ktcCS1 = 6;
int ktcCLK1 = 7;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
MAX6675 ktcl(ktcCLK1, ktcCS1, ktcSO1);

int Sensor = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // give the MAX a little time to settle
  delay(1000);
}

void loop() {
  // basic readout test

  Serial.print(" ");
  Serial.println(ktc.readCelsius());
  Serial.print(" ");
  Serial.println(ktcl.readCelsius());

  float voltaje = (float)25*analogRead(A0)/1024;
  Serial.print(" ");
  Serial.println(voltaje);
  delay(1000);
}
```

Figura 5.0.1: Código para medir voltaje y temperatura.

- Código para medir el ruido que generaba nuestra tarjeta de arduino.

```
int sensorPin = A0;    // select the input pin for the potentiometer
int sensorGND = A1;    // select the input pin for the potentiometer

int ledPin = 13;       // select the pin for the LED
int sensorValue = 0;    // variable to store the value coming from the sensor

void setup() {
  // declare the ledPin as an OUTPUT:
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // read the value from the sensor:
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  // turn the ledPin on
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  // stop the program for <sensorValue> milliseconds:
  delay(sensorValue);
  // turn the ledPin off:
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  // stop the program for for <sensorValue> milliseconds:
  //delay(sensorValue);
  Serial.println(sensorValue);
  delay(1000);
}
```

Figura 5.0.2: Código para medir el ruido en nuestra placa de Arduino.

- Constancias recibidas por la presentación del trabajo en eventos de divulgación científica y en congresos nacionales.



Figura 5.0.3: presentación del trabajo titulado “El efecto termoeléctrico” en la semana nacional de ciencia y tecnología



Figura 5.0.4: Presentación del trabajo “El efecto termoelectrico, una forma de energía alterna” durante el congreso nacional de física con sede en la ciudad de Puebla.



Figura 5.0.5: Presentación del trabajo “Eficiencia de una celda Peltier sometida en condiciones ambientales” durante el congreso nacional de física con sede en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

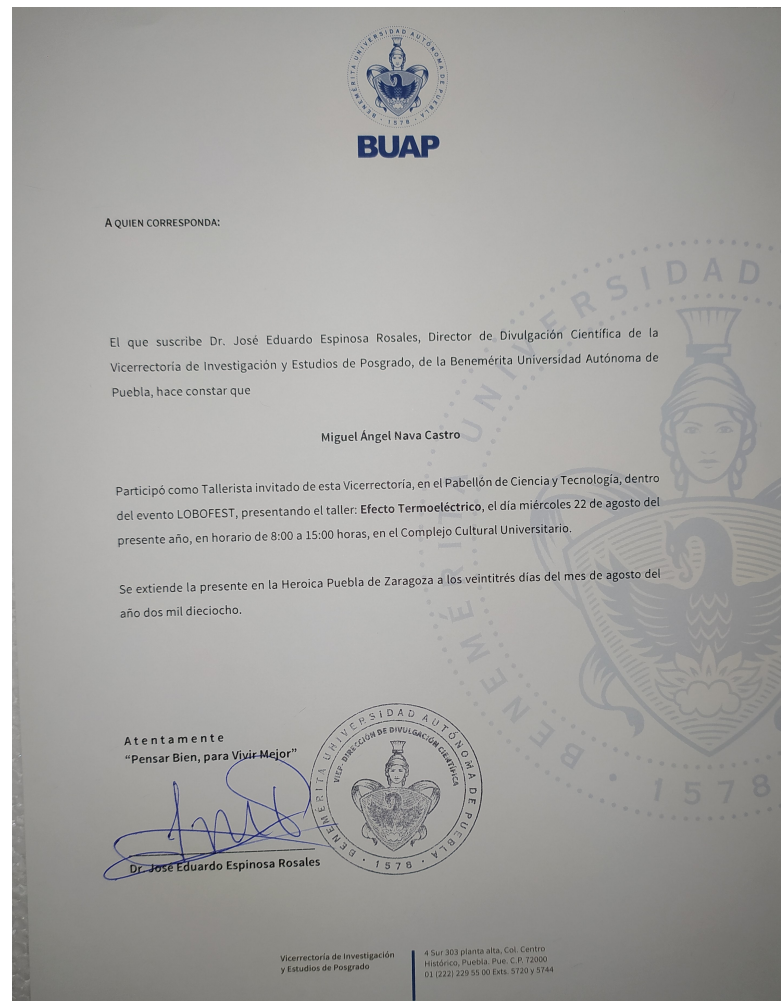


Figura 5.0.6: Presentación del trabajo “El efecto termoelectrico” en el evento Lobo fest, C.U. BUAP.



Figura 5.0.7: Presentación del trabajo “El efecto termoelectrico” durante el evento llamado puer-
tas abiertas (Open Lab) realizado en la facultad de ciencias fisico matematicas FCFM, BUAP.

Bibliografía

- [1] Ainhoa Azorín Penalva. *Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones técnicas*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2018.
- [2] W Blancarte. Instrumentación para el control de procesos industriales: Efecto peltier. *ITESO, Guadalajara, México, Sept*, 2001.
- [3] Benoît Boucher. Athanase peltier (1785-1845) et la thermoélectricité. *l'actualité chimique*, (415), 2017.
- [4] Román Bravo Cadena. *Mi profundo agradecimiento*. PhD thesis, CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, 2012.
- [5] F. Alberto Cardona-Maciel. *Efecto termoeléctrico*. PhD thesis, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías Universidad de Guadalajara, 2010.
- [6] Foro de reunión. Proyecto de generacion de electricidad con celulas peltier. (142), 2009.
- [7] Joan Fernández Juncà. Análisis de aprovechamiento de calores residuales de los gases de escape del motor térmico mediante efecto seebeck en una unión cu-al. 2014.
