

SISTEMA DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA PARA LA RECUPERACIÓN  
DE CALORES RESIDUALES DE BAJA TEMPERATURA

MARÍA CAROLINA HERRERA CORREA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2020

SISTEMA DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA PARA LA RECUPERACIÓN  
DE CALORES RESIDUALES DE BAJA TEMPERATURA

MARÍA CAROLINA HERRERA CORREA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera  
mecánica

Asesor

DANIEL SANÍN VILLA

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2020

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	8
2.	MARCO TEÓRICO.....	9
2.1.	Efectos termoeléctricos .....	9
2.1.1.	Efecto Seebeck .....	9
2.1.2.	Efecto Peltier .....	11
2.1.3.	Efecto Thomson .....	12
2.2.	Materiales termoeléctricos .....	12
2.3.	Módulos termoeléctricos .....	15
2.4.	Inventario de fuentes de calor de baja temperatura.....	16
2.4.1.	Energía termica solar .....	16
2.4.2.	Calor residual industrial.....	18
2.5.	Fuentes de calor de desecho industrial.....	20
2.6.	Convertidores DC-DC .....	22
2.6.1.	Convertidor Buck.....	23
2.6.2.	Convertidor Boost.....	24
2.6.3.	Convertidor Buck-Boost .....	25
2.6.4.	Convertidor Push-pull.....	26
2.6.5.	Convertidor Fly-back .....	27
2.6.6.	Convertidor Cu'k.....	28
2.7.	Cuadro comparativo de los convertidores DC-DC .....	28
2.8.	Acondicionamiento de potencia y mejora de eficiencia de los TEGs... 31	

2.9.	Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).....	32
3.	METODOLOGÍA.....	35
4.	RESULTADOS.....	38
4.1.	Estructura de una celda termoeléctrica.....	38
4.2.	Comparación de termoeléctricos.....	39
4.3.	Diseño y simulación .....	39
5.	CONCLUSIONES.....	50
6.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	51

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Portadores de carga negativos (electrones). Semiconductor tipo N.....	9
Figura 2. Portadores de carga positivos (huecos). Semiconductor tipo P. ....	9
Figura 3. Efecto Seebeck con semiconductor tipo N. ....	10
Figura 4. Efecto Peltier.....	11
Figura 5. Dependencia de los factores con la concentración de los portadores de carga. [9] .....	13
Figura 6. Dependencia de ZT con la temperatura. [12] .....	15
Figura 7. Esquema de un generador termoeléctrico simple. [14] .....	16
Figura 8 Radiación solar en la superficie terrestre. [15].....	17
Figura 9. Configuración esquemática convertidor Buck.....	24
Figura 10. Configuración esquemática convertidor Boost. ....	25
Figura 11. Configuración esquemática convertidor Buck-Boost. ....	26
Figura 12. Configuración esquemática convertidor Push-pull.....	27
Figura 13. Configuración esquemática convertidor Fly-back. ....	27
Figura 14. Configuración esquemática convertidor Cu'k.....	28
Figura 15. Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento TEG propuesto. ....	32
Figura 16. Curva P vs V bajo seguimiento del MPP con algoritmo Conductancia Incremental.....	34
Figura 17 Diagrama de flujo para selección de termoeléctrico .....	36
Figura 18. Estructura de una celda termoeléctrica.....	38
Figura 19. Superficies en el termoeléctrico. ....	42
Figura 20. Contorno de temperatura en el termoeléctrico en estado estacionario.	42

Figura 21. Contorno de voltaje eléctrico en el termoeléctrico en estado estacionario.  
..... 43

Figura 22. Contorno de densidad de la corriente en el termoeléctrico. .... 44

Figura 23 Diagrama final del sistema termoeléctrico ..... 48

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Temperatura de gases industriales.....	21
Tabla 2. Comparación de convertidores DC-DC.....	29
Tabla 3 Comparación de termoeléctricos. [36].....	39
Tabla 4 Caracterización del material tipo P. [37].....	40
Tabla 5 Caracterización aleación de cobre.....	40
Tabla 6 Parámetros de entrada para la simulación.....	41
Tabla 7 Máximo y mínimo de voltajes.....	44
Tabla 8 Densidad total de corriente dentro del termoeléctrico.....	44
Tabla 9 Resistencia interna de un termopar.....	46
Tabla 10 Costo de sistema de generación termoeléctrica.....	48

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de grado se analizó y se simuló el funcionamiento de un sistema de generación termoeléctrica para la recuperación de calores residuales de baja temperatura, un trabajo que retó los conocimientos de la ingeniería para contribuir a solucionar los problemas energéticos de la actualidad. Estos sistemas de generación termoeléctrica, comúnmente conocidos por las siglas TEG son sistemas de conversión directa de energía térmica a energía eléctrica que utilizan calor residual como fuente de calentamiento. Para el desarrollo del trabajo de grado se propusieron cuatro etapas específicas, en la primera etapa se consolidó la teoría de los efectos y composición de los generadores termoeléctricos, convertidores DC-DC y los algoritmos de máxima potencia. La segunda fase se desarrolló la comparación de los módulos termoeléctricos comerciales. En la tercera etapa se diseñó y se simuló por medio de la herramienta Ansys donde se observó el comportamiento interno de los termoeléctricos y, por último, de acuerdo los resultados obtenidos se procedió con la evaluación y conclusión de los resultados obtenidos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Efectos termoeléctricos

#### 2.1.1. Efecto Seebeck

Es conocido como el efecto Seebeck gracias a su descubridor Thomas Johann Seebeck, quien estableció que al calentar la unión de dos metales o aleaciones de diferentes composiciones químicas se genera una diferencia de potencial entre sus extremos, correspondiente a la diferencia de temperatura alcanzada. Esto permite convertir directamente un flujo de calor en energía eléctrica [1]. Ahora bien, el efecto Seebeck se basa en la disposición de los portadores de carga (electrones y huecos) a distribuirse de modo no homogéneo en un semiconductor. Es decir, sus extremos están a diferente temperatura por consiguiente los portadores de carga negativa y positiva tienden a acumularse en el extremo frío, como representa en la figura 1 y 2 para cada tipo de semiconductor [2].

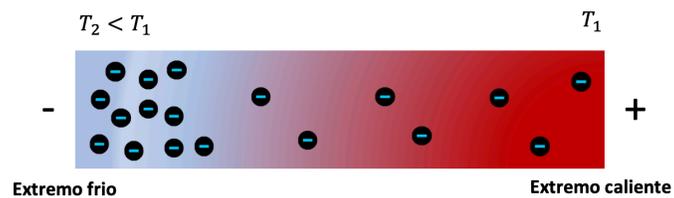


Figura 1. Portadores de carga negativos (electrones). Semiconductor tipo N.

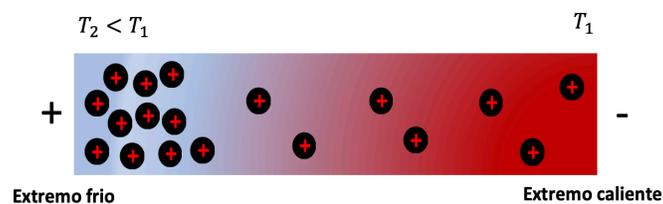
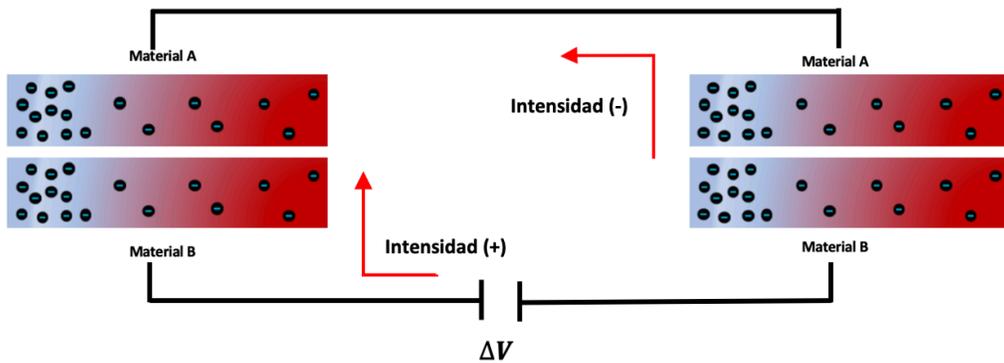


Figura 2. Portadores de carga positivos (huecos). Semiconductor tipo P.

La relación entre la diferencia potencial generada y la diferencia de temperatura es lo que se conoce como el coeficiente Seebeck ( $\alpha$ ) del material, también conocido como potencia termoeléctrica cuyas unidades son V/K. Como se representa en la figura 3 dos materiales conductores A y B están conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo lo que genera un voltaje  $\Delta V$  [3].



**Figura 3. Efecto Seebeck con semiconductor tipo N.**

Por lo tanto, la configuración de la figura 3 se tiene que la diferencia de potencial es directamente proporcional a la diferencia entre los coeficientes Seebeck del material A y el material B y la diferencia de temperaturas alcanzada, siendo así se puede definir el voltaje generado por medio de la ecuación 1 como:

$$\Delta V = \Delta T(\alpha^A - \alpha^B) \quad (1)$$

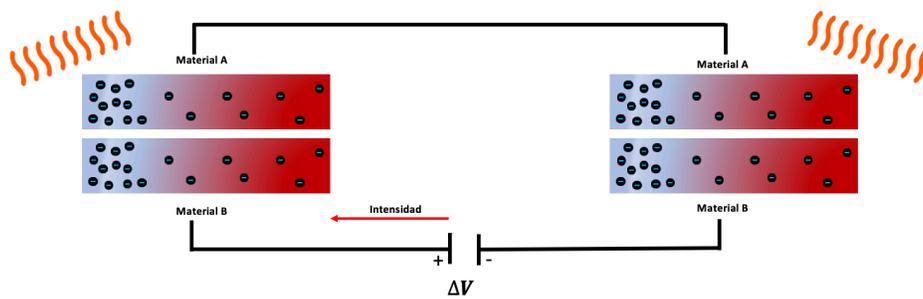
Donde la diferencia de temperaturas  $\Delta T = T_1 - T_2$  entre los coeficientes Seebeck de los materiales A y B. Ahora bien, despejando los coeficientes Seebeck se tiene que:

$$\alpha^A - \alpha^B = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

Para definir si el coeficiente Seebeck es positivo o negativo va a depender de la dirección de la intensidad, es decir, si va en sentido de las manecillas del reloj será positiva en caso contrario será negativo como se puede observar en la figura 3.

### 2.1.2. Efecto Peltier

El efecto Peltier descubierto por Jean Peltier, tiene un comportamiento inverso al efecto Seebeck, es decir, al someter los extremos de dos materiales a una intensidad, se desprende o se absorbe calor, como se puede observar en las figura 4 [4].



**Figura 4. Efecto Peltier.**

Dado la configuración de la figura 4 se tiene que el flujo de potencia térmica por unidad de superficie ( $Q$ ) debido al efecto Peltier en la unión de los materiales A y B, esta definido por la siguiente expresión:

$$Q = I(\Pi^A - \Pi^B) \quad (3)$$

Donde  $\Pi^A - \Pi^B$  es el coeficiente Peltier de los materiales A y B, su unidad es el Voltio (V).  $I$  es la densidad de corriente a través de la unión, sus unidades son (Amperio/metro cuadrado) ( $A/m^2$ ). Cabe resaltar que, si se invierte el sentido de la intensidad, también se invierte el signo de la producción de calor, es decir, se puede

controlar la dirección de transferencia de calor mediante el cambio de polaridad de la fuente  $\Delta V$  [2], [5].

