



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EXPLORACIÓN DE ALEACIONES METÁLICAS PARA GENERAR VOLTAJE CON EL
EFECTO SEEBECK EN BIODISPOSITIVOS**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:
INGENIERO EN BIOMÉDICA**

PRESENTADO POR:

21941266

WALTER JOSUÉ RIVERA GODÍNEZ

ASESOR METODOLÓGICO: MANUEL ADALID GAMERO

CAMPUS: SAN PEDRO SULA, ABRIL, 2024

DEDICATORIA

Primero, deseo expresar mi profunda gratitud hacia Dios, quien ha sido mi guía constante desde el inicio de mi trayectoria universitaria. Su sabiduría y fortaleza me han permitido superar cada obstáculo en este camino. También quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional. Mi padre me enseñó la importancia de la preparación y la humildad, mientras que mi madre, a quien admiro enormemente, me mostró que el éxito se logra con determinación y valentía. Además, dedico este logro a mi tía Maritza Godínez, cuyo amor y apoyo han sido invaluable en mi vida universitaria, al igual que mi abuela Ilse, cuyo constante respaldo ha sido fundamental para mí.

Agradezco también a mis amigos y compañeros de universidad, en especial a María Carballo y Eduardo Díaz, quienes me han brindado su apoyo y conocimientos de manera incondicional. A Isis Martínez, Claudia Villalobos, Pedro García, Carlos Redondo y a mi gran amiga Grecia Casco, les agradezco por su amistad y por haber dejado una huella imborrable en mi experiencia universitaria.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que se involucraron en mi proceso de investigación para esta tesis. Este trabajo es el resultado de mi esfuerzo y dedicación, así como de la confianza que han depositado en mí y en mis capacidades.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía constante y mi compañero fiel durante todo este proceso universitario. También estoy enormemente agradecido con mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar y por creer en mí desde el principio. Asimismo, agradezco a toda mi familia por su incondicional apoyo a lo largo de estos cuatro años.

No puedo dejar de mencionar la gratitud que siento hacia cada uno de mis amigos, cuya amistad ha sido un pilar fundamental durante mi tiempo en la universidad.

Además, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todos los profesores que me impartieron clases. Gracias por compartir su vasto conocimiento, por sus valiosos consejos y por las correcciones que me ayudaron a mejorar y crecer académicamente.

Un agradecimiento especial merece la ingeniera Stephany, cuyo apoyo y orientación fueron fundamentales en el proceso de elaboración de mi tesis. Sus consejos y palabras de aliento fueron un impulso invaluable para mí.

Quiero también reconocer el invaluable apoyo de mi asesor, Manuel Adalid Gamero. Gracias por creer en mí y por brindarme orientación y consejos durante todo el desarrollo de mi proyecto de tesis. Aprecio enormemente su confianza en mí y su disposición para enfrentar los desafíos que se presentaron en el camino.

Por último, quiero expresar mi gratitud hacia la jefa de la carrera, Ing. Reyna Valle, por su dedicación en la selección de los mejores docentes y por su compromiso con la formación académica de los estudiantes de nuestra carrera universitaria.

