

Estudio de extracción de energía eléctrica de calentadores de agua mediante el efecto
Seebeck.

Omar Andrés Elías Rioseco Zamorano

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Omar Andrés Elías Rioseco Zamorano, Facultad de Arquitectura e Ingeniería Mecánica,
Universidad Internacional SEK; Director: Gustavo Moreno.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

omarrioseco@outlook.com

Declaración Juramentada

Yo, OMAR ANDRÉS ELÍAS RIOSECO ZAMORANO, con cédula de identidad 172068920-5, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi auditoria, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

OMAR E. RIOSECO ZAMORANO

C.I: 172068920-5

Dedicatoria

A mi madre, por haber hecho todo esto posible y por darme las herramientas para enfrentar lo que viene.

A mis familiares y amigos, que me han sido parte de esta etapa de mi vida y me han permitido llegar hasta aquí.

Índice de Contenidos

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Antecedentes	12
Calentadores de agua de uso doméstico.....	12
Efecto termoeléctrico.	14
Aplicaciones del efecto termoeléctrico en la actualidad.....	14
Objetivo.....	17
Marco Teórico.....	17
Clasificación de los calentadores de agua.....	17
Partes principales de los calentadores de agua de paso de tipo instantáneo.	18
Propiedades de los gases utilizados por el calentador de agua.	20
Efecto Seebeck.....	20
Efecto Peltier.....	21
Dispositivos de termogeneración.	22
Funcionamiento de los dispositivos de termogeneración.	23
Teorema de Thevenin para circuitos eléctricos.....	25
Teorema de máxima transferencia de potencia en circuitos eléctricos.....	25
Método	28
Materiales.....	28

Calentador de agua utilizado para los experimentos.....	28
Celdas de termogeneración.	29
Equipos de medición.	30
Conexión del calentador de agua.	30
Pruebas Preliminares para Ubicación de Celdas.....	32
Procedimiento	37
Ubicación de celda TEG en los experimentos 1 y 2.	40
Resultados	41
Experimento 1	41
Máximo voltaje promedio y corriente promedio.	44
Punto de potencia promedio máxima.	44
Puntos de máximo voltaje y corriente.....	44
Experimento 2	45
Máximo voltaje promedio y corriente promedio.	48
Punto de potencia promedio máxima.	48
Puntos de máximo voltaje y corriente.....	48
Experimento 3	49
Máximo voltaje promedio y corriente promedio.	52
Punto de potencia promedio máxima.	52
Puntos de máximo voltaje y corriente.....	52
Discusión.....	54

Conclusiones	54
Referencias	58
Anexos 4.....	60

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1. Propiedades básicas de los gases comúnmente utilizados en calentadores de agua..	20
Tabla 2. Propiedades básicas de termopares comunes en el mercado.....	21
Tabla 3. Diferencia de temperatura en puntos de interés	35
Tabla 4. Mediciones de temperatura en la rejilla del quemador, punto 1	36
Tabla 5. Mediciones de temperatura en el lado izquierdo del serpentín, punto 2.....	36
Tabla 6. Mediciones de temperatura en la salida del difusor	36
Tabla 7. Resultados experimento 1, prueba 1, con tres resistencias en serie	41
Tabla 8. Resultados experimento 1, prueba 2, con dos resistencias en serie	42
Tabla 9. Resultados experimento 1, prueba 3, con una resistencia.....	42
Tabla 10. Resultados experimento 1, prueba 4, con dos resistencias en paralelo.....	43
Tabla 11. Resultados experimento 1, prueba 5, con tres resistencias en paralelo.....	43
Tabla 12. Resultados experimento 2, prueba 1, con tres resistencias en serie	45
Tabla 13. Resultados experimento 2, prueba 2, con dos resistencias en serie	46
Tabla 14. Resultados experimento 2, prueba 3, con una resistencia.....	46
Tabla 15. Resultados experimento 2, prueba 4, con dos resistencias en paralelo.....	47
Tabla 16. Resultados experimento 2, prueba 5, con tres resistencias en paralelo.....	47
Tabla 17. Resultados experimento 3, prueba 1, con tres resistencias en serie	49
Tabla 18. Resultados experimento 3, prueba 2, con dos resistencias en serie	49
Tabla 19. Resultados experimento 3, prueba 3, con una resistencias	50

Tabla 20. Resultados experimento 3, prueba 4, con dos resistencias en paralelo.....	51
Tabla 21. Resultados experimento 3, prueba 5, con tres resistencias en paralelo.....	51
Tabla 22. Promedio de diferencia de temperatura de cada experimento	55
Tabla 23. Promedio de potencia de cada experimento.....	55

Figuras

Figura 1. Edwin Rudd junto al primer calentador de agua automático.....	13
Figura 2. Sistema de enfriamiento mediante celdas Peltier.	15
Figura 3. Aplicación de un conjunto TE en el escape de un motor de combustión interna.....	16
Figura 4. Esquema de un calentador de agua de paso de tipo instantáneo.....	18
Figura 5. Conjunto de dispositivos de termogeneración acoplados a un tubo de escape.....	23
Figura 6. Esquema de composición de un dispositivo termoeléctrico	24
Figura 7. Composición de una celda TEG modelo SP 1848-26401.....	24
Figura 8. Teorema de Thevenin.	25
Figura 9. Circuito lineal para cálculo de transferencia de potencia máxima.	26
Figura 10. Potencia máxima en función de R_c / R_{th}	27
Figura 11. Calentador de agua de paso instantáneo Yang-983.	29
Figura 12. Celda TEG - SP 1848-26401.	29
Figura 13. Terraza donde fue instalado el calentador de agua.	30
Figura 14. Imagen termográfica del calentador de agua con la cubierta.....	32
Figura 15. Imagen termográfica del calentador de agua sin la cubierta.....	32
Figura 16. Puntos de interés donde se tomaron mediciones de temperatura preliminares.....	33
Figura 17. Puntos de interés donde se tomaron mediciones de temperatura preliminares sin la cubierta.....	34
Figura 18. Esquema del circuito de prueba con tres resistencias en serie.....	38

Figura 19. Esquema del circuito de prueba con dos resistencias en serie.....	38
Figura 20. Esquema del circuito de prueba con una resistencia conectada.....	38
Figura 21. Esquema del circuito de prueba con dos resistencias en paralelo.....	38
Figura 22. Esquema del circuito de prueba con tres resistencias en paralelo.	39
Figura 23. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 1.....	45
Figura 24. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 2.....	49
Figura 25. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 3.....	53

Resumen

El objetivo del presente estudio fue determinar si es posible la extracción de energía eléctrica de un calentador de agua de paso instantáneo uso doméstico, mediante el uso de celdas Peltier de termogeneración de bajo costo. Con este fin, se utilizó un método experimental, donde las celdas fueron instaladas en tres diferentes ubicaciones del calentador de agua y expuestas a diferentes condiciones de carga y temperatura. De esta manera se estableció la ubicación dentro del calentador de agua donde se obtiene la mayor generación de potencia y la cantidad de potencia obtenible en dichas condiciones de funcionamiento. Con base en lo observado se realizaron recomendaciones para mejorar el rendimiento de las celdas de termogeneración en las condiciones establecidas y se plantearon futuros proyectos derivados de este estudio.

Palabras Clave: Celdas Peltier, calentadores de agua de paso instantáneo.

Abstract

The objective of current study was to determine if, by using a low-cost thermoelectric power generator Peltier module, it is possible to obtain electrical energy from a domestic tankless water heater. With this purpose, an experimental method was applied, where the Peltier modules were installed in three different locations within the water heater, and were exposed to different values of charge and temperature. Through this, the location inside the water heater where the power obtained was higher, and magnitude of the power generated were determined. Based on this, recommendations to improve the performance of the modules under this conditions were suggested, as well as ideas for future projects derived from this concepts.

Keywords: Peltier thermoelectric generator module, tankless water heater

Introducción

Los calentadores de agua de paso instantáneo comúnmente instalados en domicilios utilizan la combustión de un gas (ya sea gas licuado de petróleo o gas natural) para calentar el agua fría que pasa por una tubería en forma de serpentín y la entregan a una temperatura determinada para su uso. Para esto, se utiliza una cámara de combustión por donde pasa una tubería que permite la transferencia de calor entre el agua y los gases de combustión generados por un quemador. Ya sea por el calor disipado por convección entre los gases de combustión y el aire alrededor de la cámara, o por la conducción entre los diferentes componentes del mismo; el aire dentro del gabinete del calentador de agua también aumenta de temperatura.

A su vez, este tipo de calentadores de agua requieren de un sistema capaz de encender el combustible utilizado por el calentador de agua, denominado conjunto piloto. El conjunto piloto consta principalmente de una bujía, que envía la chispa que enciende el combustible y un termopar o componente piezoeléctrico, que determina cuando es necesario enviar dicha chispa. Para que el conjunto en cuestión pueda funcionar, se requiere de un voltaje inicial, el cual es comúnmente provisto por pilas convencionales, que son principalmente alcalinas o de litio. Este tipo de pilas están categorizadas como pilas primarias, lo que significa que no son recargables y son desechadas cuando su voltaje es demasiado bajo. Esto conlleva a que sea necesario el reemplazo de las pilas cada cierto tiempo. (Encyclopædia Britannica, 2016). Además, algunos de sus componentes químicos pueden llegar a ser muy contaminantes para el medio ambiente y de difícil desecho o reciclaje. (Cubero Castillo, 2003).

Con base en estos hechos, se consideró que el calor disipado en el calentador de agua podría ser transformado y reutilizado en el mismo calentador como reemplazo de las pilas

convencionales, evitando así la necesidad de reemplazar la fuente de voltaje del piloto cada cierto tiempo y favoreciendo al medio ambiente. Con este propósito, se utilizaría una celda Peltier de termogeneración, que por medio la diferencia de temperatura que pueda existir entre el aire caliente dentro del calentador de agua y su cubierta metálica; produzca una diferencia de voltaje que puede ser utilizada por el conjunto piloto. Este estudio está enfocado en determinar si es posible extraer la cantidad de energía eléctrica necesaria para reemplazar el uso de pilas convencionales y cuál es la ubicación de mayor rendimiento para las celdas de termogeneración. De esta manera se podrá determinar si es conveniente implementar este tipo de sistema en futuros proyectos.

Antecedentes

Calentadores de agua de uso doméstico.

La acción de calentar agua es una práctica fundamental para la sociedad moderna debido a las diferentes aplicaciones cotidianas en las que se utiliza agua caliente, ya sea para fines sanitarios como el aseo personal o de limpieza de lugares o vestimentas. Gran parte de las viviendas en zonas urbanas cuentan con algún sistema para calentar el agua, por lo que la optimización de dicho proceso puede traer grandes beneficios: tanto económicos como ambientales.

Históricamente, la acción de calentar agua con fines no industriales, se realizaba principalmente de forma manual para cada ocasión, poniendo contenedores de agua en contacto con una llama de fuego al aire y transportando el agua caliente al lugar donde se le daría uso, esto es conocido como calentamiento directo y fue utilizado por la mayoría de culturas antiguas. (Encyclopædia Britannica, 2016). En 1889, un ingeniero mecánico noruego llamado Edwin Rudd, inventó y patentó el primer aparato a gas de almacenamiento

automático, utilizado para calentar agua y mantenerla caliente en un depósito; siendo la base de lo que llegaría a ser los calentadores de agua domésticos hoy en día (Boiler Mx, 2016).