### 2.1.3. Efecto Thomson

Otro de los fenómenos termoeléctricos es el efecto Thomson, este efecto ocurre cuando se hace pasar una intensidad por un conductor cuya temperatura varía a lo largo de su longitud ( $x$ ) [6]. El flujo de potencia térmica por unidad de volumen ( $Q$ ), debido al efecto Thomson de un material A, viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \gamma^A I \Delta T \quad (4)$$

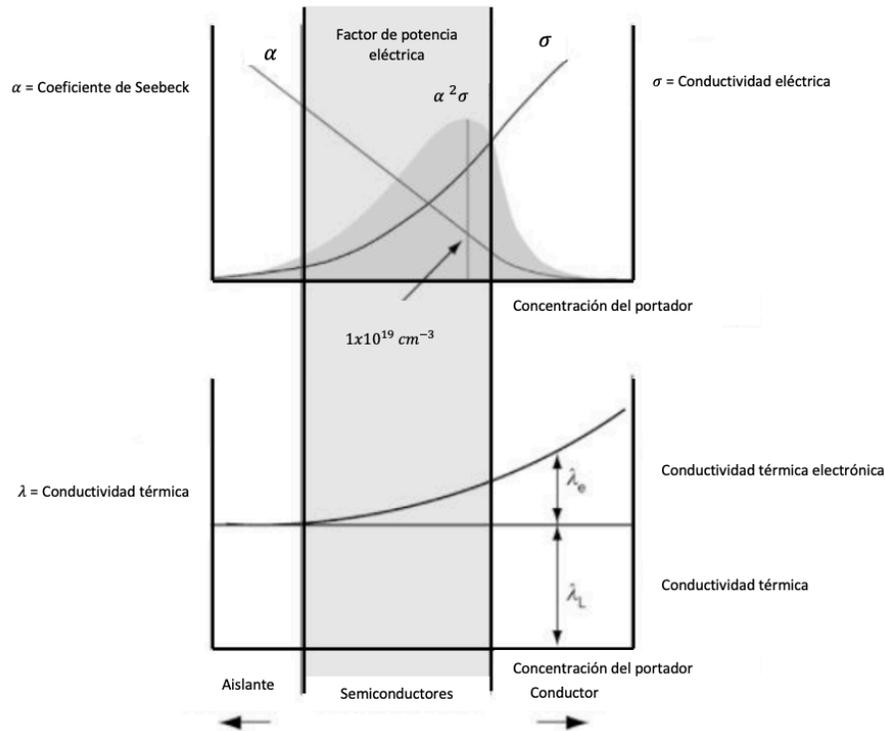
Donde  $\gamma^A$  es el coeficiente Thomson y sus unidades son el (Voltio/Kelvin) (V/K),  $I$  es la densidad de corriente y sus unidades son el (Amperio/metro cuadrado) ( $A/m^2$ ) y  $\Delta T$  el gradiente de temperatura. Al igual que el efecto Peltier es variable, es decir, invirtiendo el sentido de la intensidad se invierte el signo de generación de calor [7].

## 2.2. Materiales termoeléctricos

Los mejores materiales termoeléctricos están definidos como "phonon-glass electron-crystal", que significa que los materiales deben tener muy baja conductividad térmica ( $Z$ ) como el vidrio y alta conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) como el cristal.

Además, los factores de los que depende la conductividad térmica dependen a su vez de la concentración de los portadores de carga, siendo este último directamente proporcional a la conductividad eléctrica, dificultando establecer una diferencia de potencial en el material cada vez que aumentan, lo que significa que el material tendrá un coeficiente de Seebeck menor como se observa en la figura 5, es decir, si la concentración del portador aumenta, también aumenta su conductividad

eléctrica donde su intercepción sería un coeficiente de Seebeck correcto y a su vez una diferencia de potencial deseada [8].



**Figura 5. Dependencia de los factores con la concentración de los portadores de carga. [9]**

Debido a su estructura atómica los metales tienen una alta conductividad eléctrica y son excelentes conductores del calor, al contrario de los aislantes que tienen una baja conductividad eléctrica [10]. Los semiconductores son los apropiados para aplicaciones termoeléctricas debido a que tienen una conductividad eléctrica media por lo que pueden emplearse de manera dual como conductor o aislante en función de las condiciones térmicas [5]. Se dividen en tres grupos según el rango de temperaturas de trabajo como se puede observar en la figura 6.

- **Temperatura baja (lado caliente):** pueden trabajar a temperaturas de 450K, como por ejemplo, aleaciones de bismuto (Bi), antimonio (Sb), telurio (Te) y selenio (Se).
- **Temperatura media:** pueden trabajar a temperaturas de 850K, como por ejemplo, aleaciones de plomo (Pb).
- **Temperatura alta (lado frio):** pueden trabajar a temperaturas de 1300K, como por ejemplo, las aleaciones de SiGe.

Por otra parte, en la figura 6 se observa el factor de merito que se utiliza para determinar la eficiencia de los generadores termoeléctricos. Es decir, de acuerdo a las temperaturas que se encuentre el termoeléctrico y el tipo de material de construcción se podrá definir que tan eficiente es el termoeléctrico. En la actualidad, estos materiales siguen siendo estudiados con el objetivo de aumentar el factor de mérito  $ZT$  mediante la disminución de la conductividad térmica  $k$  empleando técnicas como la inserción de defectos en los sólidos y nano estructuras, pero aun están en fase de investigación y no se comercializan. El factor de merito está definida por la ecuación 5 y se observa que el factor de merito es inversamente proporcional a la conductividad térmica  $k$  y directamente proporcional a la conductividad eléctrica. Donde,  $ZT$  es el factor de mérito,  $S$  es el coeficiente de Seebeck,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $T$  es la temperatura absoluta y  $K$  es la conductividad térmica [11].

$$ZT = \frac{s^2 \sigma T}{k} \quad (5)$$

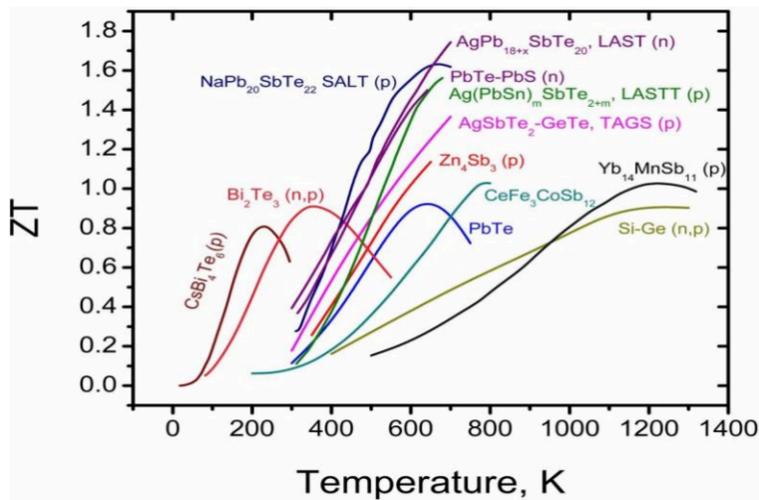


Figura 6. Dependencia de ZT con la temperatura. [12]

Gracias a numerosos avances en la tecnología, se ha llegado a obtener valores de ZT incluso mayores que dos. Para ello se manipula la estructura de los materiales, para así modificar los parámetros de los cuales depende el factor de mérito. Sin embargo, la mayor parte de estos avances se han dado en el contexto de la investigación. Una de las técnicas que se utilizan para lograr que los materiales termoeléctricos presenten una mayor eficiencia es el uso de nanoestructuras. Cuando se refieren a materiales nanoestructurados en el ámbito de la termoelectricidad, bien puede tratarse un material resultante de la unión de partículas nanométricas, o materiales que incluyen en una matriz una segunda fase de escala nanométrica y se ha demostrado que la inclusión de esta segunda fase, disminuye la conductividad térmica, resultando un mayor factor de mérito [13].

### 2.3. Módulos termoeléctricos

El módulo termoelectrico más simple está formado por un semiconductor tipo N y otro semiconductor tipo P, lo cuales se diferencian por el tipo de impurezas que tengan, los tipo N tiene impurezas pentavalentes y el tipo P tiene impurezas trivalentes. La figura 7 representa como están conectados en serie eléctricamente por un conductor de cobre y térmicamente en paralelo [14].

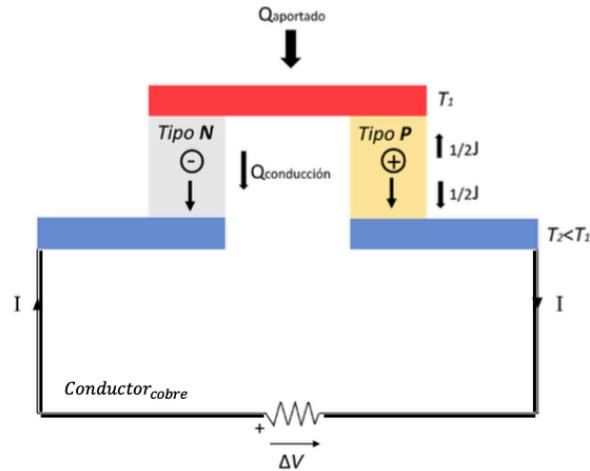


Figura 7. Esquema de un generador termoelectrico simple. [14]

## 2.4. Inventario de fuentes de calor de baja temperatura

A la hora de diseñar y crear un sistema de termoelectricos para recuperar calores de baja temperatura es importante analizar que dispositivos son los indicados para ser utilizados para dicho proceso, a continuación un inventario con varias fuentes de estos calores residuales.

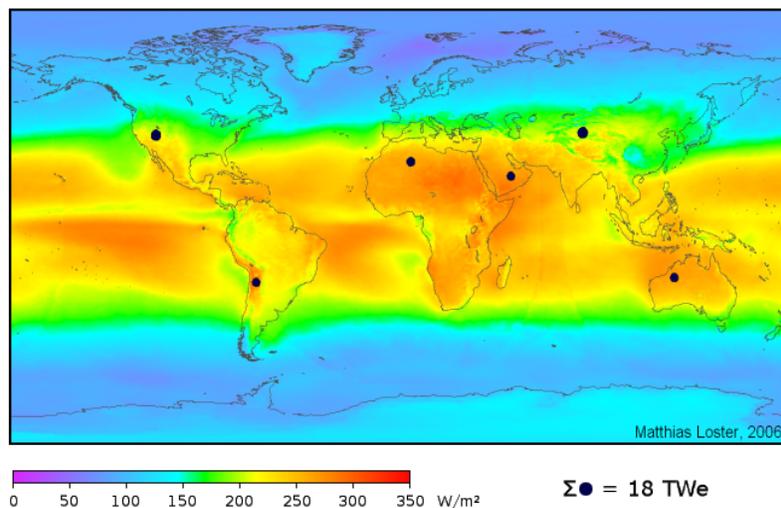
### 2.4.1. Energía termica solar

La combinación de colectores solares térmicos con diferentes métodos de obtención de potencia puede convertirse en una alternativa de generación de energía eléctrica.

En las plantas termosolares de concentración se utiliza luz solar concentrada obtenida mediante diversas configuraciones de lentes y espejos para generar calor

a alta temperatura. Esta energía en forma de calor se transfiere a un fluido, que es el medio utilizado en plantas de potencia habituales para generar energía mecánica y esta se transforma en energía eléctrica mediante un sistema de alternadores. En el caso que la energía suministrada por el sol no sea la suficiente, es posible calentar estos fluidos de transporte mediante la combustión de otros elementos.