RESUMEN EJECUTIVO

La dependencia de dispositivos biomédicos portátiles en fuentes de energía convencionales, como baterías químicas, presenta varios desafíos relacionados con la sostenibilidad, durabilidad y limitaciones ambientales. Estas baterías suelen tener una vida útil limitada, requieren recargas frecuentes o reemplazos, y contienen materiales potencialmente peligrosos que pueden causar daños ambientales al final de su ciclo de vida. Adicionalmente, la creciente demanda de dispositivos biomédicos portátiles, como marcapasos, monitores de glucosa y otros sensores de salud, impulsa la necesidad de desarrollar fuentes de energía más eficientes, duraderas y ambientalmente amigables. Este estudio aborda estos desafíos al investigar las propiedades termoeléctricas de las aleaciones metálicas como Cromel-Alumel, Hierro-Constantan y Cromel-Constantan, con el objetivo de aumentar su eficiencia y aplicabilidad en la generación de energía para dispositivos biomédicos portátiles. Se empleó una rigurosa metodología experimental para evaluar las características termoeléctricas de las aleaciones seleccionadas. La evaluación consistió en comparar su rendimiento a la hora de convertir las diferencias térmicas en tensión eléctrica en diversas condiciones térmicas. Los resultados destacan la aleación Chromel-Constantan por su sensibilidad y eficiencia superiores, lo que indica su potencial como material óptimo para alimentar dispositivos biomédicos que aprovechan el calor del cuerpo humano. Aunque el estudio confirma lo prometedor de estos materiales en aplicaciones termoeléctricas, también descubre retos en la consistencia y estabilidad de la generación de voltaje, lo que subraya la necesidad de seguir investigando para refinar las propiedades de las aleaciones y el diseño de los dispositivos. La investigación futura debería centrarse en optimizar las propiedades de las aleaciones y los diseños de los dispositivos para mejorar el rendimiento y la estabilidad termoeléctrica. Este trabajo contribuye significativamente a la búsqueda de soluciones energéticas autónomas y sostenibles, subrayando la necesidad de innovación en el diseño de dispositivos termoeléctricos aplicables en tecnología vestible y biomédica. Los hallazgos abren nuevas vías para el desarrollo de tecnologías que promuevan la sostenibilidad ambiental y la independencia energética en dispositivos electrónicos portátiles.

Palabras clave: aleaciones, efecto Seebeck, energía corporal, termoelectricidad.

ABSTRACT

The reliance of wearable biomedical devices on conventional energy sources, such as chemical batteries, presents several challenges related to sustainability, durability, and environmental limitations. These batteries typically have a limited lifespan, require frequent recharging or replacement, and contain potentially hazardous materials that can cause environmental damage at the end of their life cycle. Additionally, the growing demand for wearable biomedical devices, such as pacemakers, glucose monitors and other health sensors, drives the need to develop more efficient, long-lasting and environmentally friendly energy sources. This study addresses these challenges by investigating the thermoelectric properties of metal alloys such as Cromel-Alumel, Iron-Constantan and Cromel-Constantan, with the aim of increasing their efficiency and applicability in power generation for wearable biomedical devices. A rigorous experimental methodology was used to evaluate the thermoelectric characteristics of the selected alloys. The evaluation consisted of comparing their performance in converting thermal differences into electrical voltage under various thermal conditions. The results highlight the Chromel-Constantan alloy for its superior sensitivity and efficiency, indicating its potential as an optimal material to power biomedical devices that harness the heat of the human body. Although the study confirms the promise of these materials in thermoelectric applications, it also uncovers challenges. on the consistency and stability of voltage generation, underscoring the need for further research to refine alloy properties and device design. Future research should focus on optimizing alloy properties and device designs to improve thermoelectric performance and stability. This work contributes significantly to the search for autonomous and sustainable energy solutions, underlining the need for innovation in the design of thermoelectric devices applicable in wearable and biomedical technology. The findings open new avenues for the development of technologies that promote environmental sustainability and energy independence in portable electronic devices.

Keywords: alloys, body energy, Seebeck effect, thermoelectricity.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	ESTADO DEL ARTE	3
2.1.	ANTECEDENTES	3
2.2.	PROBLEMÁTICA	25
2.3.	IMAGEN INTEGRADORA	26
2.4.	TABLA DE LIMITACIONES	27
III.	OBJETIVOS	32
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	32
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
IV.	MÉTODOS	33
4.1.	ENFOQUE	33
4.1.1.	MODELO EXPERIMENTAL	34
4.2.	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	35
4.2.1.	VARIABLES DEPENDIENTES	35
4.2.2.	VARIABLE INDEPENDIENTE:	35
4.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	37
4.4.	OBJETIVO DEL MÉTODO.....	39
4.5.	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	40
4.6.	IMAGEN DEL PROCESO.....	41
4.7.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	42
4.8.	MATERIALES UTILIZADOS.....	42
4.7.	MÉTRICAS DE EVALUACIÓN / VALIDACIÓN.....	44
V.	RESULTADOS	45
5.1.	ESPECIFICACIONES DEL PROTOTIPO:	45
5.2.	FÓRMULA VOLTAJE GENERADO POR EFECTO SEEBECK.....	47
5.3.	CROMEL – ALUMEL	47
5.4.	HIERRO – CONSTANTAN	52
5.1.	CROMEL – CONSTANTAN	56
VI.	DISCUSIÓN	64