- [8] Sara Díez García. Analisis de viabilidad de aplicaciones para recuperación de energía mediante efectos termoeléctricos. *Madrid: Universidad Politécnica de Madrid*, 2017.

- [9] Sergio Gonzàlez Martín. Estudio y caracterización de aleaciones zn-sb para aplicaciones termoeléctricas. 2011.
- [10] Juan Antonio Gutiérrez et al. Modelado del gradiente de temperatura en espacios cúbicos controlados. 2020.
- [11] A. Ioffe, L. Stil'bans, E. K. Iordanishvili, T. S. Stavitskaya, A. Gelbtuch, and G. Vineyard. Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling. 1957.
- [12] MAESTRO EN CIENCIAS EN LA. *Materiales termoeléctricos de alto ZT en base de Si y sus aleaciones con Ge*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2016.
- [13] Hayati Mamur, MRA Bhuiyan, Fatih Korkmaz, and Mustafa Nil. A review on bismuth telluride (bi₂te₃) nanostructure for thermoelectric applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:4159–4169, 2018.
- [14] Hans Christian Oersted. On electro-magnetism. *Annals of Philosophy*, 2:321–337, 1821.
- [15] Daniel D Pollock. *Thermoelectricity: theory, thermometry, tool*. Number 852. ASTM International, 1985.
- [16] Daniel Ribeiro. Alessandro volta. *Revista de Ciência Elementar*, 1(1), 2013.
- [17] Mabel Román Vázquez. *Síntesis y caracterización de perovskitas híbridas de bismuto con nuevos cationes alternativos y su potencial aplicación en celdas solares*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [18] Eliud Romero Delgadillo. Diseño e implementación del sistema de climatización para un automóvil honda civic por efecto peltier.
- [19] Enn Velmre. *Thomas Johann Seebeck (1770-1831)*., volume 13. 2007.

- [20] Proyectos wikimedia. Efecto termoelectrico. 2021.
- [21] Thermogenerator, PHYWE, Recuperado de:
<https://www.phywe.com/es/termogenerador-con-2-banos-de-agua7481679/>
- [22] Ilce Tlanezi Lara Montiel, Julieta Fierro, Modelo para representar la trayectoria del sol sobre el globo terrestre.
- [23] Proyecto de generación de electricidad con células peltier, Foro sobre energía ecológica. Recuperado de: *<https://bricoenergia.foroactivo.com/t142-proyecto-de-generacion-de-electricidad-con-celulas-peltier>*.
- [24] AINHOA AZORÍN PENALVA, (Junio de 2018), EFECTO PELTIER Y DESARROLLO DE POSIBLES APLICACIONES, Universidad Politécnica de Valencia.
- [25] LARSON ELECTRONICS, (20 de abril de 2016), Lente de vidrio y acrílico que pasa los rayos UV en aplicaciones de luz UV. Recuperado de: *<https://es.larsonelectronics.com/blog/2016-04/20/industrial-lighting/glass-uv-passing-acrylic-lens-in-uv-light-applications>*
- [26] Gonzalo Soberanes Flores, (14 de Diciembre de 2017), Determinación de la resistencia eléctrica interna de una celda Peltier comercial, Universidad Politécnica del Valle de Évora
- [27] Gonzalo Soberanes Flores, (Marzo de 2017), DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE SEEBECK EN UNA CELDA PELTIER COMERCIAL, Universidad Politécnica del Valle de Évora.
- [28] Jorge I. Villa, Julio E. Rodríguez, (Diciembre de 2016), RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y COEFICIENTE SEEBECK EN COMPUESTOS DEL TIPO $\text{Ca}(\text{La})\text{MnO}$ PREPARADOS POR

EL MÉTODO DE REACCIÓN DE ESTADO SÓLIDO, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de: [http : //www.scielo.org.co/pdf/momen/n54/n54a01.pdf](http://www.scielo.org.co/pdf/momen/n54/n54a01.pdf)

- [29] Mohamed Amine Zoui, Saïd Bentouba, John G. Stocholm, Mahmoud Bourouis, (13 de Julio de 2020), A Review on Thermo-electric Generators: Progress and Applications, Laboratory of Energy, Environment and Information Systems (LEESI), University of Adrar, Adrar 01000, Algeria.