La luz procedente del sol proporciona energía térmica en forma de radiación en la superficie de la tierra. La siguiente imagen [15] muestra la distribución de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ):



**Figura 8 Radiación solar en la superficie terrestre. [15]**

Los puntos negros en la imagen indican los lugares que podrían abastecer la energía total demandada en la tierra si la radiación solar fuera empleada para ello.

Esta gran cantidad de energía suministrada por el sol puede ser aprovechada mediante captadores de concentración, estos dispositivos concentran la radiación solar sobre superficies con geometrías lineales o puntuales. En el lugar donde es concentrado el haz de luz normalmente circula un fluido de transporte, el cual

absorbe esta energía e incrementa su temperatura. Los concentradores más empleados son los de tipo parabólico, los concentradores lineales y sistemas de captación central en torres; estos últimos requieren mayor infraestructura y tiene mayor capacidades de recoger energía. Los concentradores de captación central y los que tienen formas de disco parabólico, tienen factores de concentración mayor y temperaturas de operación más altas, es por esta razón que estos equipos pueden ser empleados para ciclos convencionales donde los fluidos de trabajo sean vapor o aire. En el caso de los concentradores lineales, las temperaturas que se alcanzan son inferiores (del orden de cientos de grados) y podrían emplearse en combinación con los módulos termoeléctricos para su aprovechamiento.

Estos colectores buscan minimizar las pérdidas de energía por transferencia de calor con el medio exterior (aire ambiente), al disminuir su área de contacto. Estos equipos se caracterizan principalmente por la relación de concentración, la cual relaciona el área de apertura y el área de absorción. A medida que aumenta el factor de concentración también lo hace la temperatura de la energía producida, pero se requiere mayor inversión en los componentes ópticos y, si fuese el caso, en un sistema de seguimiento de la posición solar. Por lo tanto, el costo de la energía producida aumentaría con la temperatura empleada para producirla [9].

#### **2.4.2. Calor residual industrial**

En la industria son muy utilizados elementos como calderas, las cuales son equipos para la generación de vapor, estos son instrumentos térmicos que cumplen con la tarea de convertir agua en vapor, a través de la quema de cualquier combustible [16].

Estos equipos son usados comunmente en diferentes industrias como: química, petroquímica, alimentaria, en el sector hospitalario y científico y en muchas compañías productoras de bebidas alcohólicas.

Existen varios tipos de calderas dependiendo de sus dimensiones, su capacidad de generar y recuperar calor/vapor, el funcionamiento, el combustible, entre otras. Existen las calderas de vapor las cuales generan vapor de agua gracias a la transferencia de calor constante a un combustible, están las calderas de vapor eléctricas las cuales no necesitan de un combustible para su funcionamiento y están las calderas de combustibles fósiles las cuales permiten generar una potencia térmica de mas de 3.500kW y permiten procesos de calentamiento y enfriamiento con un mismo fluido [17].



**Figura 9 Caldera de vapor de uso industrial [17]**

A su vez las calderas tienen pérdidas por radiación y convección por la armadura o coraza de la misma, estas pérdidas de calor en las calderas se les conoce como calor residual que se puede aprovechar para generar electricidad. Es por ello, que se hace uso de los termoelectrónicos para aprovechar ese calor residual.

## **2.5. Fuentes de calor de desecho industrial**

Muchas actividades en las industrias de manufactura rechazan calor a bajas temperaturas, en las grandes industrias el desperdicio de energía en forma de calor es tan alto que es difícil reutilizarlo o emplearlo nuevamente para los procesos productivos propios de las empresas. Esta energía es rechazada normalmente a la atmosfera, generando polución y contaminación.

La recuperación de este calor, permite reducir el impacto negativo en el ambiente y ahorrar dinero. Según un estudio realizado por [20], en Estados Unidos cerca de 750 MW podrían ser recuperados para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de desecho industrial, 500 MW en Alemania y alrededor de 3000 MW en toda Europa.

Existen algunas empresas que presentan particularmente mayores potenciales para el uso de energía en forma de calor de desecho, tal es el caso de las cementeras, donde se desperdicia gran parte del calor producto de los gases de combustión. Estos gases no son empleados y pueden alcanzar temperas entre 215°C y 315°C. [21].

Los motores de combustión interna convencionales solo convierten alrededor de un tercio de la energía disponible en movimiento. Desperdiciando la temperatura de los gases de combustión que pueden alcanzar los 400°C. [22]. Los ciclos de potencia que empleen como fuente de energía estas bajas temperaturas, son una buena alternativa para incrementar la eficiencia global de los procesos, ahorrar energía y disminuir el consumo de fuentes fósiles de alta contaminación para el planeta.

Los ciclos de refrigeración también son candidatos adecuados para utilizar el calor que se desecha en las unidades condensadoras, donde el acople de módulos termoeléctricos acoplados en las unidades condensadoras permitirían la recuperación de dicho calor para alimentar sensores o sistemas de comunicación. En la tabla 1 se resumen algunas de las temperaturas de gases industriales que pueden ser empleadas para la generación de electricidad con módulos termoeléctricos. [23]

**Tabla 1 Temperatura de gases industriales.**

<b>Tipo de industria</b>	<b>Proceso</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Cementera	Gases del exosto del horno	200 - 350
	Gases de enfriamiento del horno	200 - 300
Acero	Hornos de arco eléctrico	250
	Laminadores	300 - 450
	Chimenea de hornos de Coke	190
	Estufas de altos hornos	250 - 300
Vidrio	Contenedores de vidrio fundido	160 - 200
	Vidrios Planos	160 - 200
	Fundición de fibra de vidrio	140 - 160
Química	Gases de hornos de procesos	340
	Gases de calderas	230
	Gases de refinamiento	150 - 300
	Turbinas de gas	370 - 540
Alimentos	Freidoras	120 - 212
	Gases de combustión	164

## 2.6. Convertidores DC-DC

Los generadores termoeléctricos no se conectan directamente a la carga, debido a que su punto de operación está determinado por una intersección de la fuente DC y las curvas características de la carga. Por lo tanto, el punto de funcionamiento cambia con una diferencia de temperatura y la corriente de carga. Para garantizar la estabilidad de operación de los termoeléctricos de manera efectiva, se necesita un ajuste de carga para mantener el mejor punto de operación. Por lo tanto, se acopla un convertidor DC-DC entre el termoeléctrico y la carga [24].

Además, los convertidores DC-DC se utilizan para obtener valores de tensiones estables en los terminales de salida, ya que los generadores termoeléctricos generan pequeñas fluctuaciones ocasionando ruido en la señal de salida. Los convertidores son componentes de semiconductores que aplicando algunas señales actúan como interruptores. Es decir, abren o cierran para permitir el paso el nivel de tensión configurada. La tensión media de salida se ajusta de acuerdo con el tiempo en que los semiconductores están abiertos o cerrados, normalmente se denomina como  $t_{off}$  cuando esta abierto y  $t_{on}$  cuando esta cerrado [25].

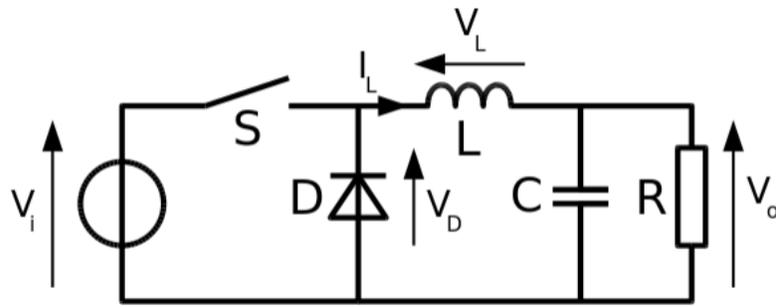
Ahora bien, el funcionamiento interno de los convertidores consiste en la modulación por ancho de pulsos de control de tensión de salida que se encarga en la conmutación de los interruptores a frecuencia constante y el ajuste de la duración del tiempo de conducción [26].

Por otra parte, la aplicación del convertidor DC-DC se utiliza para mejorar el rendimiento del sistema TEG. El convertidor DC-DC es un circuito electrónico capaz de convertir de una fuente de corriente continua (DC) a otra tensión DC con un valor de voltaje diferente y estable. Es importante en una situación en la que se necesita un voltaje más alto de un voltaje más bajo o se necesita un voltaje más bajo de un

voltaje más alto. También se aplica para regular el voltaje de fuentes no reguladas como dispositivos TEG, células solares, etc., por lo tanto, hay varias configuraciones de convertidores DC-DC disponibles para adaptarse a diferentes aplicaciones [27]. Los convertidores DC-DC tienen seis configuraciones de funcionamiento, la configuración reductor, la configuración de elevador, la configuración reductor-elevador, la configuración Push-pull, la configuración Cu'k y la configuración Fly-back. Estas configuraciones tienen características muy diferentes, para ello, se analizan de forma separada en sus modos de funcionamiento [28].

### **2.6.1. Convertidor Buck**

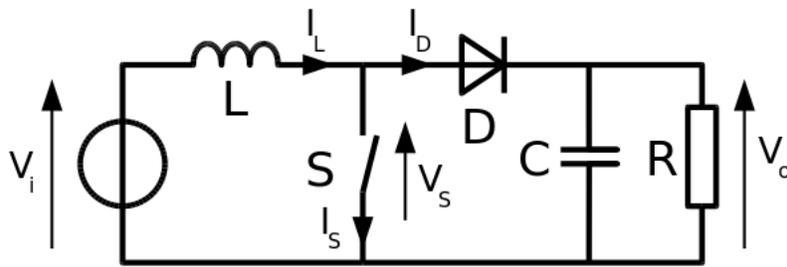
Este tipo de convertidor reductor genera un voltaje medio de salida inferior al voltaje continuo de entrada. Su funcionamiento consta de un inductor controlado por dos dispositivos semiconductores los cuales varían la conexión del inductor ya sea de la fuente de alimentación o de la carga. En la figura 10 se puede observar su configuración esquemática. El circuito está formado por un interruptor (S), un diodo (D), una bobina (L), un condensador (C) y una carga (R); obteniendo con estos componentes un nuevo valor de tensión de salida ( $V_o$ ). El primer estado de secuencia es cuando el interruptor está en estado ON en la que la bobina L posee una tensión idéntica a la de entrada y el condensador mantiene el valor de la tensión de salida. La segunda secuencia ocurre cuando el interruptor S está en estado OFF. Este estado hace que el diodo conduzca y la tensión en los terminales del inductor L sea igual que el valor de tensión a la salida [29].



**Figura 9. Configuración esquemática convertidor Buck**

### 2.6.2. Convertidor Boost

Es un convertidor elevador de voltaje que usa las características del inductor (L) y condensador (C) como elementos almacenadores de energía para elevar la corriente procedente de la fuente de alimentación para que el condensador almacene y así producir niveles de voltaje altos en sus terminales de salida. Su configuración esquemática se puede observar en la figura 11. El circuito está formado por un interruptor (S) o transistor, un diodo (D), una bobina (L), un condensador (C) y una carga (R); obteniendo con estos componentes un nuevo valor de tensión de salida ( $V_o$ ). Estos tipos de convertidores son implementados en generadores termoeléctricos donde es necesario disponer de una tensión continua regulada a la salida  $V_o$  del convertidor. Su funcionamiento puede ser dividido en dos intervalos, cuando el interruptor esta cerrado conduce el diodo se polariza inversamente aislando la etapa de salida de la entrada. La energía suministrada por la alimentación es almacenada en el inductor L. Cuando el interruptor está abierto, tanto el inductor L como la alimentación ceden energía a la etapa de salida [30].