VII. CONCLUSIONES.....	66
VIII. RECOMENDACIONES	68
IX. REFERENCIAS.....	69
X. ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de Variables	36
Ilustración 2. Imagen de proceso.....	41
Ilustración 3. Aleación 1, voltaje medido.....	51
Ilustración 4. Aleación 1, voltaje amplificado	52
Ilustración 5. Aleación 2, voltaje medido.....	56
Ilustración 6. Aleación 2, voltaje amplificado	56
Ilustración 7. Aleación 3, voltaje medido.....	60
Ilustración 8. Aleación 3, voltaje amplificado.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limitaciones	27
Tabla 2. Metodología planteada.....	34
Tabla 3. Operacionalización de variables	37
Tabla 4. Objetivo del Método.....	39
Tabla 5. Mediciones teóricas Aleación 1.....	48
Tabla 6. Mediciones Aleación 1	50
Tabla 7. Mediciones teóricas Aleación 2.....	53
Tabla 8. Aleación 2, Voltaje medido	54
Tabla 9. Mediciones teóricas Aleación 3.	57
Tabla 10. Aleación 2, Voltaje medido.....	58

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Simulaciones realizadas en multisim (amplificación de voltaje).....	74
Anexo 2. Circuito Completo.....	75
Anexo 3. Voltaje Amplificado	75

I. INTRODUCCIÓN

La termoelectricidad, una disciplina que yuxtapone la termodinámica con la electricidad, se basa en fenómenos relacionados con el calor y la electricidad. Uno de los fenómenos más destacados ocurre cuando se aplica calor a una unión de dos materiales diferentes, conocida como termopar. Si la temperatura de una unión es diferente de la otra, se crea una diferencia de voltaje, permitiendo que la corriente fluya entre las uniones frías y calientes. Este fenómeno, conocido como el efecto Seebeck, fue observado por primera vez por los físicos en 1821.

En este contexto, este estudio se sumerge en el análisis y simulación de un sistema de generación termoeléctrica, orientado a aprovechar calores corporales de baja temperatura. En un mundo enfrentando desafíos energéticos cruciales, este trabajo se propone contribuir a la bibliografía existente y a través de la experimentación recabar datos de precisión que posteriormente permitan brindar solución al problema de la conversión del calor a la generación de energía. Los sistemas termoeléctricos, ofrecen una vía directa para convertir la energía térmica en energía eléctrica, utilizando el calor residual como fuente de calentamiento.

El desarrollo de esta investigación sigue una estructura meticulosa. En una primera fase, se profundiza en la teoría subyacente a los efectos y composición de los generadores termoeléctricos, así como en los convertidores DC-DC y algoritmos de máxima potencia. La segunda etapa implica una comparación minuciosa de los módulos termoeléctricos disponibles comercialmente. La tercera fase, esencial en esta indagación, involucra el diseño y simulación detallada a través de la herramienta multímetro, permitiendo una observación detallada del comportamiento interno de los dispositivos termoeléctricos en condiciones simuladas.