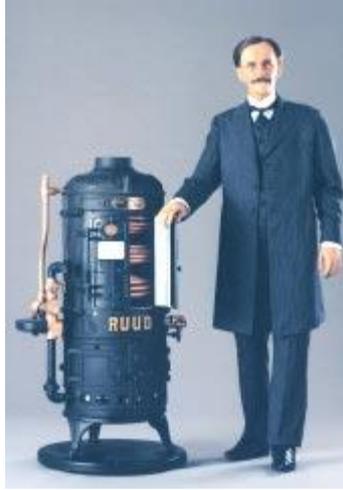


Figura 1. Edwin Rudd junto al primer calentador de agua automático.

Ruud Heating, Cooling & Water Heating, 2016, Obtenido de <http://www.ruud.com/about/#>

Actualmente en Ecuador, la mayoría de viviendas individuales¹ cuentan con sistemas de calentamiento de agua de paso instantáneo, ya sean eléctricos o a gas; mientras que los edificios de apartamentos suelen contar con sistemas de calentamiento de agua centralizado, que utilizan calderas de mayor tamaño y conceptos de recirculación.

Durante los últimos años, las políticas del gobierno ecuatoriano han fomentado el uso de calentadores de agua eléctricos, aumentando el costo de los diferentes sistemas que funcionan en base a gas licuado de petróleo (GLP) y reduciendo su uso en residencias nuevas (El Comercio, 2014). A pesar de esto, el presente estudio se enfocará en los sistemas de calentamiento de agua de paso instantáneo que utilizan la combustión de GLP, debido a que,

¹ Se consideran como viviendas individuales a aquellas que no forman parte de un edificio o conjunto que cuente con un sistema centralizado de calentamiento de agua.

aún son los más ampliamente instalados en las residencias convencionales y su funcionamiento es compatible con el estudio realizado.

Efecto termoeléctrico.

El efecto Seebeck fue inicialmente observado por el científico alemán Thomas Johann Seebeck y fue descrito en el año 1822. Seebeck observó que si dos materiales diferentes están unidos y en sus juntas se observa una diferencia de temperatura, se genera una diferencia de voltaje proporcional a dicha diferencia de temperatura (Cardona & Maciel, 2010). Algunos años después, en 1834, con base en el descubrimiento de Seebeck, el físico francés Jean Charles Athanase Peltier descubrió el efecto Peltier, que puede ser definido como el fenómeno inverso al efecto Seebeck (Goupil, et al., 2011). Este efecto consiste en que, al aplicar una corriente desde una fuente externa a dos materiales unidos entre sí se genera una diferencia de temperatura proporcional al voltaje aplicado, donde una de las juntas absorbe calor y la otra lo cede (Patterson & Sobral, 2007).

Aplicaciones del efecto termoeléctrico en la actualidad.

En la actualidad los diferentes dispositivos termoeléctricos están retomando fuerza en su desarrollo y en el de sus aplicaciones, debido a las ventajas que representa una generación de energía amigable con el medio ambiente y sin partes móviles en sus componentes. Uno de los principales usos comerciales que tienen dichos dispositivos es en forma de celdas Peltier, utilizadas con fines de refrigeración. De forma particular, para mantener la temperatura de funcionamiento de computadoras de alto rendimiento (ver figura 2). Estas computadoras envían un voltaje mayor a la celda Peltier cuando detectan mediante el uso de sensores, que la temperatura de sus componentes es demasiado alta, generando una diferencia de temperatura en las placas de la misma. De esta manera, el lado frío disminuye la temperatura de los

componentes de la computadora y el lado caliente lleva el calor a un dissipador (CUI Inc., 2015).

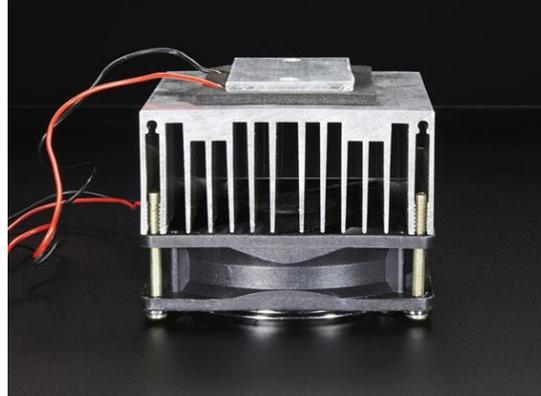


Figura 2. Sistema de enfriamiento mediante celdas Peltier.

Ardafruit (2016), Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1335>

En el caso de la industria automovilística, es considerado como una generalidad que en vehículos con motores de combustión interna, únicamente un tercio de la energía obtenida es utilizada para el funcionamiento del vehículo, mientras que los dos tercios restantes son disipados como calor latente en el sistema de enfriamiento y como calor en el tubo de escape (Rowe, 2006). Esto lleva a considerar la utilización de celdas Peltier como una opción para transformar parte del calor disipado en el escape en energía eléctrica que pueda ser reutilizada (figura 3).

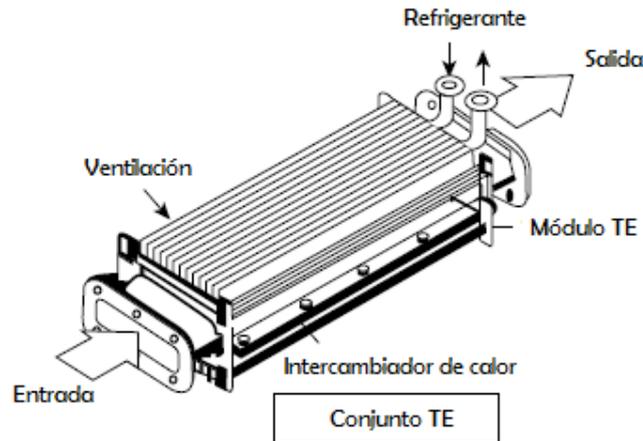


Figura 3. Aplicación de un conjunto TE en el escape de un motor de combustión interna. Adaptado de “A Thermoelectric Application to Vehicles” por Rowe, 2006, *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*, 52-2.

Otras variaciones de estos dispositivos son utilizadas comúnmente en pequeños refrigeradores, optoelectrónica, asientos calefactores e incluso en misiones de exploración espacial; donde los paneles solares no son suficiente para abastecer a las sondas espaciales y requieren la utilización de sistemas nucleares de energía. Estos sistemas utilizan el deterioro de radioisótopos para generar calor, que a su vez es transformado en electricidad mediante el uso de termogeneradores de alta capacidad (Rowe, 2006).

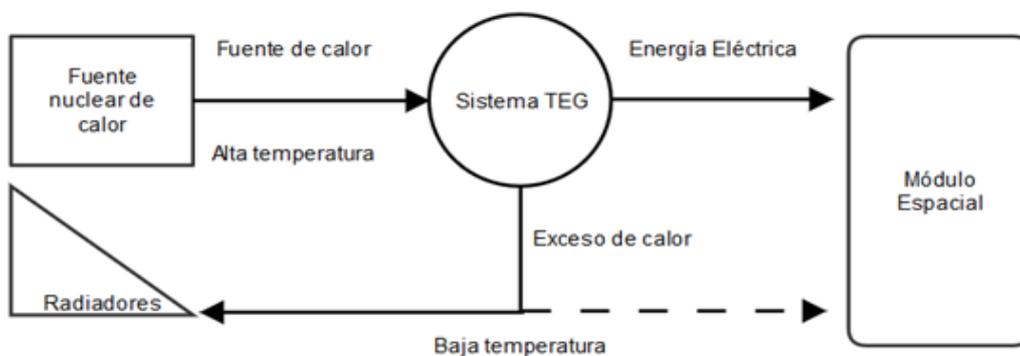


Figura 4. Funcionamiento básico de un sistema nuclear de energía por termogeneración. Adaptado de “Space Missions and Applications” por Rowe, 2006, *Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano*, 56-1.

Objetivo

El objetivo de la presente investigación es analizar, mediante el método experimental exploratorio, la posible extracción de energía eléctrica de un calentador de agua de paso instantáneo mediante dispositivos de termogeneración de bajo costo que funcionan en base al efecto Seebeck.

Marco Teórico

Clasificación de los calentadores de agua.

En la actualidad, los calentadores de agua de uso doméstico pueden ser clasificados de acuerdo a su potencia útil nominal o de acuerdo a su funcionamiento (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012). De acuerdo a su funcionamiento, se clasifican de la siguiente forma.

- Calentador de agua de almacenamiento
- Calentador de agua de paso de rápida recuperación
- Calentador de agua de paso instantáneo

Para este estudio, se tomarán en cuenta los calentadores de agua de paso de tipo instantáneo, también denominados calefones. De acuerdo a la norma ecuatoriana NTE INEN 2603:2012, este tipo de calentadores de agua están definidos como:

Aparato para calentar agua en forma instantánea y continua, el cual cuenta con un circuito tubular para que circule el agua, una cámara de combustión y un control para el suministro de gas, pudiendo tener un dispositivo para regular el flujo de agua. Los combustibles usados para incrementar la temperatura del agua son gas licuado de petróleo o gas natural (p.1, cap. 3.1.5).

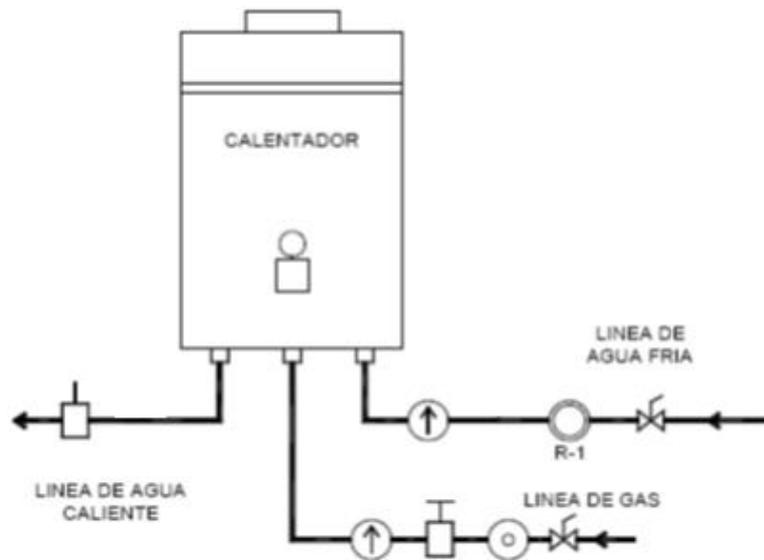


Figura 5. Esquema de un calentador de agua de paso de tipo instantáneo. Adaptado de la norma ecuatoriana NTE INEN 2603, 2012, p. 20.

Partes principales de los calentadores de agua de paso de tipo instantáneo.

- Cámara de combustión: Lugar parcialmente cerrado dentro del calentador de agua donde se realiza la combustión.
- Cámara extractora de gases: Espacio dentro del calentador de agua que da al exterior del cuerpo del calentador, encargada de evacuar los gases producidos por la combustión del gas. Cuenta con un difusor que dirige y retarda la salida de los gases.
- Circuito tubular: Es un conjunto de tubos y conexiones que transportan el agua a través de las secciones del calentador de agua. Comúnmente se lo denomina serpentín.
- Conjunto piloto: Conjunto formado por un inyector que dosifica la cantidad de gas a ser combustionado, una bujía encargada de dar la chispa inicial, un termopar, y un soporte para todo el conjunto.