**Figura 10. Configuración esquemática convertidor Boost.**

### 2.6.3. Convertidor Buck-Boost

El convertidor Buck-Boost, convierte una tensión de entrada en una tensión de salida negativa regulada que puede ser mayor o menor que el valor de la tensión de entrada. En la figura 12 se muestra el diagrama de circuito básico que está conformado por un interruptor (S) y un diodo (D), un inductor (L), y un capacitor (C) y la carga (RL). En el primer intervalo de tiempo sucede cuando el interruptor (S) está encendido y el diodo (D) está polarizado inversamente induciendo que se comporte como interruptor abierto. Este periodo es llamado como el “periodo de carga”, esto es porque el inductor está siendo cargado por la fuente. El siguiente intervalo de tiempo es cuando el interruptor (S) está apagado comportándose como interruptor abierto y el diodo (D) está polarizado directamente comportándose como interruptor cerrado. Este segundo periodo es conocido como el “periodo de descarga”, debido a que la energía almacenada en el inductor es transferida a la carga [31].

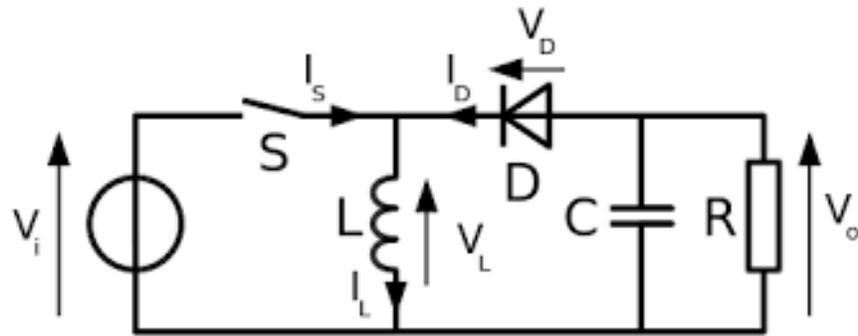
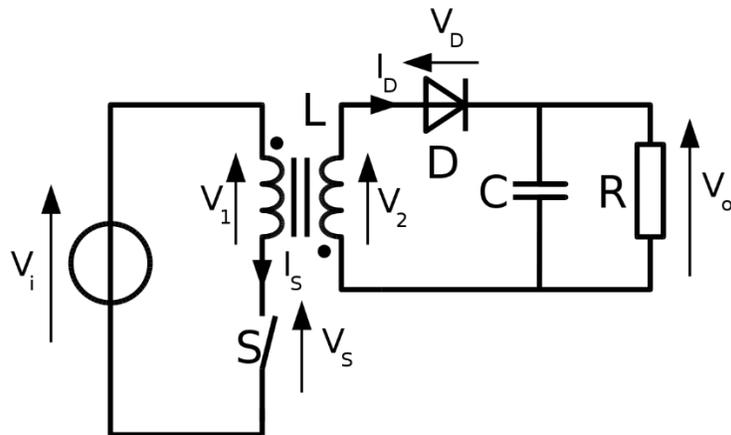


Figura 11. Configuración esquemática convertidor Buck-Boost.

#### 2.6.4. Convertidor Push-pull

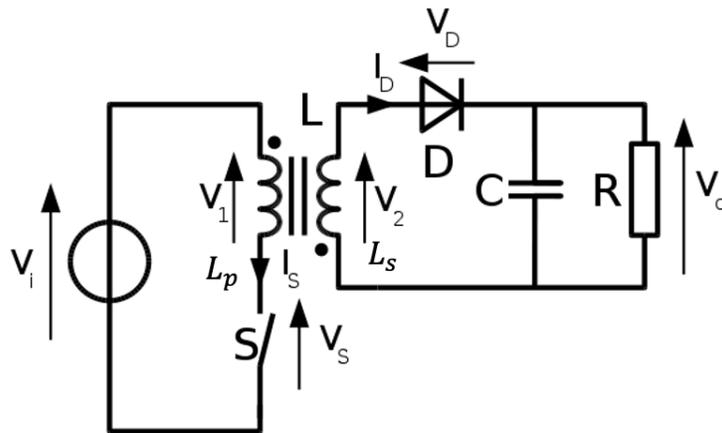
Un convertidor push-pull es un circuito convertidor que utiliza dispositivos de conmutación de tipo push y pull, que generalmente son transistores de unión bipolar (BJT), transistores de efecto de campo (FET). Este convertidor es muy común debido a la alta eficiencia, por lo general este convertidor aprovecha los transformadores del núcleo de ferrita de alta eficiencia que operan en el rango de frecuencias que permiten un control de rápida respuesta. Su configuración esquemática se puede observar en la figura 13 [32].



**Figura 12. Configuración esquemática convertidor Push-pull**

### 2.6.5. Convertidor Fly-back

El convertidor Fly-back tiene la misma estructura que el convertidor Buck-Boost con dos bobinas acopladas en lugar de una sola bobina, se suele mencionar que el transformador sirve como elemento de aislamiento pero no es así ya que el transformador no almacena la energía que maneja mientras que el elemento inductivo del retroceso almacena toda la energía en el núcleo magnético. Es por ello que este tipo de conversores se usan en aplicaciones de baja potencia. Su configuración esquemática se puede observar en la figura 14. Cuando el interruptor está activado, la bobina primaria  $L_p$  del transformador está conectada directamente a la fuente de alimentación. Esto provoca un incremento del flujo magnético en el transformador. La tensión en la segunda bobina  $L_s$  es negativa, por lo que el diodo está en inversa (bloqueado). El condensador (C) de salida es el único que proporciona energía a la carga (R). Cuando el interruptor (S) está abierto la energía almacenada en el transformador es transferida a la carga (R) y al condensador (C) de salida [33].



**Figura 13. Configuración esquemática convertidor Fly-back.**

### 2.6.6. Convertidor Cu'k

El convertidor Cu'k suministra una tensión de salida que puede ser menor, igual o superior a la tensión de alimentación con una característica especial y es que la tensión de salida es de polaridad inversa a la de entrada como se muestra en la figura 15. El funcionamiento básico del convertidor Cu'k comienza cuando el interruptor (S) se cierra, en ese instante la fuente de alimentación  $V_i$  se conecta directamente a la bobina  $L_1$  esto es causante de que el diodo quede polarizado inversamente provocando así que la corriente que pasa por la bobina  $L_1$  aumente de forma lineal. Una vez transcurrido este tiempo el interruptor (S) se abre, causando que la energía almacenada en  $L_1$  junto con la proveniente de la entrada de transfiere al condensador  $C$ . Cabe resaltar que durante el período en el que el interruptor se encuentra abierto la fuente de alimentación no suministra energía a la salida y, ya que el diodo se comporta como un cortocircuito, esto permite que por la bobina  $L_2$  circule la corriente hacia el condensador  $C_o$  y la carga R [34].

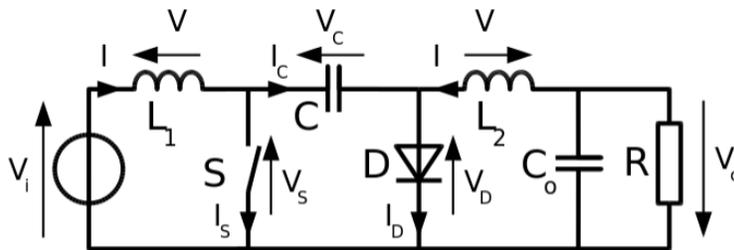


Figura 14. Configuración esquemática convertidor Cu'k.

### 2.7. Cuadro comparativo de los convertidores DC-DC

**Tabla 2. Comparación de convertidores DC-DC – Elaboración propia**

<b>Convertidor</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Boost</b>	<p>Convierte un voltaje bajo en un voltaje mas alto.</p> <p>La corriente de carga menor que la corriente de entrada.</p>	<p>Ideal para TEG con resistencia interna y voltaje de salida inestables.</p>	<p>Factor de conversión preciso y flexible.</p>	<p>Requiere de una gran inductancia para obtener una lata eficiencia.</p>
<b>Buck</b>	<p>Convierte un voltaje mas alto a un voltaje mas bajo.</p> <p>Controlado por PWM.</p>	<p>Donde se requiera un nivel de voltaje mas bajo para suministrar a la carga.</p>	<p>Factor de conversión preciso y flexible.</p>	<p>Altas fluctuaciones en el voltaje de salida.</p> <p>Mayor densidad de flujo debido al gran tamaño de la inductancia.</p>
<b>Push-pull</b>	<p>Conversión de alto nivel para alta potencia.</p> <p>Múltiples salidas debido al aislamiento del transformador.</p>	<p>Aplicaciones de alta potencia.</p>	<p>Menos propensa a causar saturación que en el convertidor Fly-back.</p> <p>Su tamaño es pequeño.</p>	<p>Son complejos.</p> <p>Los MOSFET deben ser capaces de manejar el doble de voltaje de entrada.</p>
<b>Cu'k</b>	<p>Conversión de nivel medio.</p> <p>Corriente de salida continua.</p>	<p>Apto para entornos sensibles.</p>	<p>Corrientes de entrada y salida estables.</p>	

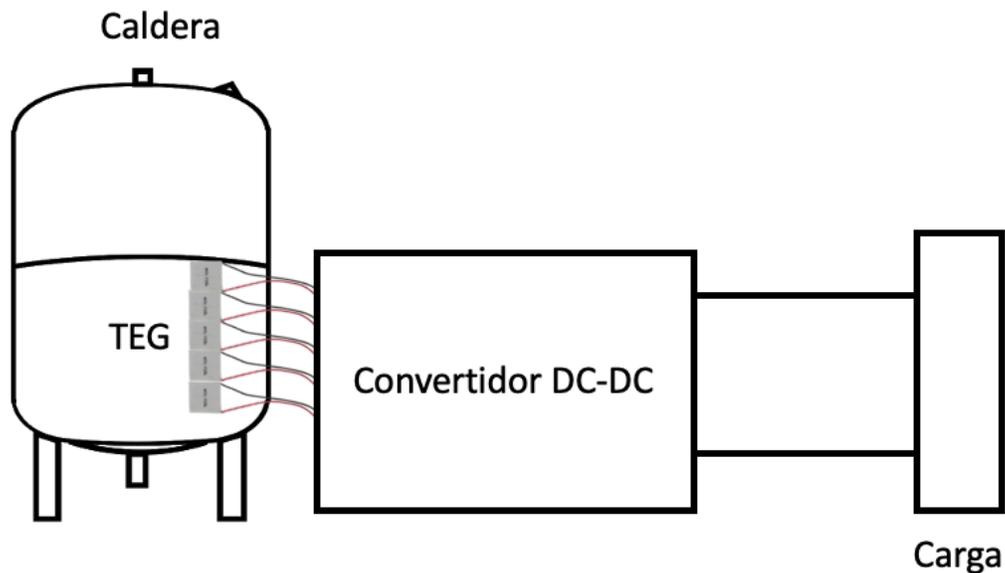
	Puede aumentar o disminuir el voltaje.		Fácil de cancelar ondulaciones. Emite menos ruido de radio frecuencia.	
<b>Buck-Boost</b>	Aumenta y disminuye el voltaje de salida. El voltaje de carga se invierte.			
<b>Fly-back</b>	Aumenta o disminuye el voltaje de salida. Utiliza un transformador. Se pueden obtener múltiples salidas. La energía de salida se almacena como energía magnética y se libera después a la carga.	Donde se requiera múltiples salidas.	No se necesita inductor por separado ya que el transformador se usa para almacenamiento. Permiten múltiple salidas.	Corrientes de pico muy altas.