El documento se estructura en nueve capítulos, centrándose en la exploración del potencial del efecto Seebeck para convertir la energía térmica del calor corporal humano en una fuente de alimentación eléctrica sostenible. En el Capítulo I contiene la Introducción, en él se establece el contexto y los objetivos de la investigación, en el Capítulo II se estructura el Estado del Arte revisando la literatura existente y los trabajos previos, analizando las tecnologías relacionadas y las limitaciones encontradas en investigaciones anteriores, El Capítulo III describe las Metodologías Aplicadas sus técnicas experimentales y los dispositivos utilizados, con un

enfoque especial en la aplicación del efecto Seebeck, el Capítulo IV menciona los Objetivos del Proyecto, se establecen metas específicas relacionadas con la implementación del efecto Seebeck en la conversión de la energía térmica del cuerpo humano, el Capítulo V muestra los Resultados y Análisis, presentando los datos obtenidos y se realiza un análisis detallado de los resultados, los Capítulos VI y VII contienen las Conclusiones y Recomendaciones, discutiendo las implicaciones de los hallazgos y proporcionando recomendaciones para investigaciones futuras. Finalmente, los Capítulos VIII y IX exploran la Aplicabilidad práctica del sistema desarrollado y contienen los Agradecimientos y Referencias utilizadas en la investigación. Estos capítulos estructuran la investigación de manera coherente y lógica, guiando al lector a través del proceso de exploración y análisis del efecto Seebeck para la conversión de energía térmica del cuerpo humano en energía eléctrica sostenible.

II. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se enumeran y analizan detalladamente diversas investigaciones centradas en el proceso de transformación de energía calórica, conocido como el efecto Seebeck. Para cada uno de los estudios anteriores, se destaca información relevante como los objetivos, las contribuciones de cada estudio, la metodología empleada y las limitaciones encontradas. Además, para proporcionar un contexto más amplio, se aborda la problemática desde una perspectiva integral, señalando las principales limitaciones o desafíos relacionados, los cuales están resumidos en una sola tabla. Para condensar eficazmente toda esta información, se ha creado una imagen integradora que ilustra la importancia de la investigación en este campo.

2.1. ANTECEDENTES

Richard Inocencio Smith y Matthew L. Johnston et al. (2021) «***Analysis of Skin-Worn Thermoelectric Generators for Body Heat Energy Harvesting to Power Wearable Devices***». El propósito primordial de esta investigación radicó en la evaluación de la factibilidad de emplear generadores termoeléctricos (TEG) implantados en la piel con el propósito de capturar la energía derivada del calor corporal, con el objetivo a largo plazo de lograr una operación continua sin requerir recargas o sustituciones de baterías para la alimentación de dispositivos portátiles

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: El desarrollo de esta investigación involucró la utilización de un dispositivo portátil equipado con un generador termoeléctrico (TEG) implantado en el brazo de los participantes. La medición continua del voltaje, la potencia y la energía generada a partir del calor corporal fue realizada. Para maximizar la transferencia de potencia, se emplearon cargas resistivas experimentales. La adquisición de datos se efectuó mediante la utilización de instrumentos que incluyeron amplificadores, convertidores de potencia y sistemas de registro de datos.

Los principales aportes de esta investigación fueron los siguientes:

- La evidencia de la capacidad de generación de energía continua de los TEG implantados en la piel, con una potencia continua promedio entregado de 22.9 μW en tres participantes, lo que se traduce en una densidad de potencia de 1.43 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

- La demostración de que la diferencia inicial de temperatura entre el **TEG** y la piel es suficiente para proporcionar la salida de voltaje requerida para activar los convertidores de potencia.
- La provisión de datos empíricos referentes a la potencia y el voltaje de salida disponibles de manera continua de los TEG utilizados en un entorno de uso corporal, lo cual respalda la viabilidad de la alimentación de dispositivos portátiles desprovistos de batería mediante la recolección de energía proveniente del calor corporal.

Conclusiones: Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que los generadores termoeléctricos (TEG) implantados en la piel son capaces de generar una densidad de potencia y un voltaje de salida suficientes para la alimentación de dispositivos portátiles sin batería. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de dispositivos portátiles autónomos en términos energéticos y autosuficientes, alimentados mediante la explotación de la energía generada por el calor corporal humano.