- Cuerpo exterior: Cobertura exterior del calentador, consta del frente y el respaldo del mismo.
- Cuerpo interior del calentador de paso instantáneo: Conjunto de intercambiadores de calor por donde pasa el serpentín para calentar el agua.
- Grupo electromagnético: Conjunto de seguridad que permite el paso del gas hacia el quemador cuando recibe un pequeño voltaje proveniente del termopar del piloto.
- Piezoeléctrico: Mecanismo utilizado por algunos tipos de calentadores de agua que al ser golpeado bruscamente por un componente mecánico produce una chispa encargada de encender el piloto.
- Quemador: Dispositivo para el transporte final de la mezcla de gas y aire a ser combustionada en la zona de combustión. También cuenta con un inyector.
- Termopar: Componente termoeléctrico que se calienta cuando el piloto está encendido, generando una pequeña corriente eléctrica que retiene abierto el grupo electromagnético, permitiendo el paso de gas mientras el piloto se mantenga a la temperatura de funcionamiento adecuada.
- Válvula de agua: Válvula ubicada en la toma de agua del calentador de agua, encargada de regular la cantidad y en algunos casos, presión del agua fría que ingresa al calentador. También se encarga de activar la válvula termostática mediante una membrana cuyo fin es determinar que la cantidad de agua es suficiente para el funcionamiento del calentador.
- Válvula termostática: Válvula automática encargada de dosificar la cantidad de gas que entra al quemador para mantener la temperatura del agua dentro de los límites preestablecidos. Cuenta con dispositivos de seguridad y de control para evitar accidentes y regular temperaturas.

Para esquema general de un calentador de agua y de sus componentes ver anexo A.

Propiedades de los gases utilizados por el calentador de agua.

Tabla 1

Propiedades básicas de los gases comúnmente utilizados en calentadores de agua.

Propiedades principales	Gases Licuados		Gas Natural
	Propano	Butano	
Fórmula	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CH ₄
Densidad (Aire = 1)	1,56	2,01	0,586
Poder Calorífico (Kcal* m ³)	22,4	29	9,47
Poder Calorífico (Kcal*Kg de liq.)	12,05	11,63	

Nota: El gas licuado de petróleo comercial es un compuesto entre Butano y Propano que varía en los porcentajes de mezcla de sus componentes de acuerdo al país donde es comercializado. En Ecuador el uso de gas natural para domicilios es nulo. Adaptado de *Manual de Servicio para Calefones Splendid*, 2013, p. 27.

Efecto Seebeck.

Con base en lo expuesto en los antecedentes (p. 12), un dispositivo termoeléctrico genera una diferencia de voltaje proporcional a la diferencia de temperatura a la que se exponen sus componentes. La cantidad de voltaje generada para dicha diferencia de temperatura es determinada por una propiedad intrínseca de los materiales denominada coeficiente de Seebeck o termopotencia, y es representada como α . La unidad de medida para este coeficiente es $\mu V/K$ y es muy bajo para los metales y mayor para los semiconductores (Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2002). Generalmente este coeficiente está detallado para cada par de elementos en un rango específico de temperatura. Los diferentes pares de elementos, llamados termopar o termocuplas, están representados por letras, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2

Propiedades básicas de termopares comunes en el mercado.

Letra de Referencia	Materiales	Rango de temperatura (°C)	Coefficiente de Seebeck (μV/°C)
B	Rodio - Platino (30% - 6%)	0 a 1800	3
E	Cromel - Constantán	-200 a 1000	63
J	Hierro - Constantán	-200 a 900	53
K	Cromel - Alumel	-200 a 1300	41
N	Nirosil - Misil	-200 a 1300	28
R	Platino - Platino con 13% de rodio	0 a 1400	6
S	Platino - Platino con 10% de rodio	0 a 1400	6
T	Platino - Platino con 10% de rodio	-200 a 1000	43

Nota: Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias sociales y Administrativas. (2010). UPIICSA. Obtenido de http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/polilibros/portal/Polilibros/P_proceso/POLILIBRO_ADQUISICION_DE_DATOS/POLILIBRO/UMD/umd%203/informacion/3.2.html.

Efecto Peltier.

En relación a lo expuesto sobre el efecto Seebeck, el efecto Peltier está regido por el coeficiente de Peltier, representado por Π . Este coeficiente define cuánto flujo de calor es generado por unidad de corriente y permite apreciar la relación entre los efectos Seebeck y el Peltier (Patterson & Sobral, 2007). Está definido de la siguiente manera:

$$\Pi = \alpha T. \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente de Seebeck y T la temperatura de la junta en grados Kelvin.

El flujo de calor liberado en una junta (Q_p) se define de la siguiente manera:

$$Q_p = \alpha I T. \quad (2)$$

Donde I es la cantidad de corriente que pasa por la junta (Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2002).

Dispositivos de termogeneración.

Los generadores termoeléctricos son dispositivos de estado sólido que utilizan la diferencia de temperatura entre sus superficies para generar electricidad. Al ser dispositivos de estado sólido, no utilizan partes móviles y son completamente silenciosos. A diferencia de los motores de calor convencionales, suelen ser compactos, simples, de menor costo y fáciles de dimensionar. Por otro lado, son mucho menos eficientes que dichos motores (Snyder, 2008).

La mayoría de los dispositivos modernos de termoelectricidad (TEC) tienen su fundamento en el efecto Peltier, mientras que los dispositivos de termogeneración (TEG) están basados en el efecto Seebeck. Debido a que ambos tipos de celda se rigen por el mismo efecto termoeléctrico y dicho efecto es reversible; tanto las celdas TEG como las TEC pueden cumplir las mismas funciones. Es decir: una celda TEC es capaz de generar un voltaje al ser expuesta a una diferencia de temperatura y una celda TEG puede generar una diferencia de temperatura cuando se le aplica una diferencia de voltaje. La diferencia entre estos dos tipos de módulos es que están específicamente diseñados para diferentes rangos de temperatura. Una celda de enfriamiento funciona más eficazmente en temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, mientras que una celda de generación suele estar expuesta a mayores temperaturas. Esto finalmente se traduce en diferencias como en el grosor de las placas, de los cables, y en número de compuestos semiconductores; pero la base de funcionamiento en ambos casos es la misma (European Thermodynamics Ltd., 2015). Este estudio está centrado en las celdas TEG.



Figura 6. Conjunto de dispositivos de termogeneración acoplados a un tubo de escape.
Recuperado de <http://www.microcogen.info/index.php?topic=2018.0>

Funcionamiento de los dispositivos de termogeneración.

Los dispositivos de termogeneración están conformados por una serie de compuestos semiconductores dopados², agrupados de dos en dos en placas conductoras; con un componente positivo y uno negativo en cada una (CUI Inc., 2015). A medida que el calor fluye a través de las diferentes placas en forma de una gradiente de temperatura, por acción del efecto Seebeck, los electrones son empujados al lado frío del conjunto. Este flujo de electrones se traduce en un voltaje, que es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre los lados frío y caliente del conjunto. Al conectar varias de las placas mencionadas en serie se obtiene un dispositivo termoeléctrico (Snyder, 2008), como se puede apreciar en el la figura 7 en forma de esquema y en la figura 8 físicamente. A su vez, dicho dispositivo está cubierto por un cerámico aislante en sus dos caras para aumentar la gradiente de temperatura dentro del dispositivo y soportar las temperaturas a las que es sometido el dispositivo.

² Es el proceso intencional de modificar las propiedades de un semiconductor al agregarle impurezas. De acuerdo a como se realice este proceso el semiconductor puede actuar como conductor o como un semiconductor de mayor pureza.

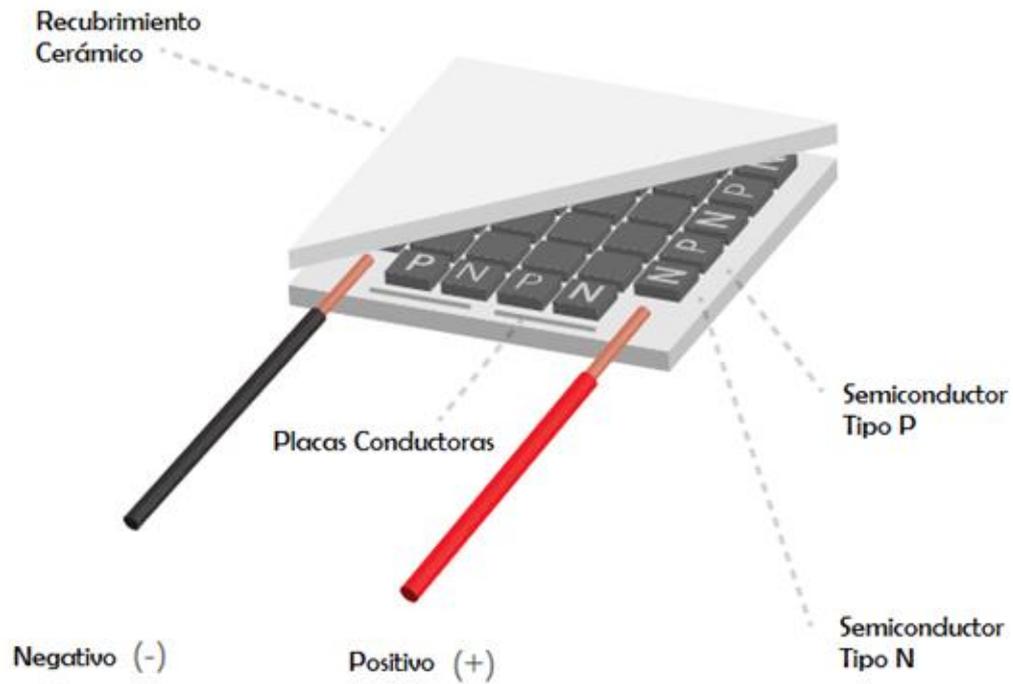


Figura 7. Esquema de composición de un dispositivo termoeléctrico, Adaptado de CUI Inc. (2015), *Peltier Application Note*, <http://www.cui.com/product/resource/peltier-app-note.pdf>

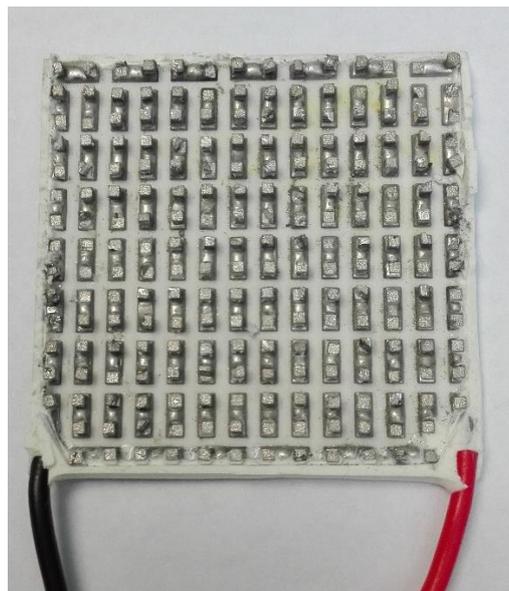


Figura 8. Composición de una celda TEG modelo SP 1848-26401.

Teorema de Thevenin para circuitos eléctricos.

El teorema de Thevenin estipula que:

Para un circuito lineal cualquiera, con un par de terminales, es posible encontrar un circuito equivalente al mismo, que se encuentra formado por una fuente de voltaje ideal y una resistencia en serie, de tal manera que dicho circuito equivalente produzca los mismos valores de voltaje y corriente que el circuito original. (Gómez, Universidad de los Andes Colombia, 2015)

Este concepto se representa en la figura 9, donde el voltaje y resistencia equivalentes del circuito original se representan como V_{th} y R_{th} respectivamente.

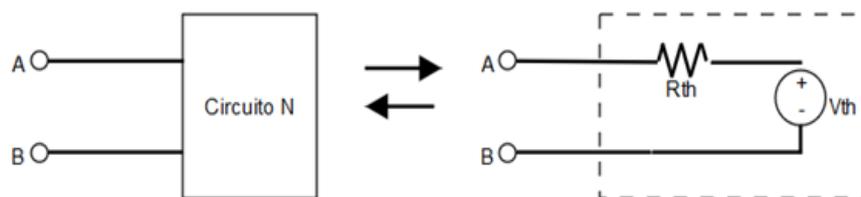


Figura 9. Teorema de Thevenin.