Realizando la comparación de los diferentes convertidores DC-DC se requiere un convertidor elevador (Boots) que tome un voltaje DC de nivel más bajo como entrada y lo convierta en un voltaje de DC más alto. Debido a que los termoeléctricos tiene pequeños voltajes de salida y se requiere que se eleve su tensión para poder ser usada por la carga [35].

## **2.8. Acondicionamiento de potencia y mejora de eficiencia de los TEGs**

Las características de voltaje y corriente, así como la potencia de un dispositivo TEG, no son lineales y, por lo tanto, es necesario reacondicionar la salida de potencia del TEG antes de que se le proporcione a la carga (generalmente una batería de almacenamiento). Hay varios métodos que pueden aplicarse para estabilizar el voltaje y la corriente generados a partir del TEG, así como la potencia de salida, mejorando así el rendimiento de todo el sistema TEG. Consiste en utilizar la adaptación de impedancia mediante la cual permita coincidir la salida de potencia del TEG con la carga eléctrica. Al mejorar la transferencia de calor dentro del dispositivo TEG, se puede mejorar su rendimiento. El flujo de calor en el TEG se puede aumentar colocando correctamente el dispositivo sobre una superficie caliente para este caso una caldera [36].

Las calderas tienen pérdidas por radiación y convección por la armadura o coraza de la misma, estas pérdidas de calor en las calderas se les conoce como calor residual que se puede aprovechar para generar electricidad. Es por ello, que se hace uso de los termoeléctricos para aprovechar ese calor residual. Cuando se hace la implementación de los generadores termoeléctricos toman ese calor y lo convierten a bajas tensiones, posteriormente se acopla a un convertidor DC-DC para estabilizar y amplificar la señal de salida para que finalmente sea aprovechada para almacenar o conectar alguna carga [36]. En la figura 16 se observa el diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento termoeléctrico propuesto con el fin de conocer cada una de las etapas involucradas en el sistema. Sobre la coraza o armadura de la caldera se ubican los termoeléctricos, la señal de salida de los termoeléctricos se acopla al convertidor elevador (Boots) para amplificar y estabilizar la señal y posterior a ello la señal de salida se usara para la alimentar otro circuito o sistema [36].



**Figura 15. Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento TEG propuesto.**

### **2.9. Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)**

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) tiene como propósito asegurar que cualquier diferencia de temperatura, se obtenga la potencia máxima del los dispositivos termoelectricos. Los métodos MPPT se pueden dividir en dos grupos principales: el primero basado en la retroalimentación de voltaje y el segundo basado en la regulación de la potencia generada. El método basado en la retroalimentación de voltaje funciona de tal manera que se compara un voltaje de referencia predeterminado con el voltaje del módulo TEG en un circuito de retroalimentación. El segundo método se basa en regular la energía generada detectando el voltaje y la corriente del módulo TEG. Utilizando la corriente y el voltaje, se calcula la potencia TEG. En consecuencia, el ciclo de trabajo del convertidor se ajusta para que coincida con el PMP (Punto de Máxima Potencia), lo que obliga al convertidor a extraer la potencia máxima. Esto se conoce como control MPPT de ciclo de trabajo directo. El ciclo de trabajo se calcula directamente en el algoritmo MPPT. El método de control directo tiene como ventaja simplificar la

estructura de seguimiento y reduce el tiempo de cálculo, y se necesita menos esfuerzo de ajuste para la ganancia. Sin embargo, se puede utilizar un controlador proporcional-integral (PI) o de histéresis para ajustar el ciclo de trabajo del convertidor. Esto hace que el circuito de control MPPT sea complicado y se necesita mucho esfuerzo para ajustar las ganancias de PI mientras se obtienen resultados óptimos similares a los del método de control directo [37].

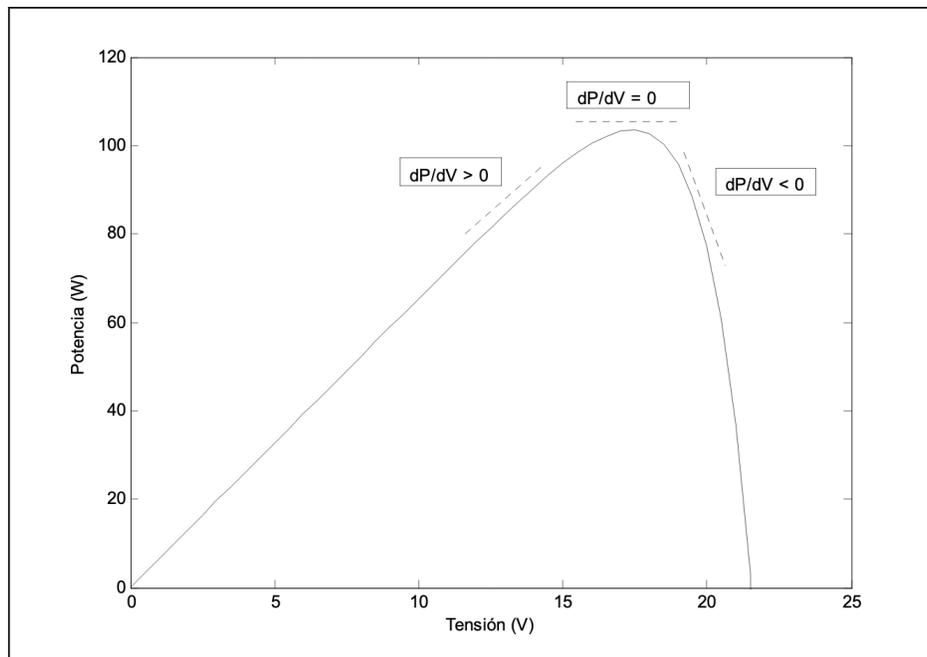
Por otra parte, el seguimiento del punto de máxima potencia implica que los generadores termoeléctricos operen siempre en la máxima relación de tensión/corriente de salida. Ahora bien, los métodos de control principales que se usan para los generadores termoeléctricos, son el método de “Perturbación y Observación” (P&O) y el método de “Conductancia Incremental” (CondInc) [37].

### **2.9.1. Perturbación y Observación P&O**

Los algoritmos de P&O son ampliamente usados por su estructura simple y las pocas variables que se precisan medir, el algoritmo opera perturbando periódicamente (incrementando o decrementando) la tensión en los terminales del termoeléctrico por medio del ciclo de trabajo del convertidor y luego comparando la potencia de salida del sistema, con la potencia del ciclo previo de perturbación. Si la potencia actual medida es mayor que la del ciclo anterior, la perturbación continuará en la misma dirección en el próximo ciclo, caso contrario la dirección de la perturbación se invertirá en el próximo ciclo. Esto significa que la tensión en los terminales del generador termoeléctrico se ve perturbada en cada ciclo a intervalos de muestreo; por lo tanto una vez alcanzado el PMP (Punto de Máxima Potencia), el algoritmo P&O oscilará alrededor de este punto resultando una pérdida de potencia del generador termoeléctrico [37].

### **2.9.2. Conductancia Incremental (CondInc)**

El algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc), el cual sigue el PMP (Punto de Máxima Potencia) del generador termoeléctrico usando un procedimiento diferente. El método se basa en el hecho de que en el PMP, la derivada de la potencia de salida del generador termoeléctrico con respecto de la tensión es cero como se puede observar en la figura 17. Así, la tensión de los generadores termoeléctricos puede ser regulados cerca a la tensión en el PMP midiendo la conductancia incremental  $dP/dV$  [37].



**Figura 16. Curva P vs V bajo seguimiento del MPP con algoritmo Conductancia Incremental.**

Una vez localizado el punto de máxima potencia (MPP), el MPPT continúa operando en este punto hasta existir algún cambio en la corriente medida. Este cambio en la medición de corriente indica que ha variado el nivel de temperatura [37].

### 3. METODOLOGÍA

La metodología, aplicada se basa en poder entender el comportamiento de operación de los termoeléctricos y simular cómo estos dispositivos por medio de calores residuales de baja temperatura generan electricidad.

La metodología está basada en cuatro pasos principales donde inicialmente se ha centrado en la documentación teórica en base de datos especializadas e investigaciones previas donde se consolidó la teoría de los efectos y composición de los generadores termoeléctricos, convertidores DC-DC y los algoritmos de máxima potencia MPPT.

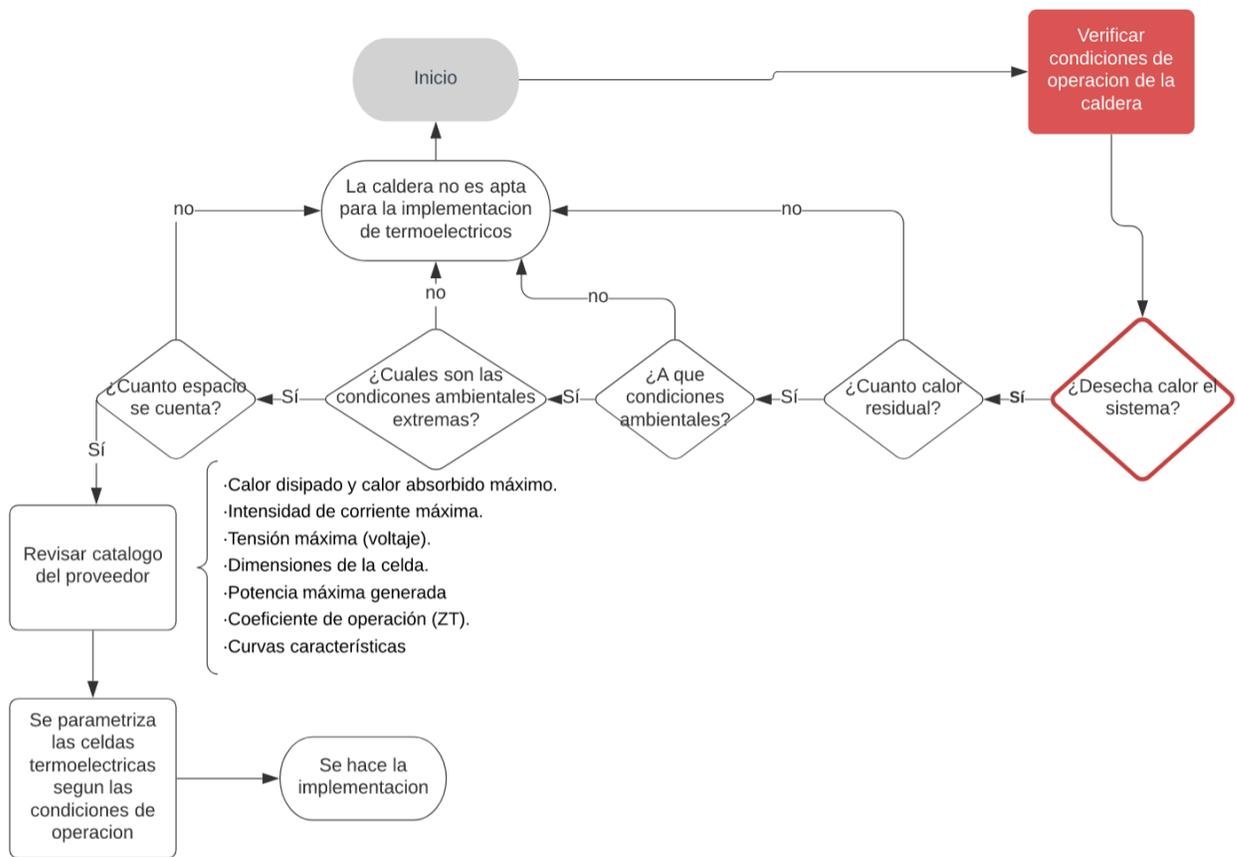
La segunda etapa se basa en la comparación de los módulos termoeléctricos comerciales, además, el uso de la aplicación Solidworks para poder caracterizar las divisiones internas, después de esto se importa el modelo termo-físico 3D a ANSYS Workbench para el análisis del comportamiento de las celdas, distribución y ubicación de los calores residuales.