Soumya Bose, Tejasvi Anand y Matthew L. Johnston et al, (2021) «**A 3.5-mV Input Single-Inductor Self-Starting Boost Converter With Loss-Aware MPPT for Efficient Autonomous Body-Heat Energy Harvesting**». El objetivo general de esta investigación fue desarrollar un convertidor de impulso autónomo de arranque automático con una única bobina inductora adecuado para la recolección de energía térmica del calor corporal humano.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: En la investigación se implementó el convertidor de impulso en una tecnología CMOS de 0.18 μm . Además, se propuso un esquema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) consciente de las pérdidas para maximizar la eficiencia de la recolección de energía. Se empleó una arquitectura de doble ruta que permitió el arranque automático del convertidor y la transferencia eficiente de energía sin la necesidad de componentes externos adicionales.

Las principales contribuciones de esta investigación incluyen:

- Desarrollo de un convertidor de impulso de arranque automático con una sola bobina inductora que es eficiente para la recolección de energía térmica del cuerpo humano.

- Diseño de un esquema de seguimiento del punto de máxima potencia (**MPPT**) consciente de las pérdidas para maximizar la eficiencia de la recolección de energía.
- Implementación del convertidor en una tecnología CMOS de 0.18 μm y logro de una eficiencia superior al 75% en un rango de voltaje de entrada de 15-100 mV, con una eficiencia máxima del 82%.
- Demostración de la capacidad de arranque automático del convertidor con un voltaje de entrada mínimo de 50 mV sin necesidad de componentes externos adicionales.

En resumen, esta investigación logró desarrollar un convertidor de impulso innovador y eficiente, capaz de recolectar energía térmica del cuerpo humano de manera autónoma y adaptarse a las condiciones cambiantes de voltaje de entrada, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de recolección de energía en dispositivos portátiles y de monitoreo.

Quinn Brogan y Dong Sam Ha et al. (2019) «**A Single Stage Boost Converter for Body Heat Energy Harvesting with Maximum Power Point Tracking and Output Voltage Regulation**». El propósito central de la investigación fue la concepción y desarrollo de un convertidor Boost de una sola etapa destinado a la captura de energía proveniente del calor corporal, incorporando la funcionalidad de seguimiento del punto de máxima potencia y la regulación del voltaje de salida.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: En el marco de la investigación, se aplicaron técnicas de diseño de circuitos electrónicos y se llevaron a cabo simulaciones por medio de software de simulación de circuitos. El circuito concebido se diseñó y materializó en tecnología CMOS de 0.25 μm . Las simulaciones subsiguientes permitieron la evaluación exhaustiva del rendimiento del circuito propuesto.

Contribuciones: Las contribuciones preponderantes emanadas de la investigación comprenden:

- El diseño de un convertidor Boost de una sola etapa capaz de elevar tensiones de entrada, inclusive tan bajas como 50 mV, a una salida regulada de 3 V.
- La implementación de una estrategia de seguimiento del punto de máxima potencia basada en el método de voltaje de circuito abierto fraccionario,

permitiendo la adaptabilidad del circuito a una variedad de generadores termoeléctricos (TEGs) y configuraciones de TEG.

- La reducción de la complejidad del circuito y la disipación de energía a través de la adopción de un esquema de funcionamiento en modo de ráfaga y la utilización de un convertidor asíncrono.

Conclusiones: De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones posteriores a la disposición del circuito, se demostró que el convertidor concebido es capaz de elevar tensiones de entrada tan bajas como 50 mV hasta una salida regulada de 3 V, alcanzando una eficiencia máxima del 81%. Estos hallazgos indican la idoneidad del circuito para la recolección de energía a partir del calor corporal, lo que lo convierte en una solución viable para la alimentación de dispositivos portátiles.

Antonino Proto, Jaroslav Vondrak, Martin Schmidt, Jan Kubicek, Ojan Majidzadeh Gorjani, Jan Havlik y Marek Penhaker et al. (2021) «***A Flexible Thermoelectric Generator Worn on the Leg to Harvest Body Heat Energy and to Recognize Motor Activities: A Preliminary Study***».