De esta manera, es posible reducir redes complejas con una gran cantidad de cargas conectadas entre sí a un circuito equivalente simple; en donde es necesario obtener únicamente los valores de voltaje de la fuente y de su resistencia interna (Alcalde San Miguel, 2003).

Teorema de máxima transferencia de potencia en circuitos eléctricos.

Este teorema establece que para obtener la máxima transferencia de potencia posible entre dos terminales de un circuito conformado por: la combinación entre una fuente de tensión y una resistencia fija (resistencia de la fuente) y una carga de resistencia variable

conectada en serie; la resistencia de la fuente debe ser igual a la resistencia de la carga (Gómez, 2015).

Debido a que este teorema es generalmente utilizado en circuitos equivalentes sencillos en los que ha sido aplicado el Teorema de Thevenin, la fuente de tensión se denomina V_{th} y la resistencia de la fuente R_{th} . En el siguiente esquema se aprecia el ejemplo de un circuito eléctrico lineal en el cual es posible determinar la máxima transferencia de potencia. La corriente de carga está representada por I_c , mientras que el voltaje de carga por V_c .

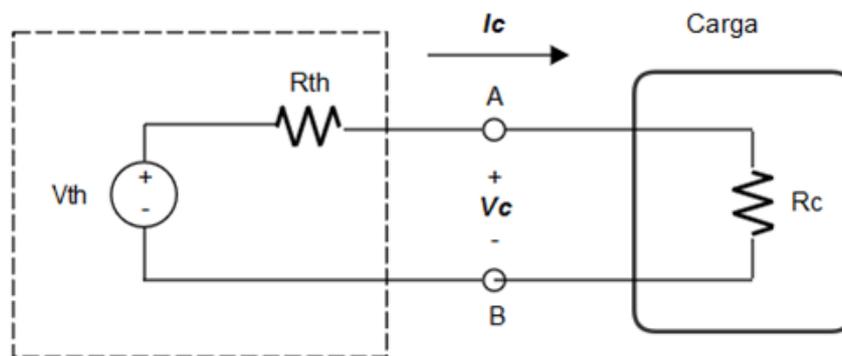


Figura 10. Circuito lineal para cálculo de transferencia de potencia máxima.

La potencia que recibe la carga, denominada V_c , está dada en función a la resistencia de R_c . Siendo R_c es una resistencia variable y conociendo R_{th} de la fuente, se puede obtener el siguiente gráfico (figura. 11), donde se observa que la potencia que recibe la carga es máxima cuando la relación de R_{th} y R_c es igual a 1.

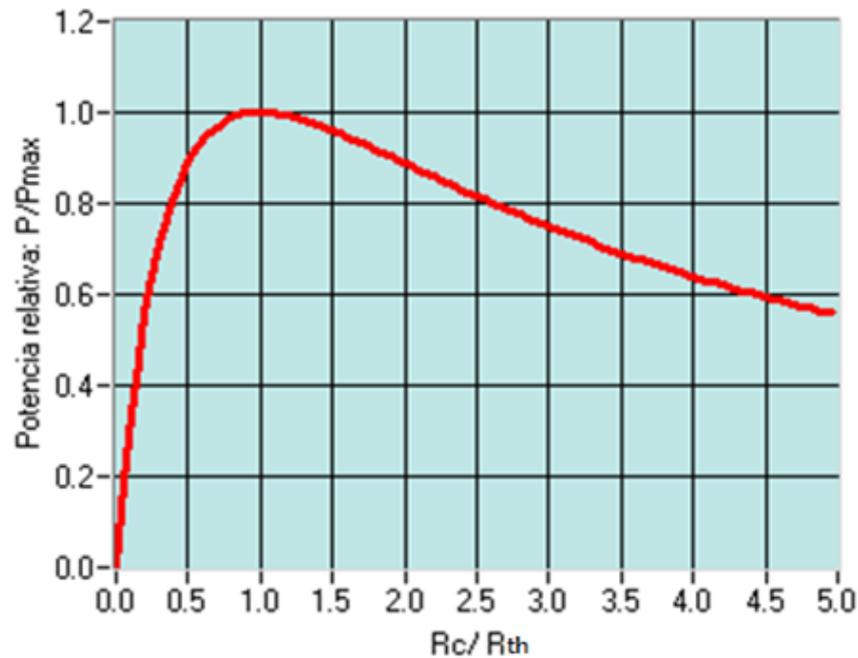


Figura 11. Potencia máxima en función de R_c / R_{th} . Recuperado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Adapt_es.png

Bajo estas condiciones, se obtiene que la fórmula de la máxima transferencia de energía es:

$$P_{C_{m\acute{a}x}} = \frac{V_{th}^2}{4 R_{th}} \quad (3)$$

Cabe recalcar que la obtención de una máxima transferencia de potencia en un circuito no asegura una eficiencia³ elevada. Con el fin de mejorar la eficiencia y la transferencia máxima de potencia de un circuito, es necesario reducir el valor de R_{th} lo más posible. Es decir, diseñar fuentes de voltaje y líneas conductoras con resistencias muy bajas.

³ La eficiencia está definida como la relación entre la potencia disipada por la carga y la potencia generada por la fuente.

Método

Se utilizó un método experimental para determinar el comportamiento de las celdas Peltier de termogeneración, bajo las condiciones de funcionamiento cotidiano de un calentador de agua de paso instantáneo y el potencial de generación eléctrica obtenible de esta manera. Se seleccionó esta metodología por sobre un análisis matemático o simulaciones computarizadas, debido a la poca información disponible para el modelo de celdas de bajo costo con fines de termogeneración, utilizadas en este estudio. Para esta metodología, se determinó la necesidad de medir las características de voltaje, corriente, y transferencia de potencia en distintas ubicaciones del calentador de agua, para establecer la ubicación donde el rendimiento de las celdas es mayor y en dicha ubicación, medir la cantidad de potencia obtenida que podría ser utilizada en estudios posteriores de almacenamiento de esta energía.

Materiales

Calentador de agua utilizado para los experimentos.

Todos los experimentos fueron realizados en un calentador de agua de paso instantáneo con 2 años de uso. El calentador seleccionado es de la marca Yang, modelo TW-983 y capacidad volumétrica ⁴ de 16 litros. Fue elegido por ser un modelo de uso común en la ciudad de Quito, lo que se debe principalmente a: su bajo costo, facilidad en el proceso de instalación, disponibilidad de repuestos en el mercado y a la poca presión de agua que requieren para funcionar.

⁴ Capacidad volumétrica: Cantidad de agua que el calentador de agua medida en litros que es capaz de calentar o almacenar a la temperatura de funcionamiento requerida.



Figura 12. Calentador de agua de paso instantáneo Yang-983.

Celdas de termogeneración.

Para la realización de los experimentos fueron utilizadas celdas TEG modelo SP 1848-27145 SA (figura 13), de dimensiones 40 mm por 40 mm por 3.4 mm de ancho. Este tipo de celdas están compuestas por termopares de telurio y bismuto como semiconductores y por alúmina como recubrimiento cerámico.



Figura 13. Celda TEG - SP 1848-26401.

Equipos de medición.

Con base en la naturaleza del estudio y al funcionamiento de las celdas utilizadas, se consideró que existen cinco variables que deben ser medidas: voltaje, intensidad de corriente, carga aplicada, temperatura en el lado frío de la celda y temperatura en el lado caliente. Con este fin, se utilizaron los siguientes equipos de medición.

- Multímetro digital Dt-9208
- Multímetro digital Truper MUT-39
- Termómetro digital para termocupla Fluke 54 II B
- Termómetro láser con cámara termográfica FLIR TG165

Conexión del calentador de agua.

El calentador de agua fue instalado en una terraza al aire libre en la ciudad de Quito (ver figura 14). La ubicación se escogió para cumplir con los parámetros de seguridad según los requisitos de ventilación de la norma INEN 2603 (2012).

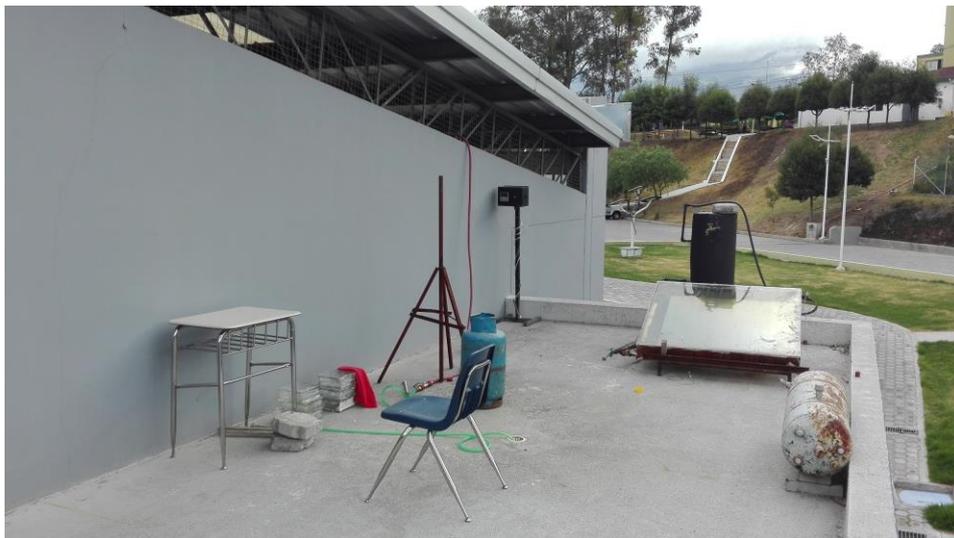


Figura 14. Terraza donde sería instalado el calentador de agua.

La conexión de agua fría fue realizada mediante una manguera cuyo diámetro es de 3/4 de pulgada, conectada al calentador de agua en un extremo y en el otro conectada a la red de agua. La velocidad de salida del agua fue medida llenando un recipiente de 1 litro con agua proveniente de la manguera de 3/4 de pulgada y tomando el tiempo que demoró en llenarse. Mediante la fórmula $Q = V/t$, se determinó que el caudal de agua en la salida de la manguera fue de $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$ o 2.4 L/min. De acuerdo a lo estipulado por la norma INEN 2603 en el literal 5.1.3.1, el flujo de agua que entra al calentador no puede ser menor a 2 L/min. Luego, usando la fórmula $Q = v A$, se obtuvo que la velocidad de agua era de 1.41 m/s. Este valor está dentro los parámetros estipulados por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito, donde la velocidad recomendada para tuberías de conexiones domiciliarias es de 1.5 m/s (EPMAPS Quito, 2016)

Posteriormente, se conectó el calentador de agua a un cilindro de GLP de 15 kg, mediante una manguera para gas de 10 mm de diámetro y 3 mm de espesor; y un regulador marca REGO de 1.3 kg/h. Finalmente, el calentador de agua fue encendido y mediante el uso de termocuplas, se midieron las temperaturas de entrada y salida de agua en el calentador. El agua fría en la entrada del calentador se encontraba a $23.2 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras que el agua caliente en la salida se encontraba a $46.8 \text{ }^\circ\text{C}$. De acuerdo a lo recomendado por la norma INEN 2603 (2012), la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del calentador de agua debe rondar los 25°C . De esta manera, se comprobó que el calentador de agua funcionaba dentro de parámetros aceptables, muy cercanos a los recomendados, establecidos para domicilios en el Distrito Metropolitano de Quito.