El tercer paso se basa en el diseño y simulación por medio de la herramienta Ansys donde se observó el comportamiento interno de los termoeléctricos y comprobar que lo obtenido es coherente con la teoría estudiada. Finalmente, se ha buscado acercar el modelo a la realidad para realizar un análisis para validar la información obtenida.

Todo este proceso se diseña, para poder encontrar los calores residuales los cuales van desde 22°C hasta 300°C, como temperatura máxima, las cuales pueden ser recuperados y volver mas eficiente el diseño total de los sistemas termoeléctricos.

El último paso se basa en analizar el comportamiento de los termoelectricos para definir si realmente es practico y económico generar electricidad por medio de termoelectricos.

Ahora bien, para la selección del termoelectrico es necesario resolver varios interrogantes como se muestra en el diagrama de flujo.



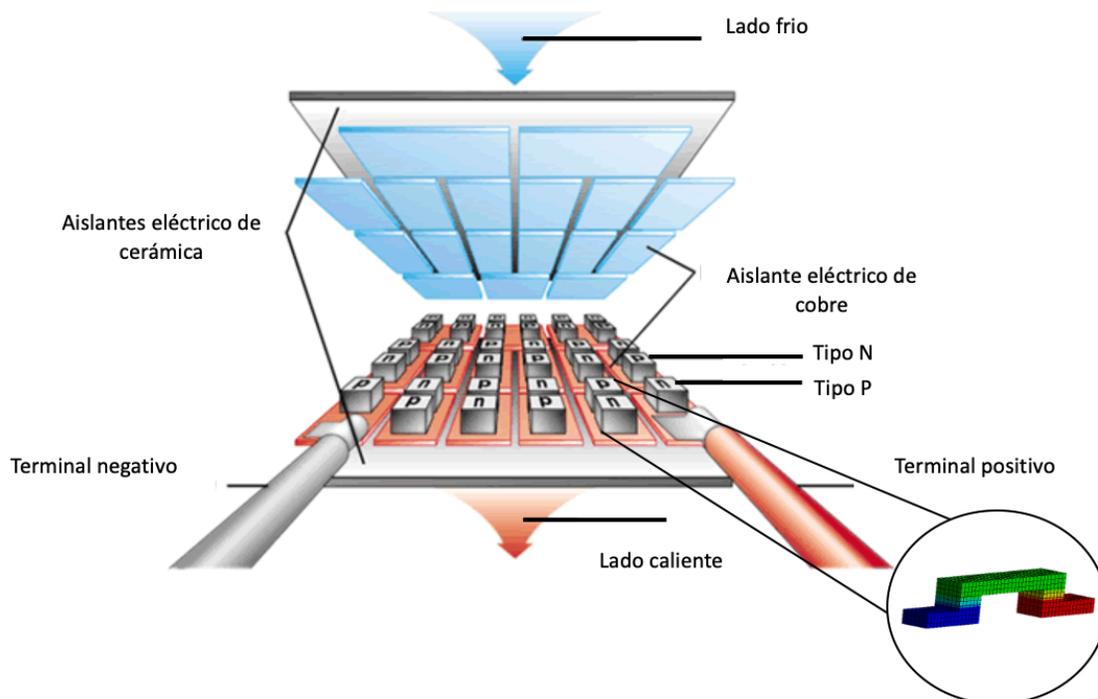
**Figura 17 Diagrama de flujo para selección de termoelectrico**

En el momento de hacer la selección de los dispositivos algunos fabricantes de celdas TEG en sus páginas web ofrecen softwares que mediante cálculos preestablecidos permiten conocer los datos anteriormente mencionados a partir del ingreso de parámetros como: Temperatura ambiente, temperatura de calentamiento, resistencia térmica en el disipador para el lado de baja temperatura, número de celdas, etc. Estos valores proporcionados por el fabricante son calculados por datos de pruebas realizadas en laboratorio. Finalmente, la selección de la celda para esta aplicación puede hacerse de dos formas: a partir de las curvas de rendimiento termoeléctrico y/o a partir del software proporcionado por el fabricante.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Estructura de una celda termoeléctrica

Una celda TEG se compone principalmente de semiconductores de tipo N y tipo P. Un número de unidades TEG normalmente se conectan en serie para formar un módulo TEG para producir la energía requerida. Es decir, es un arreglo de semiconductores suspendidos en dos aislantes eléctricos de cerámica, un lado frío (color azul) y un lado caliente (color rojo). Para la simulación se tomo un par termoeléctrico (figura encerrada) que se simulo en Ansys como se puede observar en la figura 19.



**Figura 18. Estructura de una celda termoeléctrica.**

## 4.2. Comparación de termoelectricos

Para la comparación de termoelectricos se hace una investigación de las características operativas y especificas de los termoelectricos, para ello se consulta los datasheet de cada referencia y modelos de termoelectricos usados en la industria en especifico para calderas. Para una correcta selección de un termoelectrico se requiere de una previa evaluación acerca de la aplicación que se va a dar al termoelectrico. En la tabla 3 se toman varias referencias para la comparación y selección del termoelectrico.

**Tabla 3 Comparación de termoelectricos. [38]**

<b>Modelo</b>	TG12-8	SP1848	CP85138	CP85338	GM200-71
<b>Tamaño (mm)</b>	40.7x40.1x3.5	40x40x3.4	15x15x3.8	30x30x3.8	30x30x3.5
<b>Lado caliente (°C)</b>	200	250	300	200	300
<b>Lado frio (°C)</b>	50	20	20	30	20
<b>Voltaje (V)</b>	1.5	1.6	2.1	2.8	2.2
<b>Corriente (A)</b>	0.8	0.85	1.2	2.0	2.0
<b>Potencia (W)</b>	1.2	1.3	2.52	5.6	4.4
<b>Resistencia térmica (Ohm)</b>	2.9	5.72	2.2	1.0	0.8

## 4.3. Diseño y simulación

Para el diseño y simulación se toma la referencia GM200-71 (Anexo 1), esto se hace razón de poder observar el comportamiento para identificar la viabilidad del módulo termoelectrico. Es necesario realizar el modelo en Solidworks con las divisiones las

cuales son interpretadas como materiales distintos para el desarrollo de la simulación explicados y caracterizados en las Tabla 4, 5 y 6.

Seguido de esto se importa el modelo 3D a ANSYS Workbench en el módulo termo físico, para poder ejecutar un análisis termoeléctrico con análisis en estado estacionario.

**Tabla 4 Caracterización del material tipo P. [39]**

<b>Material</b>	<b>P-type</b>		<b>N-type</b>	
<b>Ítem</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	7,85	g cm <sup>3</sup>	8,3	g cm <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	1,20E-05	°C	1,80E+05	°C
Coeficiente de calor	4,34E+06	ERG g°C	3,85E+06	ERG g°C
Conductividad térmica isotrópica	1,46E-02	cm*°C	4,01	cm*°C
Resistividad isotrópica	1,60E-05	Ωm	1.68E-8	Ωm
Coeficiente isotrópico de seebeck	-1,87E-04	V °C	-1,89E-04	V °C

**Tabla 5 Caracterización aleación de cobre**

<b>Material</b>	<b>Aleación de cobre</b>	
<b>Ítem</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	8,3	g cm <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	1,80E+05	°C
Coeficiente de calor	3,85E+06	ERG g°C
Conductividad térmica isotrópica	4,01	cm*°C

Resistividad isotrópica	1.68E-8	$\Omega\text{m}$
-------------------------	---------	------------------

En la Tabla 6 se definen los parámetros con los cuales se lleva acabo la simulación.

**Tabla 6 Parámetros de entrada para la simulación.**

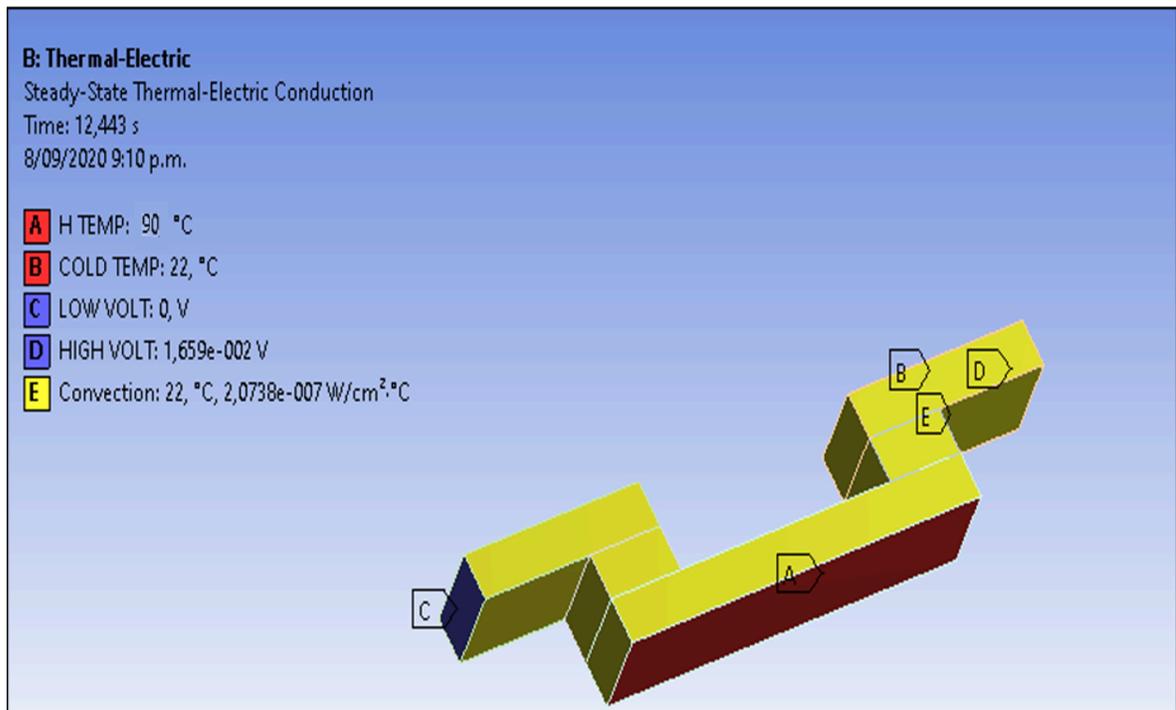
<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura alta	90	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura baja	22	$^{\circ}\text{C}$
Voltaje de referenica	0	V