- [30] Efecto Seebeck y peltier, (Julio de 2018), Recuperado de: [https : //xdoc.mx/documents/1-efecto-seebeck-y-peltier-6020c7-af97027](https://xdoc.mx/documents/1-efecto-seebeck-y-peltier-6020c7-af97027)
- [31] Semiconductores intrínsecos y dopados, recuperado de: [https : //www.uv.es/ navasqui/Tecnologia/Tema3.pdf](https://www.uv.es/navasqui/Tecnologia/Tema3.pdf)
- [32] Jorge Castillo Fernandez, (2017), Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo, escuela de ingeniería y arquitectura, Universidad de Zaragoza.
- [33] Efecto termoeléctrico, difusión de portadores de carga. Recuperado de: [https : //es.wikipedia.org/wiki/Efecto_thermoeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_thermoeléctrico)
- [34] Saúl Cid Sarria, Fernando Rodríguez Robelo, (Diciembre de 2011), Termoelectricidad. Aplicación de las placas peltier a la generación de energía eléctrica en plataformas flotantes, Parque Tecnológico de Galicia, Tecnopole.
- [35] Termodinámica, transformaciones termodinámicas. Recuperado de: [http : //www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termolp/transformaciones.html](http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termolp/transformaciones.html)
- [36] Leticia Ofelia Cervantez Espinosa, Gerardo Omar Hernández Segura, Capacidad térmica específica y capacidad térmica.

- [37] Radiación solar, Leyes de la radiación y ciclo solar, Recuperado de: <https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpetas02/carpetas24/vademecum19/vdm052.htm>
- [38] Aritz Undurraga Almaraz, (2013/2014), Viabilidad de los materiales termoeléctricos, Universidad de Barcelona.
- [39] L. Juanicó, E. Tagliavere, F. Rinalde y N. Di Lalla, Nuevo Termogenerador portátil para electrificación inicial de hogares rurales, Departamento de Materiales, Centro Atómico Constituyentes (CNEA).
- [40] Ethan Bock y Marcelo Herrera, (2014), Investigation of Thermoelectric Generators, Methods of Experimental Physics II.
- [41] Henry Santiago Córdor Córdor, (Julio 2016), Diseño e implementación de termogeneradores eléctricos en el sistema de escape de un vehículo para recuperar y reutilizar la energía calorífica, Facultad de ciencias de la ingeniería e industrias, Universidad Tecnológica equinoccial, (UTE), Ecuador.
- [42] M. Olmo, R. Nave, Energía de Ionización, Electronegatividad, Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hba-sees/Chemical/bondd.htmlc3>
- [43] Materiales térmicamente conductores y aplicaciones comunes, (Abril de 2020), Recuperado de: <https://thermtest.com/latin-america/materiales-termicamente-conductores-y-aplicaciones-comunes>
- [44] Wilfredo Blancarte Lizárraga, (28 de Septiembre de 2001), Instrumentación para el control de procesos industriales, Efecto Peltier, ITESO campus universitario.
- [45] <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tlax-territorio/clima.aspx?tema=mee=29>

- [46] Pedro Landín, (Abril 6 de 2014), Semiconductores intrínsecos y extrínsecos, Peleandintecno Tecnología Eso, Recuperado de: *[http : //peleandintecno.blogspot.com/2014/04/semiconductores–intrinsecos – y.html](http://peleandintecno.blogspot.com/2014/04/semiconductores-intrinsecos-y.html)*
- [47] Mateo Duque Solis, (27 de mayo de 2013), Diseño de paneles generadores de electricidad por efecto seebeck, Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- [48] Ricardo Muñoz Zurdo, (29 de Junio de 2013), Diseño de un Sistema Termoeléctrico aprovechando características geotérmicas, Universidad Politécnica de Catalunya.