El propósito fundamental de esta investigación consistió en la exploración de la técnica de recolección de energía a partir del calor corporal, con el fin de abastecer de energía a dispositivos portátiles y llevar a cabo la identificación de actividades motoras.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: En el transcurso de este estudio, se implementó un generador termoeléctrico flexible, el cual fue equipado con un acelerómetro. El generador termoeléctrico flexible se posicionó en la pierna superior, específicamente por encima del tobillo, y el acelerómetro se empleó para detectar una diversidad de actividades motoras ejecutadas por diez estudiantes pertenecientes a la Universidad Técnica de Ostrava.

Contribuciones: Las contribuciones destacadas de esta investigación comprenden la validación de la factibilidad de emplear un generador termoeléctrico flexible con la finalidad de captar la energía proveniente del calor corporal y su posterior suministro a dispositivos portátiles. Asimismo, se desarrolló un modelo matemático con el propósito de llevar a cabo el reconocimiento de actividades motoras a partir de las señales generadas por el generador termoeléctrico.

Conclusiones: Como resultado preliminar, se dedujo que las partes semiestacionarias de la señal originada por el generador termoeléctrico podrían correlacionarse con la realización de una actividad particular. En adición, se pudo constatar que la densidad de potencia máxima registrada ascendió a $20.3 \mu\text{W cm}^{-2}$ en la actividad de "Caminar", mientras que la densidad de potencia mínima observada fue de $8.3 \mu\text{W cm}^{-2}$ en la actividad de "Sentarse".

Soumya Bose, Boyu Shen y Matthew L. Johnston et al. (2020) «**A Batteryless Motion-Adaptive Heartbeat Detection System-onChip Powered by Human Body Heat**». El objetivo general de esta investigación fue la concepción y desarrollo de un sistema en un chip (SoC) destinado a la detección de latidos cardíacos sin necesidad de alimentación mediante batería y su alimentación se logró aprovechando la energía térmica generada por el cuerpo humano. Este SoC fue diseñado para funcionar de manera autónoma, adaptándose a movimientos corporales.

En el transcurso de la investigación, se aplicaron y emplearon diversas técnicas e instrumentos que incluyeron:

- La utilización de un lazo de bloqueo de ancho de pulso (**PWLL**) con capacidad de adaptación para detectar latidos cardíacos, incluso en presencia de artefactos de movimiento.
- Un generador termoeléctrico (**TEG**) portátil, conectado a un convertidor elevador de **CC-CC** de bajo voltaje, junto con un sistema de gestión de energía integrado, con el propósito de aprovechar la energía térmica generada por el cuerpo humano.
- La implementación de un proceso de tecnología **CMOS** de $0.18 \mu\text{m}$ para llevar a cabo la materialización del **SoC**.
- La creación de circuitos de acondicionamiento de señal analógica y circuitos digitales diseñados específicamente para el procesamiento de las señales del electrocardiograma (**ECG**).

Las contribuciones más destacadas de esta investigación abarcan:

- El desarrollo exitoso de un sistema **SoC** autónomo, alimentado sin necesidad de batería, capaz de detectar latidos cardíacos con precisión, gracias a la implementación de un lazo de bloqueo de ancho de pulso (**PWLL**) que permite la adaptación ante artefactos de movimiento.

- El diseño de circuitos eficientes en términos de consumo de energía para el acondicionamiento de señales analógicas y el procesamiento de señales de **ECG**.
- La demostración de un sistema completo para la detección autónoma de latidos cardíacos, incluso en situaciones de movimiento, todo ello alimentado mediante la energía térmica generada por el cuerpo humano, y su integración en dispositivos portátiles.

En resumen, la investigación logró desarrollar un **SoC** innovador y autónomo que puede ser aplicado en el monitoreo de latidos cardíacos con una fuente de energía basada en el calor corporal, lo cual tiene aplicaciones prometedoras en el ámbito de la salud y los dispositivos portátiles.