Pruebas Preliminares para Ubicación de Celdas

Con el propósito de determinar en qué parte del calentador de agua existe la mayor diferencia de temperatura, se realizaron mediciones de temperatura con el calentador de agua en funcionamiento; tanto con la cubierta colocada como sin ella. Para esto se utilizó una cámara termográfica para determinar los puntos dentro y fuera del calentador donde existe mayor temperatura (ver figuras 15 y 16). Las mediciones se realizaron después de cinco minutos de funcionamiento, cuando tanto la temperatura del agua como la del calentador de agua se estabilizan.

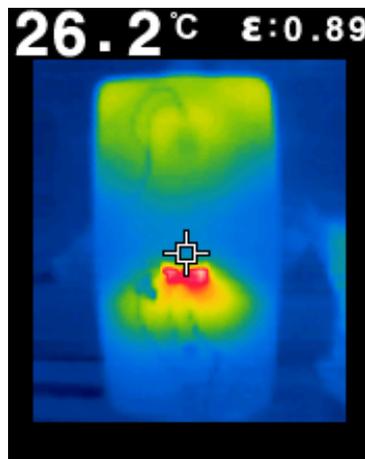


Figura 15. Imagen termográfica del calentador de agua con la cubierta

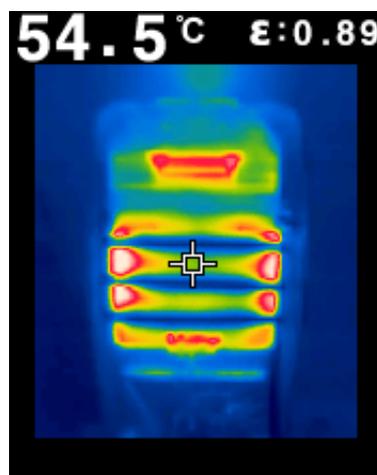


Figura 16. Imagen termográfica del calentador de agua sin la cubierta

Con base en lo observado en las figuras 15 y 16 se establecieron cinco puntos de interés en donde se tomaron medidas de temperatura usando termocuplas:

1. Rejilla de ventilación del quemador.
2. Extremo izquierdo del serpentín.
3. Extremo derecho del serpentín.
4. Toma de escape de gases.
5. Salida del difusor.



Figura 17. Puntos de interés donde se tomaron mediciones de temperatura preliminares.

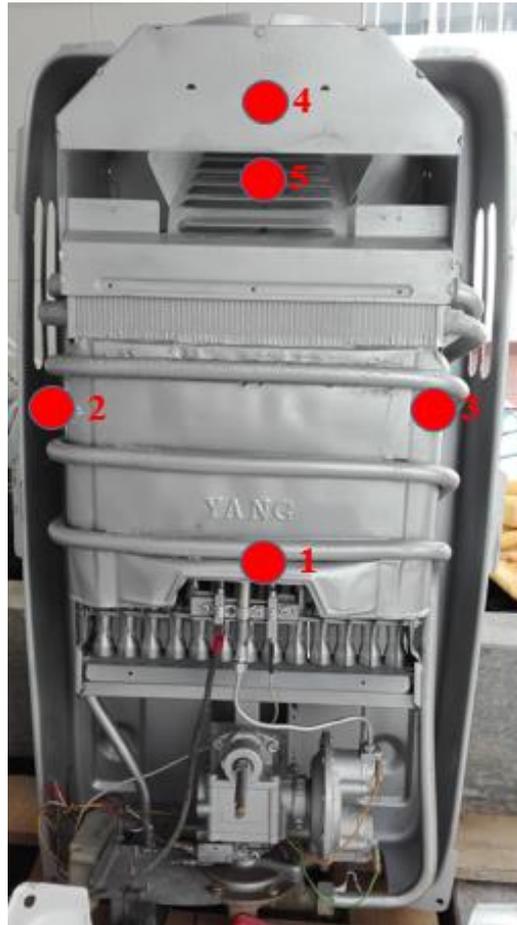


Figura 18. Puntos de interés donde se tomaron mediciones de temperatura preliminares sin la cubierta.

Los datos obtenidos en estos puntos fueron analizados para seleccionar la ubicación de las celdas termo generadoras. Con este fin fueron colocadas dos termocuplas en cada uno de los cinco puntos seleccionados; una en contacto directo con la superficie caliente y otra aproximadamente a 1 cm de la superficie caliente, para de esta manera obtener la diferencia de temperatura entre el metal y el aire circundante al punto. Al culminar este proceso, se obtuvo la Tabla 3, donde se aprecian las diferentes temperaturas en los puntos seleccionados.

Tabla 3

Diferencia de temperatura en puntos de interés.

Puntos de Interés	Mediciones (°C)		
	Temperatura en el punto	Temperatura del aire circundante	Diferencia de temperatura
Punto 1	172	112	60
Punto 2	290	175	115
Punto 3	241	195	46
Punto 4	255	230	25
Punto 5	275	230	45

Nota: Datos obtenidos sin la cubierta del calentador de agua puesta

Con base en los resultados obtenidos, se seleccionaron los puntos 1, 2 y 5 para ubicar las celdas de termogeneración. Esto se debe a que, además que son los puntos con mayor diferencia de temperatura, son de fácil acceso y con circulación de aire. Esto último resulta relevante al considerar que el flujo de aire en el lado frío de la celda TG podría aumentar el diferencial de temperatura entre los lados caliente y frío. No se consideró el punto tres para los experimentos debido a que sus características son similares a las del punto 2, pero con menor diferencia de temperatura.

Una vez observados los puntos con mayor diferencial de temperatura, se colocó nuevamente la tapa del calentador de agua y se procedió a medir el diferencial de temperatura específicamente en estos puntos y durante el tiempo de funcionamiento estimado del calentador de agua, establecido para estas pruebas como 10 minutos. Para facilitar la instalación de las termocuplas en estas ubicaciones se realizaron dos agujeros en la cubierta del calentador, que permitan el paso de los cables necesarios. Los datos obtenidos ayudaron a pronosticar si las celdas TEG podrían resistir las temperaturas de funcionamiento y están resumidos en las tablas 4, 5 y 6. Este proceso se realizó con el propósito de prever a que temperaturas estaría expuesta la celda TEG utilizada, por lo que estos valores no expresan los valores de lado frío y caliente de la celda.

Tabla 4

Mediciones de temperatura en la rejilla de ventilación del quemador, punto 1.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)		
	T1	T2	ΔT
180	267.3	144.5	122.8
390	282.3	117.8	164.5
600	285	110.5	174.5
ΔT promedio			153.93

Nota: La variable T1, se refiere a la temperatura en el punto de mayor temperatura, mientras que T2 a la temperatura en el aire circundante al punto. Esta nomenclatura se aplica para todas las mediciones posteriores a esta. Las temperaturas observadas fueron obtenidas con las termocuplas en contacto directo con la fuente de calor.

Tabla 5

Mediciones de temperatura en el lado izquierdo del serpentín del calentador, punto 2

Tiempo (s)	Temperatura (°C)		
	T1	T2	ΔT
180	123.4	39.5	83.9
390	112.8	46.6	66.2
600	120.5	66.2	72
ΔT promedio			74.03

Tabla 6

Mediciones de temperatura en la salida del difusor, punto 5.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)		
	T1	T2	ΔT
180	142.3	82.9	54.9
390	172.6	92.3	80.3
600	172.1	103	68.5
ΔT promedio			69.4

Procedimiento

Una vez definidas las ubicaciones donde serían instaladas las celdas Peltier, se delimitó el proceso a seguir en los experimentos. Para determinar si las celdas TEG pueden servir para proveer energía a un acumulador, es necesario conocer la cantidad potencia que estas pueden proveer. Con este fin, se utilizó el concepto de teorema de máxima transferencia de potencia que establece que: dada una fuente, con una resistencia de fuente fijada de antemano, la resistencia de carga que maximiza la transferencia de potencia es aquella con un valor óhmico igual a la resistencia de fuente (Alcalde San Miguel, 2003). En este caso, al desconocer la resistencia de la fuente, se realizaron experimentos con diferentes cargas para determinar el punto de mayor potencia transferida.

Durante los experimentos realizados, se seleccionaron resistencias de 5 ohmios para la pruebas, con base en las mediciones tomadas de las celdas TEG. Debido a que el valor asignado a cada resistencia mediante el código de colores no es exacto y a que, al manejar valores bajos de resistencia, los resultados pueden verse afectados por pequeñas irregularidades; se midió la resistencia total del circuito antes de cada experimento y se consideró este valor para los resultados.

El circuito fue conectado mediante el uso de una protoboard y cables para bajo amperaje. Se conectó el multímetro digital MUT 39 en serie al circuito para medir el amperaje del mismo, mientras que el multímetro Dt-9208 se conectó en paralelo al circuito para medir el voltaje obtenido de las celdas. Durante cada experimento se varió el número de resistencias en el circuito según lo antes mencionado, obteniendo valores de 10.5, 7.5, 4.65, 2.33 y 1.55 ohmios. El esquema del circuito para cada valor de carga está representado en las figuras 19, 20, 21, 22 y 23.

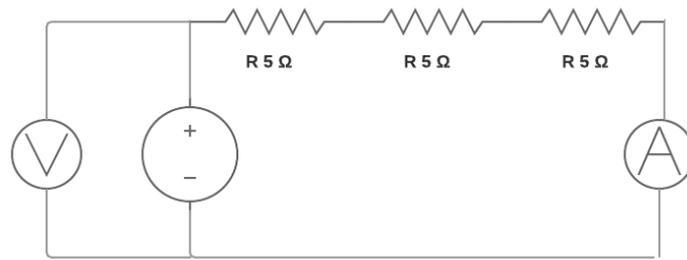


Figura 19. Esquema del circuito de prueba con tres resistencias en serie.

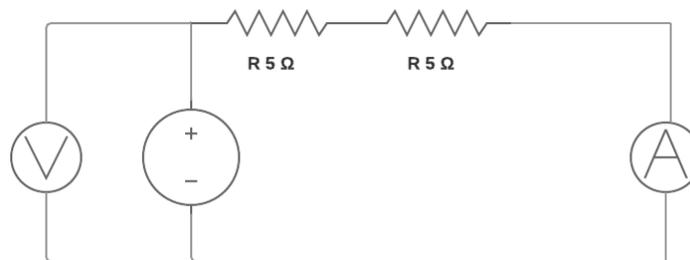


Figura 20. Esquema del circuito de prueba con dos resistencias en serie

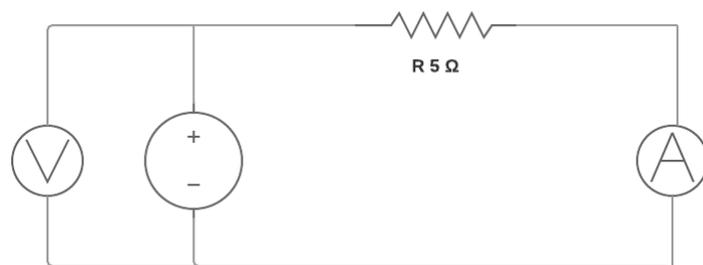


Figura 21. Esquema del circuito de prueba con una resistencia conectada.

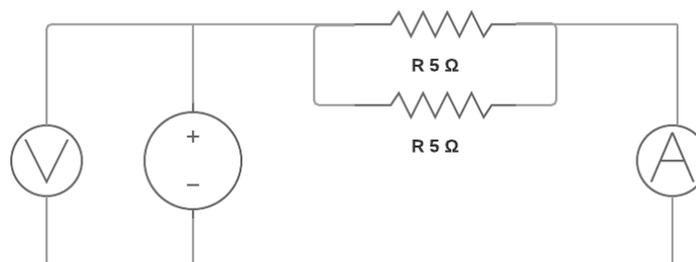


Figura 22. Esquema del circuito de prueba con dos resistencias en paralelo.