### Condiciones de frontera

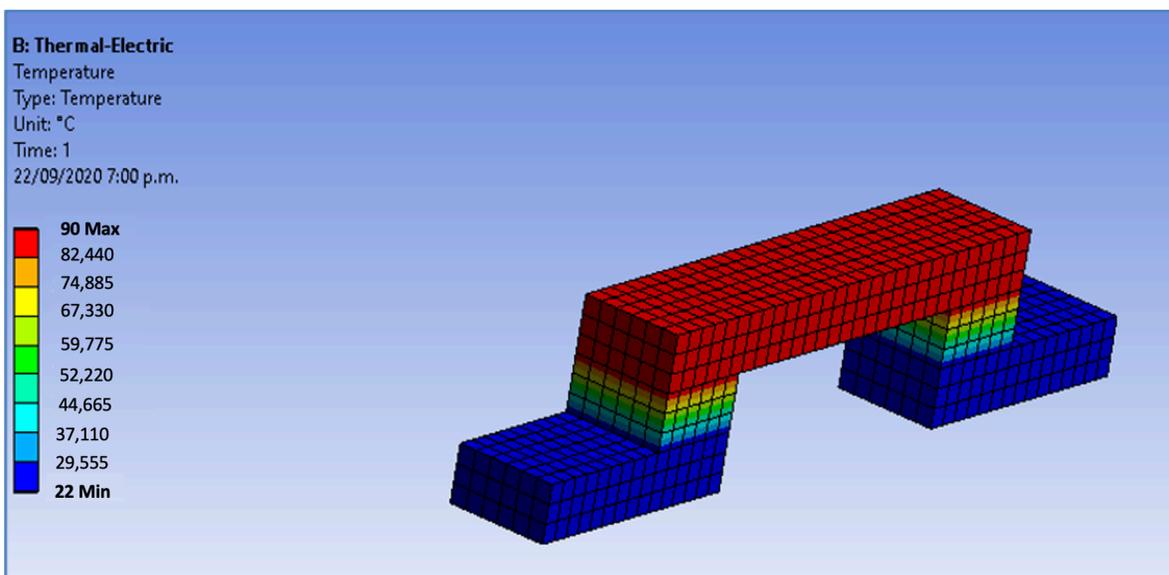
Para las condiciones de frontera se agrega una temperatura alta, una temperatura ambiente, un voltaje bajo de referencia y un complemento de convección el cual simula la transferencia de calor desde el termoelectrico hacia los alrededores. Se definen las siguientes superficies:

- H temp (A).
- Cold temp (B).
- Low volt (C).
- High volt (D).
- Convección (E).

Cada una de las anteriores debidamente ubicadas en el en la geometría como se evidencia en la figura 20.

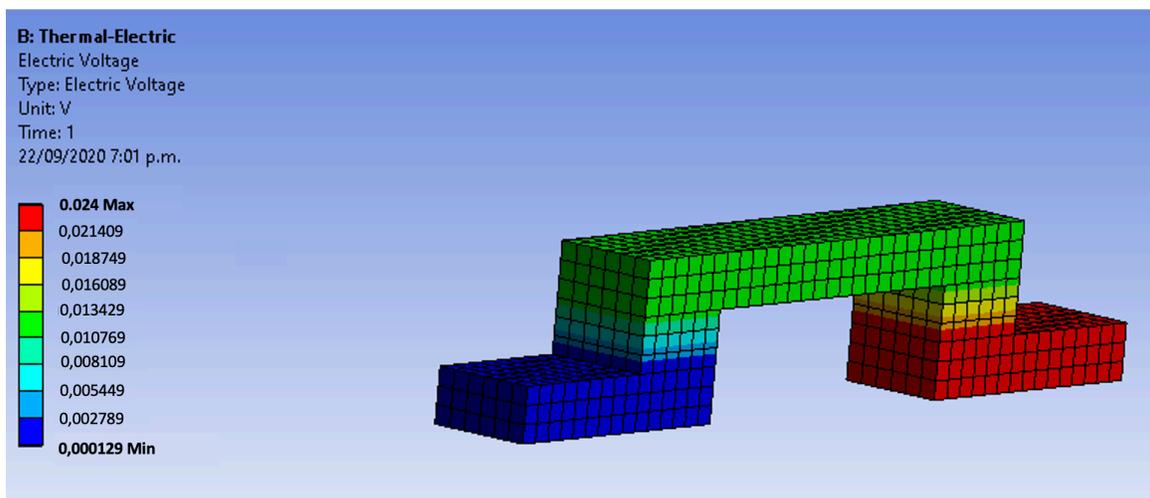


**Figura 19. Superficies en el termoelectrico.**



**Figura 20. Contorno de temperatura en el termoelectrico en estado estacionario.**

Se puede evidenciar en la figura 21 la relación de temperatura según los parámetros iniciales con una temperatura mínima o temperatura ambiente de 22°C y una temperatura máxima de 90°C. Consolidados en la tabla 7 y se puede ver el comportamiento en la figura 22 en estado estacionario de la temperatura máxima y mínima las cuales no varían con el tiempo.

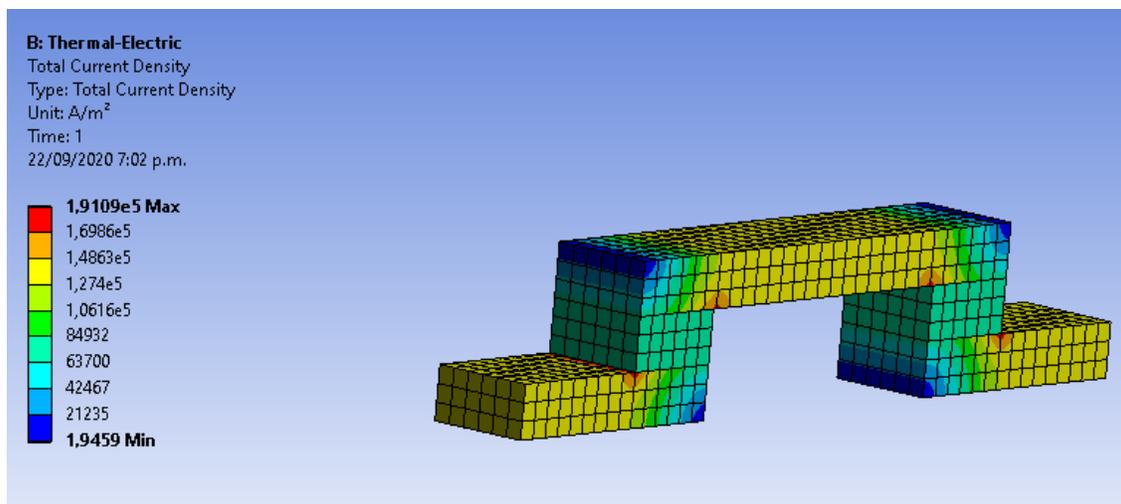


**Figura 21. Contorno de voltaje eléctrico en el termoeléctrico en estado estacionario.**

Se puede evidenciar en la figura 22 la relación de voltaje según los resultados de la simulación, con un voltaje mínimo de 0 V (referencia) y un voltaje máximo de 0,024 V como son consolidados en la tabla 7 y se pueden ver las magnitudes mínimas y máximas.

**Tabla 7 Máximo y mínimo de voltajes**

<b>Voltaje</b>		
<b>Punto</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidades</b>
Max	0,024	V
Min	0	V



**Figura 22. Contorno de densidad de la corriente en el termoelectrico.**

Se puede evidenciar en la figura 23 la relación de la densidad total de corriente que simula el software con las magnitudes consolidadas en la tabla 8.

**Tabla 8 Densidad total de corriente dentro del termoelectrico**

<b>Densidad total de corriente</b>		
<b>Punto</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidades</b>
Max	1,91E+05	A/m <sup>2</sup>
Min	1,95E+00	A/m <sup>2</sup>

Los resultados obtenidos en la simulación son netamente teóricos debido a que se está variando los parámetros iniciales del GM-200-71 para identificar si es viable el aumento y la reducción de temperatura.

Como se observa en la figura 16, el módulo TEG este compuesto de varios pares p y n conectados en serie, de esta manera, es posible estimar el voltaje total de salida que tendría la celda completa ( $V_{TEG}$ ) al multiplicar el voltaje de cada par ( $V_i$ ) por el número de pares en el módulo.

$$V_{TEG} = \#pares * V_i \quad (7)$$

$$V_{TEG} = 20 * 0.024 V = 0,48 V \quad (8)$$

El valor encontrado mediante la simulación, se encuentra muy cercano al reportado por los fabricantes en la Tabla 3.

El valor de corriente entregada por el módulo dependerá de la carga eléctrica conectada al sistema, por esta razón, para determinar el valor de la potencia eléctrica que es capaz de suministrar un modulo con 20 termopares internos se puede emplear la siguiente expresión [40]:

$$P_{TEG} = \frac{V_{TEG}^2}{4R_{TEG}} \quad (9)$$

Donde la resistencia interna de un sólo termopar se determina como la sumatoria de la resistencia eléctrica de cada uno de sus componentes, los resultados se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9 Resistencia interna de un termopar.**

RESISTENCIA ELECTRICA INTERNA DE LOS TEGS								
Material	Numero de componentes	Resistividad [ $\Omega m$ ]	Altura [m]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Area [ $m^2$ ]	Resistencia electrica del material [ $\Omega$ ]	Resistencia interna electrica total [ $\Omega$ ]
Tipo N	1	1.440E-05	0.0012	0.0015	0.0015	2.25E-06	7.6800E-03	
Tipo P	1	1.600E-05	0.0012	0.0015	0.0015	2.25E-06	8.5333E-03	
Cobre (grande)	1	1.680E-08	0.0003	0.0015	0.0035	5.25E-06	9.6000E-07	1.6218E-02
Cobre (pequeño)	2	1.680E-08	0.0003	0.0015	0.00175	2.63E-06	3.8400E-06	

Para calcular la resistencia interna completa del módulo, se multiplica la resistencia interna del termopar por el numero total de pares en el arreglo, que para este caso corresponde a 20.

$$R_{TEG} = \#pares * R_{int}$$

$$R_{TEG} = 20 * 1.6218 \times 10^{-2} \Omega$$

$$R_{TEG} = 0.324 \Omega$$

Al remplazar el valor de  $R_{TEG}$  en la Ecuación 9 de potencia de la TEG se encuentra:

$$P_{TEG} = \frac{0.48^2}{4 * 0.324} W$$

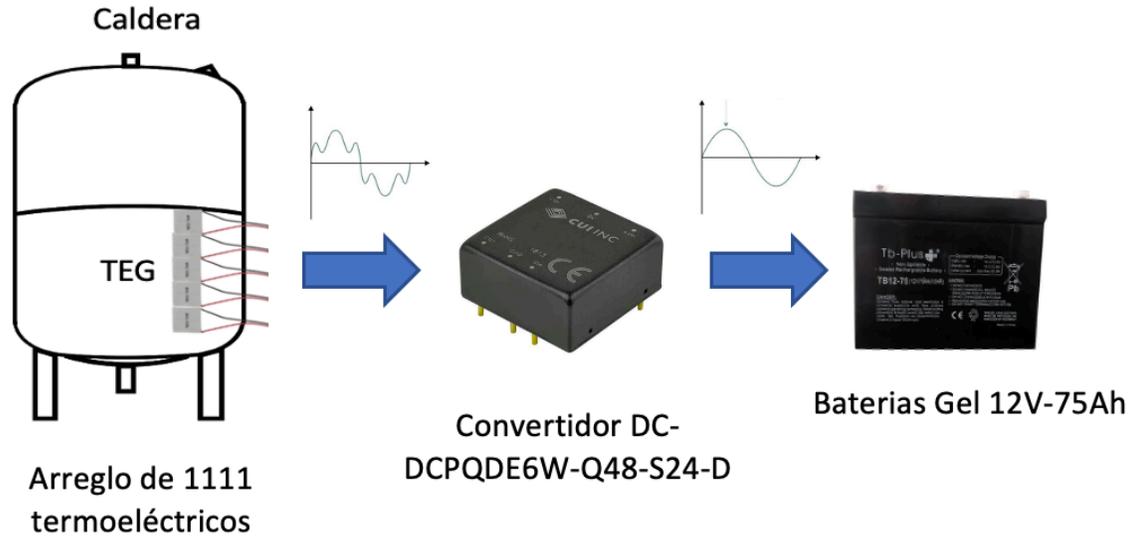
$$P_{TEG} = 0.177 W$$

Estos valores obtenidos de voltaje de 0.48V y 0.177W comparados con los valores reportados en la Tabla 3 dan en el mismo orden de magnitud siendo coherente con la información suministrada por el fabricante, la cual se asume ha sido comprobada experimentalmente.