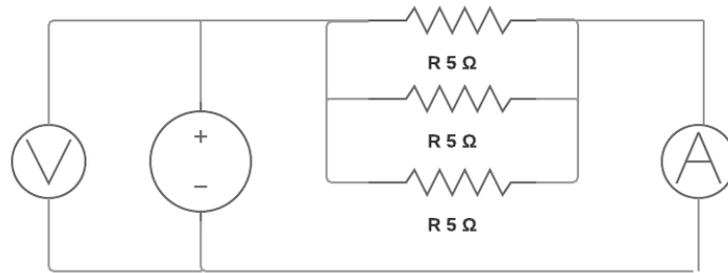


Figura 23. Esquema del circuito de prueba con tres resistencias en paralelo.

Posteriormente, las celdas TEG fueron colocadas en las ubicaciones para cada experimento y conectadas al circuito según los esquemas mostrados. Las celdas fueron adheridas a la cubierta del calentador de agua con la ayuda de pasta térmica disipadora de calor. Este tipo de pasta fue capaz de mantener las celdas TEG en posición y debido a su alta conductividad térmica, ayudan a disipar el calor en el lado frío de la placa. Finalmente, se colocaron las termocuplas en contacto con los lados frío y caliente de la celda TEG y se prepararon las mediciones. Para cada experimento se tomaron lecturas de todos los datos, desde que se enciende el calentador de agua, durante 10 minutos, cada minuto. Este proceso se repitió para cada uno de los valores de carga de 10.5, 7.5, 4.65, 2.33 y 1.55 ohmios, es decir, se realizaron cinco pruebas para cada experimento. Al finalizar cada prueba se cortó el paso de gas para permitir el paso de agua fría a través del calentador y que la temperatura de sus componentes disminuya antes de realizar la siguiente prueba.

Ubicación de celda TEG en los experimentos 1 y 2.

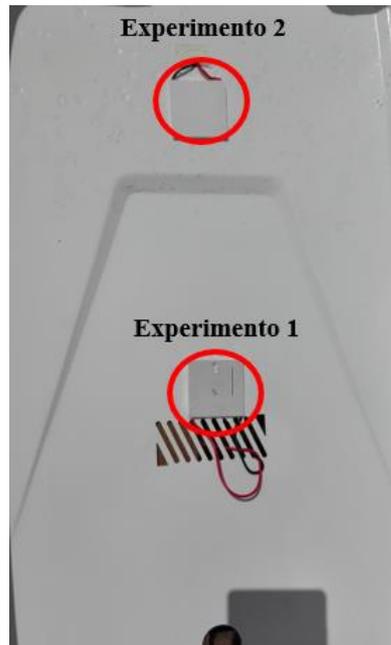


Figura 26. Ubicación de celdas en los experimentos 1 y 2, visto desde la parte posterior de la cubierta del calentador de agua.



Figura 27. Ubicación de celda en el experimento 3, en la parte interna del calentador de agua.

Resultados

Experimento 1

Tabla 7

Resultados experimento 1, Prueba 1, con tres resistencias en serie.

Carga de prueba (Ω)		10.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.041	0.001	54.90	42.00	12.90
2	0.053	0.021	59.40	46.50	12.90
3	0.097	0.046	68.90	46.40	22.50
4	0.055	0.032	67.40	52.00	15.40
5	0.067	0.049	69.70	53.50	16.20
6	0.060	0.043	69.40	54.00	15.40
7	0.074	0.053	74.00	53.30	20.70
8	0.088	0.056	74.80	51.10	23.70
9	0.084	0.061	77.00	54.10	22.90
10	0.087	0.064	75.90	54.80	21.10
Mínimo	0.041	0.001	54.90	42.00	12.90
Máximo	0.097	0.064	77.00	54.80	23.70
Promedio	0.071	0.043	69.14	50.77	18.37

Nota: En todos los experimentos T1 está definido como la temperatura en el lado caliente de la celda y T2 como la temperatura en el lado frío.

Tabla 8

Resultados experimento 1, Prueba 2 con dos resistencias en serie.

Carga de prueba (Ω)		7.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.069	0.069	62.1	42.8	19.3
2	0.072	0.071	66.9	47.6	19.3
3	0.069	0.068	66.1	45.6	20.5
4	0.078	0.075	71.3	48.8	22.5
5	0.074	0.062	70.8	49.4	21.4
6	0.074	0.068	72.5	49.2	23.3
7	0.081	0.076	74.8	51.7	23.1
8	0.079	0.077	75.4	51	24.4
9	0.079	0.062	72.1	51.8	20.3
10	0.084	0.078	75	51.8	23.2
Mínimo	0.069	0.062	62.10	42.80	19.30
Máximo	0.084	0.078	75.40	51.80	24.40
Promedio	0.076	0.071	70.70	48.97	21.73

Tabla 9

Resultados experimento 1, Prueba 3, con una resistencia.

Carga de prueba (Ω)		4.65			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.112	0.158	63.6	34.2	29.4
2	0.068	0.093	61.1	40	21.1
3	0.062	0.083	62.8	42.3	20.5
4	0.078	0.043	64	46.9	17.1
5	0.063	0.09	69.5	46.1	23.4
6	0.078	0.104	70.9	43.7	27.2
7	0.07	0.095	69.9	49	20.9
8	0.055	0.073	69.6	54.6	15
9	0.058	0.079	67.7	49.6	18.1
10	0.094	0.13	82	47.9	34.1
Mínimo	0.055	0.043	61.10	34.20	15.00
Máximo	0.112	0.158	82.00	54.60	34.10
Promedio	0.074	0.095	68.11	45.43	22.68

Tabla 10

Resultados experimento 1, Prueba 4, con dos resistencias en paralelo.

Carga de prueba (Ω)		2.33			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.07	0.106	63.3	38.3	25
2	0.118	0.011	73.1	44.3	28.8
3	0.083	0.051	69.3	47.8	21.5
4	0.087	0.132	78.7	46.5	32.2
5	0.065	0.106	72.3	52	20.3
6	0.078	0.126	78.7	49.6	29.1
7	0.076	0.083	76	53.2	22.8
8	0.086	0.139	83.8	49.5	34.3
9	0.068	0.099	75.5	54.2	21.3
10	0.09	0.079	77.8	55.6	22.2
Mínimo	0.065	0.011	63.30	38.30	20.30
Máximo	0.118	0.139	83.80	55.60	34.30
Promedio	0.082	0.093	74.85	49.10	25.75

Tabla 11

Resultados experimento 1, Prueba 5, con tres resistencias en paralelo.

Carga de prueba (Ω)		1.55			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.081	0.079	77.8	55.6	22.2
2	0.062	0.109	77	54.4	22.6
3	0.061	0.109	74.8	52.8	22
4	0.106	0.098	84.6	51.9	32.7
5	0.071	0.101	80.4	53	27.4
6	0.069	0.103	77.9	54.9	23
7	0.06	0.122	77.8	53.4	24.4
8	0.062	0.125	78.2	52.5	25.7
9	0.059	0.118	75.6	54.4	21.2
10	0.064	0.128	80.1	54.2	25.9
Mínimo	0.059	0.079	74.80	51.90	21.20
Máximo	0.106	0.128	84.60	55.60	32.70
Promedio	0.070	0.109	78.42	53.71	24.71

Máximo voltaje promedio y corriente promedio.

En el primer experimento es posible apreciar que el nivel promedio máximo de voltaje ocurrió en la prueba 4 (ver tabla 10), con una carga de 2.33 ohmios. El voltaje alcanzó 0.082 V, con una diferencia de temperatura promedio de 25.75 °C. Por otro lado, el promedio de intensidad de corriente máximo se dio en la prueba 5 (ver tabla 11) con una carga de 1.5 ohmios. El amperaje alcanzó 0.109 A, con una diferencia de temperatura promedio de 24.71 °C. Se puede observar que ambas pruebas son las de mayor diferencia de temperatura alcanzado del experimento. También son las pruebas en donde los puntos T1 y T2 alcanzaron las temperaturas más altas.

Punto de potencia promedio máxima.

La potencia máxima fue calculada utilizando los valores promedio de voltaje e intensidad de cada prueba, relacionándolos mediante la fórmula $P = V I$. De acuerdo a lo observado en la figura 23, el punto de potencia promedio máxima fue alcanzado durante la prueba 4, con un valor de 0.0077 Watts. La carga utilizada en este punto fue de 2.33 ohmios y coincide con el punto de mayor diferencia de temperatura del experimento.

Puntos de máximo voltaje y corriente

El punto individual de mayor voltaje de todo el experimento se dio en la prueba 4, en el minuto 2, alcanzando 0.118 V. Adicionalmente, el valor máximo de corriente ocurrió en la prueba 3, en el minuto 1. La corriente medida fue de 0.158 A, con una diferencia de

temperatura de 29,4 °C.

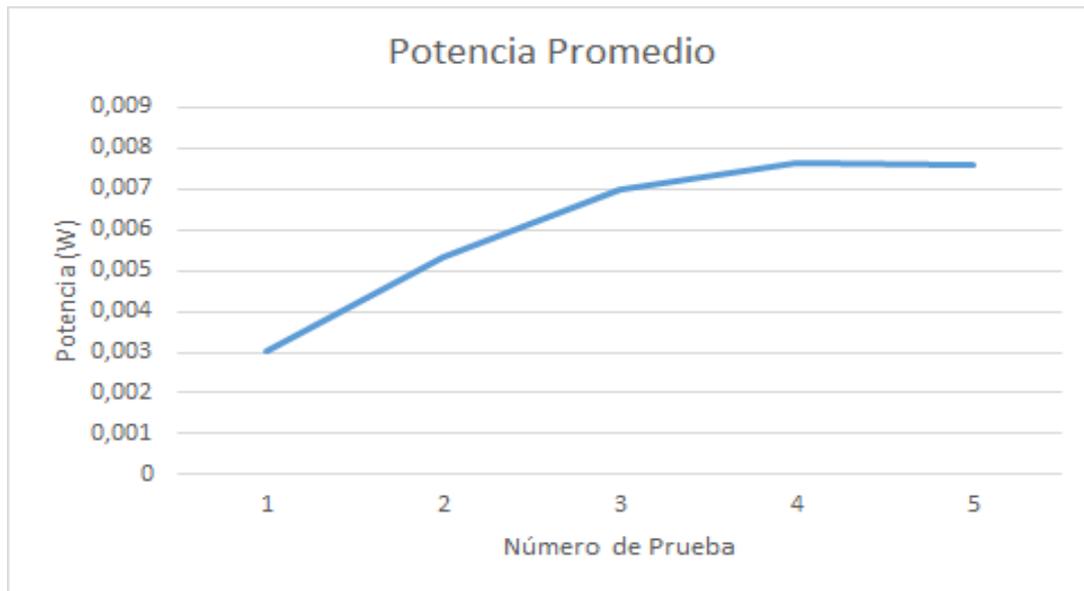


Figura 24. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 1.

Experimento 2

Tabla 12

Resultados del experimento 2, prueba 1, con tres resistencias en serie.

Carga de prueba (Ω)		10.5				
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	
1	0.039	0.02	49.9	22.6	27.3	
2	0.028	0.021	60.6	31.1	29.5	
3	0.023	0.021	61	32.7	28.3	
4	0.034	0.027	65.5	29.6	35.9	
5	0.035	0.03	65.2	32.4	32.8	
6	0.031	0.026	67.3	34.3	33	
7	0.036	0.031	67	31.5	35.5	
8	0.029	0.025	68.5	33.9	34.6	
9	0.044	0.037	65.9	26.3	39.6	
10	0.036	0.031	65.9	30.3	35.6	
Mínimo	0.023	0.020	49.90	22.60	27.30	
Máximo	0.044	0.037	68.50	34.30	39.60	
Promedio	0.034	0.027	63.68	30.47	33.21	

Tabla 13

Resultados del experimento 2, prueba 2, con dos resistencias en serie.

Carga de Prueba (Ω)		7.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.015	0.021	48.9	25.7	23.2
2	0.023	0.026	52.4	25.7	26.7
3	0.026	0.029	60.2	28.2	32
4	0.034	0.037	61.4	25	36.4
5	0.032	0.034	62.2	26.3	35.9
6	0.031	0.036	64.5	29.4	35.1
7	0.028	0.03	63.5	31.5	32
8	0.034	0.039	68.8	31.5	37.3
9	0.033	0.037	69	31.8	37.2
10	0.032	0.036	69.5	31.4	38.1
Mínimo	0.015	0.021	48.90	25.00	23.20
Máximo	0.034	0.039	69.50	31.80	38.10
Promedio	0.029	0.033	62.04	28.65	33.39

Tabla 14

Resultados del experimento 2, prueba 3, con una resistencia.

Carga de Prueba (Ω)		4.65			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.02	0.034	52.1	22.6	29.5
2	0.022	0.038	53.4	31.1	22.3
3	0.019	0.033	57.1	32.7	24.4
4	0.023	0.039	61.7	29.6	32.1
5	0.026	0.044	62.1	32.4	29.7
6	0.03	0.051	59.2	34.3	24.9
7	0.032	0.054	59.9	31.5	28.4
8	0.019	0.033	60.6	33.9	26.7
9	0.024	0.041	63.5	26.3	37.2
10	0.028	0.047	67.2	30.3	36.9
Mínimo	0.019	0.033	52.10	22.60	22.30
Máximo	0.032	0.054	67.20	34.30	37.20
Promedio	0.024	0.041	59.68	30.47	29.21

Tabla 15

Resultados del experimento 2, prueba 4, con dos resistencias en paralelo.

Carga de Prueba (Ω)		2.33			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.013	0.035	44.8	23.4	21.4
2	0.015	0.039	51.5	25.8	25.7
3	0.015	0.039	53	27.5	25.5
4	0.016	0.042	53.9	28.3	25.6
5	0.018	0.048	55	28.3	26.7
6	0.026	0.051	56.9	27.5	29.4
7	0.026	0.051	56.8	30.4	26.4
8	0.027	0.055	61.5	36.5	25
9	0.029	0.06	63.5	34.8	28.7
10	0.032	0.066	62.8	33	29.8
Mínimo	0.013	0.035	44.80	23.40	21.40
Máximo	0.032	0.066	63.50	36.50	29.80
Promedio	0.022	0.049	55.97	29.55	26.42

Tabla 16

Resultados del experimento 2, prueba 5, con tres resistencias en paralelo.

Carga de Prueba (Ω)		1.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.018	0.046	49.5	30.7	18.8
2	0.017	0.045	55.8	32.3	23.5
3	0.017	0.048	57.7	32.1	25.6
4	0.021	0.054	63.5	34.9	28.6
5	0.018	0.047	62.2	35.4	26.8
6	0.022	0.057	64.4	34.8	29.6
7	0.022	0.055	65	35.1	29.9
8	0.021	0.053	65.7	37.8	27.9
9	0.023	0.059	66.5	36.66	29.84
10	0.022	0.058	64.5	35.9	28.6
Mínimo	0.017	0.045	49.50	30.70	18.80
Máximo	0.023	0.059	66.50	37.80	29.90
Promedio	0.020	0.052	61.48	34.57	26.91

Máximo voltaje promedio y corriente promedio.

En este experimento se observa que el nivel promedio máximo de voltaje ocurrió en la prueba 1, con una carga de 10.5 ohmios. El voltaje alcanzó 0.034 V, con una diferencia de temperatura promedio de 33.21 °C. Por otro lado, el promedio de intensidad de corriente máximo se dio en la prueba 5, con una carga de 1.5 ohmios. El amperaje alcanzó 0.052 A, con una diferencia de temperatura promedio de 26.91 °C. Se puede observar que la prueba 2 se alcanzó la mayor diferencia de temperatura promedio del experimento, de 33.39 °C. Se puede observar que el voltaje y la intensidad de corriente varían de mayor manera entre sí, a diferencia con lo observado al experimento 1, donde los valores se comportaron de forma similar.

Punto de potencia promedio máxima.

De acuerdo a lo observado en la figura 24, el punto de potencia promedio máxima fue alcanzado durante la prueba 4, con un valor de 0.00105 Watts. La carga utilizada en este punto fue de 2.33 ohmios, pero no coincide con la mayor diferencia de temperatura del experimento.

Puntos de máximo voltaje y corriente.

El punto individual de mayor voltaje y mayor intensidad de corriente de todo el experimento se dio en la prueba 1, en el minuto 9, con una carga de 10.5 ohmios. El voltaje alcanzó 0.044. Por su parte el punto de mayor amperaje ocurrió en prueba 4 en el minuto 10, alcanzando 0.066 A con 2.33 ohmios de carga. La diferencia de temperatura alcanzada en este punto fue de 29.8 °C, superando la temperatura promedio de la prueba.

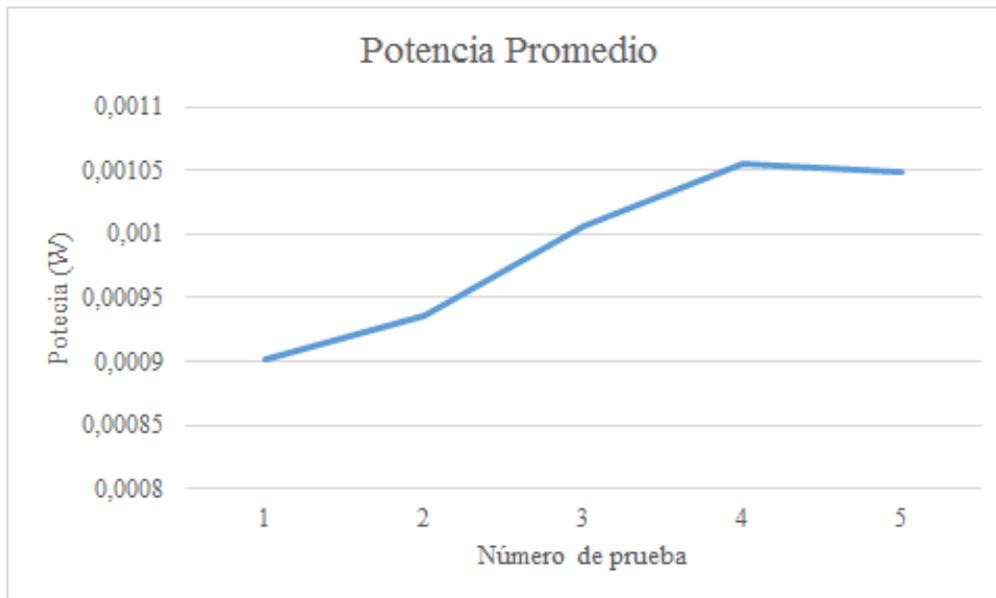


Figura 25. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 2.

Experimento 3

Tabla 17

Resultados experimento 3, prueba 1, con tres resistencias en serie.

Carga de prueba (Ω)		10.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.516	0.413	149.1	53.5	95.6
2	0.348	0.286	162.4	70.4	92
3	0.349	0.282	162.6	69.6	93
4	0.353	0.283	165.7	68.4	97.3
5	0.329	0.265	164.2	65.9	98.3
6	0.318	0.256	165.5	71.2	94.3
7	0.334	0.268	164.6	69.2	95.4
8	0.351	0.281	162.7	63.5	99.2
9	0.34	0.272	163.6	63.6	100
10	0.335	0.271	161.6	67.5	94.1
Mínimo	0.318	0.256	149.10	53.50	92.00
Máximo	0.516	0.413	165.70	71.20	100.00
Promedio	0.357	0.288	162.20	66.28	95.92

Tabla 18

Resultados experimento 3, prueba 2, con dos resistencias en serie.

Carga de prueba (Ω)		7.5			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.409	0.435	152.4	55.8	96.6
2	0.349	0.373	155.6	56.5	99.1
3	0.326	0.35	159.4	54.9	104.5
4	0.301	0.32	159.9	63.7	96.2
5	0.314	0.336	161.2	54.1	107.1
6	0.295	0.316	161.1	67.2	93.9
7	0.313	0.334	158.1	34.6	123.5
8	0.314	0.336	159.8	64.7	95.1
9	0.319	0.343	159.5	63.7	95.8
10	0.3	0.329	158.9	68.6	90.3
Mínimo	0.295	0.316	152.40	34.60	90.30
Máximo	0.409	0.435	161.20	68.60	123.50
Promedio	0.324	0.347	158.59	58.38	100.21

Tabla 19

Resultados experimento 3, prueba 3, con una resistencia.

Carga de prueba (Ω)		4.65			
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.396	0.42	149.2	58.5	90.7
2	0.269	0.411	155	65.8	89.2
3	0.264	0.428	155.9	57.3	98.6
4	0.253	0.403	155.8	65.8	90
5	0.262	0.417	155.2	61.2	94
6	0.25	0.399	156.6	60.8	95.8
7	0.236	0.374	156.7	64.5	92.2
8	0.235	0.376	155.7	66.9	88.8
9	0.254	0.406	155	62.4	92.6
10	0.253	0.404	155.8	65.9	89.9
Mínimo	0.235	0.374	149.20	57.30	88.80
Máximo	0.396	0.428	156.70	66.90	98.60
Promedio	0.267	0.404	155.09	62.91	92.18

Tabla 20

Resultados experimento 3, prueba 4, con dos resistencias en paralelo.

Carga de prueba (Ω)		2.33				
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	
1	0.339	0.699	130.6	51.11	79.49	
2	0.228	0.473	150.1	61	89.1	
3	0.213	0.443	153.3	63.9	89.4	
4	0.216	0.45	152.6	59.4	93.2	
5	0.199	0.418	154.2	67.5	86.7	
6	0.201	0.422	152.1	61.3	90.8	
7	0.231	0.486	152.4	55.2	97.2	
8	0.191	0.403	150.3	68.2	82.1	
9	0.157	0.333	139	64.4	74.6	
10	0.194	0.409	135	58.2	76.8	
Mínimo	0.157	0.333	130.60	51.11	74.60	
Máximo	0.339	0.699	154.20	68.20	97.20	
Promedio	0.217	0.454	146.96	61.02	85.94	

Tabla 21

Resultados experimento 3, prueba 5, con tres resistencias en paralelo.

Carga de prueba (Ω)		1.55				
Tiempo (min)	Voltaje(V)	Corriente (A)	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	
1	0.268	0.634	116.5	51.5	65	
2	0.189	0.449	129.3	54.8	74.5	
3	0.19	0.45	134	55.9	78.1	
4	0.185	0.44	135.5	56	79.5	
5	0.169	0.403	137.8	63.7	74.1	
6	0.227	0.528	130.3	53.2	77.1	
7	0.173	0.414	135.1	59.4	75.7	
8	0.153	0.362	131.9	60.6	71.3	
9	0.146	0.346	130.4	60.2	70.2	
10	0.131	0.312	129.8	56	73.8	
Mínimo	0.131	0.312	116.50	51.50	65.00	
Máximo	0.268	0.634	137.80	63.70	79.50	
Promedio	0.183	0.434	131.06	57.13	73.93	

Máximo voltaje promedio y corriente promedio.