Una de las razones por las que el resultado de la simulación es diferente a la ficha técnica del fabricante, es porque en la simulación se asumen propiedades de materiales constantes, y en la ficha del fabricante si se tienen en cuenta experimentalmente, esto debido a que el fabricante no suministra dichos materiales por lo que se obtienen estas propiedades de otras fuentes.

De esta manera, si se realizara un arreglo de celdas termoeléctricas sobre una superficie caliente de 1 m<sup>2</sup> a 90°C y con una temperatura ambiente de 20°C, y considerando que el área que ocupa cada TEG es de 9.04E-4 m<sup>2</sup> (30x30 mm<sup>2</sup>) sería posible instalar una cantidad total de 1111 celdas TEG, con una energía total extraída aproximada de 1.1 kW en DC.

Es necesario aclarar, que esta extracción máxima sólo sería posible si cada una de las celdas operara en su punto de máxima potencia, es decir, sería necesario que cada celda tuviera su propio sistema de convertidor DC-DC acomplado con el algoritmo MPPT correspondiente.



**Figura 23 Diagrama final del sistema termoeléctrico**

Como se puede observar en la figura 24 se presenta el diagrama final de implementación del sistema termoeléctrico desde la instalación de los termoeléctricos donde la señal es recibida por el convertidor DC-DC para estabilizar, amplificar y optimizar la señal para obtener su máxima potencia. Posterior a ello la electricidad generada es almacenada en baterías.

Ahora bien, es importante conocer los costos para la implementación para poder definir si realmente es factible o no hacer la implementación.

**Tabla 10 Costo de sistema de generación termoeléctrica**

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
1111	Termoeléctrico efecto Seebeck GM200-71 [41]	USD37.4	USD41,551.4
350	Convertidor DC-DC PQDE6W-	USD12.21	USD362.21

	Q48-S24-D [42]		
3	Baterías Gel 12V-75Ah	USD173.3	USD404.36
	Accesorios: (Consumibles electrónicos, cables, etc)	USD300	USD300
Total			USD42,617.97

Como se puede observa en la tabla 10 el costo del sistema seria de USD42,617.97 para generar y almacenar 1.1 kW, para determinar el precio de la energía producida por los termoeléctricos y compararlo al precio del mercado actual se hizo un análisis donde se asume que en una fabrica la caldera funciona 24 horas al día, 350 días del año, con lo cual se determinó que en un año el sistema de termoeléctricos produce 9240kWh, tomando como vida útil de los TEG 10 años se puede estimar que la energía producida sería 92400kWh y el costo sería de 0.46 USD/kWh.

Si se compara con el precio de venta de energía como se cotiza en Empresas Públicas de Medellín para el mes de Noviembre de 2020, para el sector industrial y comercial se presenta un precio de venta de 625.49 COP/kWh lo que equivale a 0.18 USD/kWh [43]. En este orden de idea, hay una diferencia de 0.28 USD/kWh lo que se podría decir que la generación de electricidad por medio de termoeléctricos es más elevada.

En un retorno de inversión simple se necesitan 25.6 años para recuperar la inversión, pero teniendo en cuenta que la vida útil de los termoeléctricos va de 10 a 15 años el sistema no seria rentable en este momento.

## 5. CONCLUSIONES

- Con respaldo de los resultados obtenidos en la simulación por medio del software ANSYS podemos afirmar que la temperatura y la corriente fluyen de manera gradual en todo el elemento 3D, el comportamiento se evidencia en estado estacionario, teniendo que la temperatura más baja es de 22°C y la más alta de 90°C.
- La simulación constituye una herramienta de ayuda, para los posteriores estudios, diseño y construcción de sistemas de generación termoeléctrica,
- Se recomienda para futuros trabajos incluir un análisis de sensibilidad para diferentes deltas de temperatura con el fin de obtener una aproximación más real del comportamiento de la celda en el entorno industrial.
- Es importante la implementación de convertidores DC-DC ya que ellos permiten la estabilidad y la potencia de extracción máxima del elemento, en este caso un convertidor Boost que permiten incrementar el voltaje de salida del termoeléctrico.
- Aunque de manera preliminar no parece atractivo el sistema en factores financieros, es necesario hacer un análisis detallado de flujo de caja, amortizaciones, impuestos, beneficios tributarios, créditos verdes para proyectos de eficiencia energética, entre otros factores; para determinar si el sistema puede llegar a convertirse en una opción viable para generar energía a partir de estos calores residuales que se están perdiendo en la actualidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Patil y D. R. Araerimath, «A Review of Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery From Engine Exhaust,» *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering* , 2013.
- [2] N. Jimeno y M. Laso, «Estructura y Propiedades de los Materiales no Metalicos.,» *Tres Cantos y Xabia* , 2016.
- [3] S. Kjelstrup y O. Bruheim, «The Seebeck coefficient and the Peltier effect in a polymer electrolyte membrane cell with two hydrogen electrodes,» *ELSEVIER*, vol. 99, pp. 166-175, 2013.
- [4] N. Ari y A. Kribus, «Impact of the Peltier effect on concentrating photovoltaic cells,» *ELSEVIER*, nº 94, pp. 2446-2450, 2020.
- [5] D. M. Rowe, «Thermoelectrics Handbook: Macro to nano,» Taylor & Francis Group, 2006.
- [6] L. Zheng y H. Kang, «Theoretical analysis of natural evaporative cooling to enhance the efficiency of thermoelectric devices,» nº 143, 2019.
- [7] D. Enescu, «Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications,» IntechOpen, 2017.
- [8] D. Enescu, «Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications,» IntechOpen, 2019.
- [9] H. Lee, «The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers,» *ELSEVIER*, Michigan, 2013.
- [10] C. Gayner y K. Kamal, «Recent advances in thermoelectric materials,» *ELSEVIER*, 2016.

- [11] S. Twaha, J. Zhu, Y. Yan y B. Li, «A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement,» ELSEVIER, 2015.
- [12] S. Twaha, J. Zhu, Y. Yan, B. Li y K. Huang, «Energy for Sustainable Development,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 37, nº 12, pp. 86-98, 2017.
- [13] T. Zhang, «Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Temperature Variation in a Thermolement,» The Minerals, Metals and Materials Society, 2015.
- [14] X. Liu, C. Li, D. Y y C. Q. Su, «An energy-harvesting system using thermoelectric power generation for automotive application,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 510-516, 2015.
- [15] M. Loster, «Total Primary Energy Supply — From Sunlight,» 2010. [En línea]. Available: [http://www.ez2c.de/ml/solar\\_land\\_area/](http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/).
- [16] «MaquiClick,» [En línea]. Available: <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/calderas-industriales-funcionan/>.
- [17] «Empresa Conectada,» [En línea]. Available: <http://empresaconectada.com/calderas-mas-eficientes-una-industria-vez-mas-competitiva/>. [Último acceso: 2020].
- [18] O. Bailey y E. Worrell, Clean energy technologies: a preliminary inventory of the potential for electricity generation, 2005.
- [21] T. Engin y V. Ari, «Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems: a case study,» *Energy Conversion and Management*, 2005.
- [22] E. Chammas y D. Clodic, «Combined cycle for hybrid vehicles,» SAE, 2005.

- [23] B. Peris, «Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry,» *Energy*, 2015.
- [24] K. Karthick y R. Dhanuskodi, «Experimental investigation of solar reversible power generation in Thermoelectric Generator (TEG) using thermal energy storage,» *ELSEVIER*, nº 48, pp. 107-114, 2019.
- [25] C. R. Flores, «Análisis de un convertidor DC-DCC destinado al almacenamiento híbrido de energía,» 2017. [En línea]. Available: [http://oa.upm.es/48060/1/TFG\\_CRISTINA\\_RAMOS\\_FLORES.pdf](http://oa.upm.es/48060/1/TFG_CRISTINA_RAMOS_FLORES.pdf). [Último acceso: 20 Septiembre 2020].
- [26] L. Anatyckuk y O. Luste, «Generalized thermoelectric Thomson relations,» *IEEE*, pp. 491-492, 2003.
- [27] J. Han y X. Gong, «Influence of trigonal deformation on band structure and Seebeck coefficient of tellurium,» *ELSEVIER*, nº 135, 2019.
- [28] I. E. Vargas, «Control de un convertidor CD-CD tipo buckpor medio del microcontrolador ATMEGA328,» *Culcyt Sistemas*, vol. 2, nº 55, pp. 226-237, 2018.
- [29] Y. Yang y W. He, «Simulation study on regenerative thermoelectric generators for dynamic waste heat recovery,» *ELSEVIER*, nº 158, pp. 571-576, 2019.
- [30] F. Valderrama , H. Moreno y H. Vega, «Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc-dc tipo boost,» *Ingenium*, vol. 2, nº 24, pp. 44-55, 2011.
- [31] M. Pantaleo, «Fuentes comutadas,» *Servier*, vol. 2, nº 12, pp. 12-34, 2007.
- [32] Y. Apertet y C. Goupil, «On the fundamental aspect of the first Kelvin's relation in thermoelectricity,» *ELSEVIER*, nº 104, pp. 225-227, 2016.

- [33] O. Nouredine y h. Hoummada, «Seebeck coefficient in multiphase thin films,» *ELSEVIER*, nº 226, 2020.
- [34] E. Kanimba y Z. Tian, «Modeling of a Thermoelectric Generator Device,» IntechOpen, Virginia, 2017.
- [35] J. Y. Jang y Y. C. Tsai, «Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system,» *Applied Thermal Engineering* , 2012.
- [36] F. Altintas, «Comparison of the coupled quantum Carnot and Otto cycles,» *ELSEVIER*, nº 523, pp. 40-47, 2019.
- [37] A. Kyaw y J. Xu, «Effective ionic Seebeck component suppression in mixed ion-electron conductor via chemical treatment,» *ELSEVIER*, nº 69, pp. 7-12, 2019.
- [38] E-labshop, «Celdas termoelectricas,» [En línea]. Available: <https://e-labshop.com/shop/componentes-electronicos/celdas-peltier-componentes-electronicos/celda-peltier-seebeck-sp1848/>.
- [39] RS Online, «RS Online,» RS Online, 2017. [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/modulos-peltier/6937030/>. [Último acceso: 25 Septiembre 2020].
- [40] M. Thielen, L. Sigrist, M. Magno, C. Hierold y L. Benini, «Human body heat for powering wearable devices: From thermal energy to application,» *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [41] RS Online, RS Online, [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/modulos-peltier/6937030/>.

[42] Mouser, «Convertidor DC DC,» Mouser, [En línea]. Available: <https://co.mouser.com/ProductDetail/CUI-Inc/PQDE6W-Q48-S24-D?qs=fAHHVMwC%252BbiNWgpDr%2F%3D%3D>.

[43] EPM, «Empresas Públicas de Medellín,» 11 2020. [En línea]. Available: [https://www.epm.com.co/site/clientes\\_usuarios/clientes-y-usuarios/hogares-y-personas/energia/tarifas](https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/hogares-y-personas/energia/tarifas).