En este último experimento se puede apreciar que el voltaje promedio máximo alcanzado fue de 0.3573 V, en la prueba 1, con una carga de 10.5 ohmios. Por su parte, la intensidad de corriente alcanzó 0.4536 A en la prueba 4, con una carga de 2.33 ohmios. En este caso, ninguno de los dos valores fue obtenido en los puntos de mayor diferencia de temperatura (100.21 °C).

Punto de potencia promedio máxima.

De acuerdo a lo observado en la figura 25, el punto de potencia promedio máximo ocurrió en la prueba 2, con carga de 7.5 ohmios. La potencia obtenida fue de 0.1125 W, y coincide con la prueba de mayor diferencia de temperatura.

Puntos de máximo voltaje y corriente.

El punto de máximo voltaje fue medido en el minuto 1 de la prueba 1, con carga de 10.5 ohmios. El voltaje alcanzado fue de 0.516 V. Por su parte el punto de intensidad de corriente máxima se observó en el minuto 1 de la prueba 4. El amperaje medido fue de 0.699 A. En ninguno de los dos casos existía la mayor diferencia de temperatura de la prueba, pero en ambos es posible observar que la temperatura de lado frío es la menor de toda la prueba.

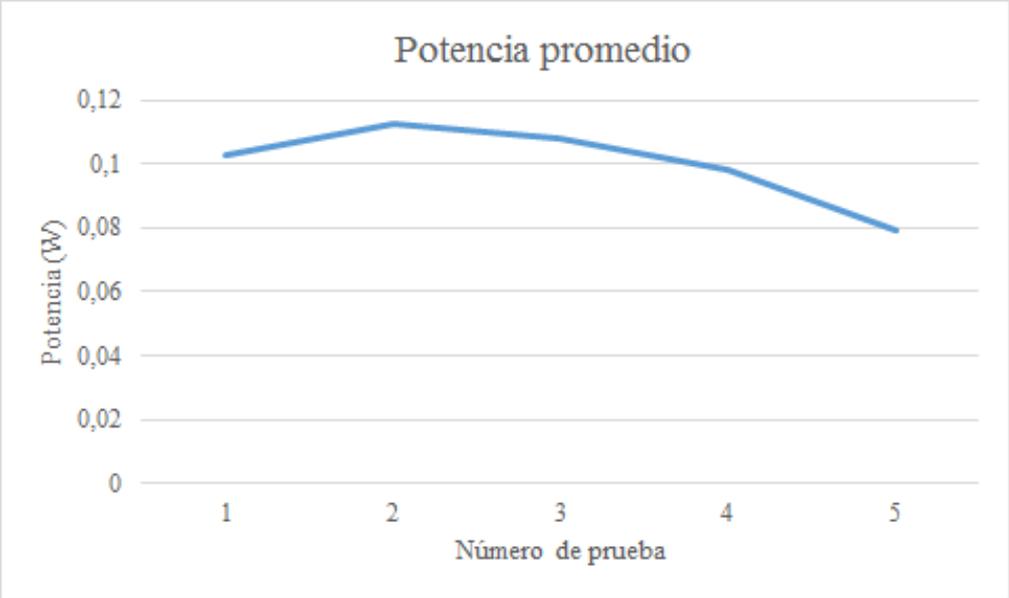


Figura 26. Gráfico de potencia promedio de cada prueba para el experimento 3.

Discusión

Conclusiones

Según los datos obtenidos en los experimentos, resumido en las tablas 22 y 23, el punto de mayor obtención de energía en el calentador de agua es el punto 2, con la celda ubicada en contacto con el serpentín (ver figura 27). A pesar de no disponer de una corriente externa de aire directa, la diferencia de temperatura fue la mayor de los tres experimentos por un rango considerable. Este experimento fue el único de los llevados a cabo en donde el lado caliente la celda TEG estaba en contacto directo con la superficie del calentador de agua; en los demás experimentos el lado frío estaba en contacto con la cubierta del calentador y el lado caliente lo estaba con el aire caliente circundante. Esto debe ser considerado para futuros experimentos, ya que como es posible apreciar en la tabla 23, los valores de potencia obtenidos en esta ubicación también son considerablemente mayores. Cabe recalcar que este es el punto de mayor exigencia para celda, debido a que es en donde su lado caliente fue expuesto a mayor temperatura, arriesgando su integridad física.

Otra conclusión que puede ser obtenida de los resultados de los experimentos, es que tanto los valores de voltaje como de amperaje medidos son muy bajos en relación a los valores detallados por el fabricante para este tipo de celdas (ver anexo B). Esto se debe principalmente a que en las pruebas controladas realizadas por el distribuidor de estos componentes, ambos lados de las celdas están en contacto directo con las fuentes de calor y refrigeración. En el caso de los experimentos realizados, únicamente uno de los lados estaba en contacto con la fuente de calor o frío, mientras que en el otro la transferencia de calor era realizada únicamente por convección entre la placa de la celda y el aire circundante. Esto generó una gran pérdida de eficiencia en el funcionamiento de la celda, afectando los valores de energía obtenidos.

Tabla 22

Promedio de diferencia de temperatura para cada experimento.

Promedio de diferencia de temperatura en cada experimento	
Numero de experimento	Promedio de ΔT (°C)
1	22.65
2	29.83
3	86.64

Tabla 23

Promedio de potencia para cada experimento.

Promedio de potencia en cada experimento	
Numero de experimento	Promedio de potencia (W)
1	0.00612
2	0.00099
3	0.10020

Recomendaciones

En primera instancia se pretendió utilizar un reóstato como carga variable, pero debido a la falta de disponibilidad de un reóstato de la resistencia requerida fueron utilizadas diferentes resistencias en serie o en paralelo para representar la carga. Se recomienda utilizar un reóstato de baja denominación para futuras pruebas, ya que evita la alteración del circuito entre las pruebas realizadas.

Debido a los diferentes factores externos que se presentaron durante las pruebas como: viento, cambios de clima, variación en la presión del agua, entre otros; se vio afectada la precisión de las mediciones, generando en algunos casos aumentos y disminuciones drásticos de temperatura que afectaron los resultados. Con base en esto, se recomienda realizar las pruebas en un ambiente controlado, no al aire libre, pero que cumpla los requisitos

de ventilación para el uso de calentadores de agua. En adición, se recomienda respetar el tiempo de funcionamiento convencional del calentador de agua para no llevar a sus elementos a temperaturas demasiado altas y obtener mediciones congruentes con el uso de un calentador de agua domiciliario. Como consideración adicional sobre el funcionamiento de los diferentes equipos que existen en el mercado, Se recomienda replicar los experimentos en calentadores de agua de diferente capacidad y marca, con el fin de obtener una visión más general del comportamiento de las celdas.

Durante la investigación se constató que las hojas de datos obtenidas para las celdas SP 1848-26401, no son específicas para el modelo utilizado. A pesar de que las hojas de datos mencionadas proveen los esquemas y principales materiales que componen las celdas utilizadas, muestran modelos de comportamiento y temperaturas de prueba de celdas diseñadas para enfriamiento de componentes, mas no para termogeneración. La hoja de datos específica para este modelo de celda no pudo ser obtenida. Por este motivo, se recomienda la utilización de hojas de datos específicas para termogeneración, ya que los datos detallados de funcionamiento pueden facilitar cálculos previos y ayudar a predecir de mejor manera el funcionamiento práctico de las celdas. En caso de no existir la hoja de datos para este modelo, se recomienda realizar la caracterización y modelo de funcionamiento detallado experimentalmente, con el fin de proporcionar una fuente de datos precisa para futuros experimentos.

Cabe mencionar que el contacto directo de los lados de las celdas con las fuentes de alta y baja temperatura, puede aumentar considerablemente el rendimiento de las celdas, de acuerdo a lo recomendado por algunos fabricantes. Por esto se recomienda instalar las celdas en superficies planas con poca rugosidad y de ser posible, utilizar un sistema colector de calor que esté en contacto directo con el lado caliente de la celda.

Finalmente, de acuerdo a lo observado en los experimentos para uso de celdas en calentadores de agua; leves mejoras en la disminución de temperatura en el lado frío de la celda pueden resultar en una gran mejora de rendimiento de la celda. Se recomienda tomar en cuenta esto para futuros estudios.

Referencias

- Alcalde San Miguel, P. (2003). *Electrónica General*. Madrid: Thompson Editores Spain.
- Boiler Mx. (20 de Abril de 2016). *H2OTEK*. Obtenido de <http://www.boiler.mx/historia-calentador-agua-sus-tipos.htm>
- Cardona, A. F., & Maciel. (23 de Mayo de 2010). Efecto termoeléctrico. Guadalajara.
- Cubero Castillo , J. M. (2003). *Angelfire*. Obtenido de <http://web.archive.org/web/20030815150809/www.angelfire.com/id/todoesposible/pilas.htm>
- CUI Inc. (2015). *Peltier Application Note*. Obtenido de <http://www.cui.com/product/resource/peltier-app-note.pdf>
- El Comercio. (24 de Diciembre de 2014). Menos importación de calefones de gas. *El Comercio*. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-importacion-calefones-gas-matriz.html>
- EMAPS Quito. (2016). *Norma CO 10.7* . Obtenido de http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_rural_para_estudios_y_disenos.pdf
- Encyclopædia Britannica. (2016). *Battery*. Obtenido de <http://www.search.eb.com/technology/battery-electronics>
- Encyclopædia Britannica. (2016). *heating*. Obtenido de <http://www.search.eb.com/technology/heating-process-or-system>
- Encyclopedia of Materials: Science and Technology. (2002). *Thermoelectric Materials: Principles, Structure, Properties, and Applications*. Elsevier Science Ltd.

- Estevez Jacinto, C. S., & Gallego Rodriguez, L. G. (9 de Noviembre de 2007). *Aulas Virtuales, Universidad Francisco José de Caldas*. Obtenido de <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/RAIZDC/contenidoprogramatico/capitulo3/teorema%20de%20maxima%20trans%20de%20potencia.html>
- European Thermodynamics Ltd. (17 de Junio de 2015). *European Thermodynamics*. Obtenido de <http://www.europanthermodynamics.com/news/difference-between-TEC-and-TEG>
- Gómez, A. J. (2015). *Universidad de los Andes Colombia*. Obtenido de http://wwwprof.uniandes.edu.co/~ant-sala/cursos/FDC/Contenidos/06_Thevenin_Norton_Maxima_Transferencia_de_Potencia.pdf
- Goupil, C., Ouerdane, H., Zabrocki, K., Seifert, W., & Hinsche, N. F. (2011). Thermodynamics and Thermoelectricity. En *Entropy vol. 13*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2603. *NTE INEN 2603:2012*. Quito, Ecuador.
- Lopez, C. R. (Junio de 2010). Optimización de modulos Peltier para Refrigeración. Mexico D.F.
- Patterson, G., & Sobral, M. (2007). Efecto Peltier.
- Rowe, D. (2006). *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group.
- Ruud Heating, Cooling & Water Heating. (Abril de 2016). *Ruud.com*. Obtenido de <http://www.ruud.com/about/>

- Snyder, G. J. (2008). *The Electrochemical Society*. Obtenido de http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf
- Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias sociales y Administrativas. (2010). *UPIICSA*. Obtenido de http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/polilibros/portal/Polilibros/P_proceso/POLILIBRO_AQUISICION_DE_DATOS/POLILIBRO/UMD/umd%203/informacion/3.2.html

Anexo A

- Esquema de los componentes de un calentador de agua marca *Splendid* de 16 litros.

Anexo B

- Hoja de datos SP 1848