Zahrasadat Tabaie y Amir Omidvar et al. (2023) **«Human body heat-driven thermoelectric generators as sustainable power supply for wearable electronic devices: Recent advances, challenges, and future perspectives»**. El objetivo principal de esta investigación fue realizar una revisión exhaustiva de los avances recientes, los desafíos y las perspectivas futuras en el ámbito de los generadores termoeléctricos impulsados por el calor corporal humano, con el propósito de evaluar su viabilidad como fuente de energía sostenible para dispositivos electrónicos portátiles.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: No se describen técnicas e instrumentos específicos en este trabajo, ya que se trata de un estudio de revisión bibliográfica que se centró en la recopilación, análisis y síntesis de estudios previos y literatura relevante relacionada con los generadores termoeléctricos impulsados por el calor corporal humano.

Las contribuciones de esta investigación radican en la elaboración de una revisión integral de la literatura científica en el campo de los generadores termoeléctricos portátiles. Se abordaron temas relacionados con la estructura y el rendimiento de estos dispositivos, y se analizó el impacto de las condiciones ambientales y las respuestas termo fisiológicas del cuerpo en su eficiencia. Asimismo, se destacaron los desafíos que deben superarse en este ámbito y se presentaron posibles direcciones futuras para la investigación y desarrollo de generadores termoeléctricos portátiles.

Las conclusiones específicas de esta investigación no se proporcionan debido a la limitación de contenido. Sin embargo, este estudio de revisión permitió resumir el estado actual del conocimiento sobre los generadores termoeléctricos impulsados por el calor corporal y destacar su potencial como fuente de energía sostenible para dispositivos electrónicos portátiles. Además, se subrayaron áreas de interés para investigaciones futuras en este campo.

Jinfeng Yuan y Rong Zhu et al. (2019) «**Self-powered wearable multi-sensing bracelet with flexible thermoelectric power generator**». El objetivo general de la investigación consistió en el desarrollo de un brazalete wearable autoalimentado y multi-sensorial mediante la implementación de un generador de energía termoeléctrica flexible (FTEG), con la capacidad de monitorear simultáneamente la temperatura, humedad y movimiento del cuerpo humano, haciendo uso del calor corporal como fuente de energía.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: En el marco de este estudio, se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos:

- Fabricación de un generador de energía termoeléctrica flexible (**FTEG**) mediante la integración de granos termoeléctricos de Bi₂Te₃ en un sustrato de poliamida flexible.
- Diseño y desarrollo de un brazalete wearable que incorpora el **FTEG** en conjunto con un sistema de sensores de temperatura/humedad y un acelerómetro, además de un sistema de gestión de energía inteligente y una pantalla LCD.
- Configuración experimental destinada a evaluar el rendimiento del **FTEG**, incluyendo una placa caliente para simular la temperatura corporal, una resistencia como carga y un ventilador para investigar la influencia del flujo de aire en el **FTEG**.
- Realización de experimentos en un sujeto utilizando el brazalete wearable, con el fin de verificar su funcionamiento en tiempo real.

Las contribuciones principales derivadas de esta investigación se sintetizan de la siguiente manera:

- Diseño y producción exitosa de un **FTEG**, logrando una eficiencia de conversión de energía aplicable.

- Caracterización exhaustiva del rendimiento del **FTEG**, incluyendo la determinación de la potencia de salida, la densidad de potencia y el voltaje de carga.
- Desarrollo de un brazalete wearable autoalimentado y multi-sensorial que integra el **FTEG** con sensores de temperatura/humedad y un acelerómetro, respaldado por un sistema de gestión de energía inteligente.
- Verificación de la capacidad de suministrar energía al sistema a través del calor corporal y su funcionamiento sostenible en diversas condiciones, como el movimiento y la inmovilidad del cuerpo humano.

Conclusiones: A partir de los experimentos llevados a cabo en esta investigación, se llegó a las siguientes conclusiones: El **FTEG** desarrollado en el estudio demostró ser capaz de generar una potencia de salida de 4.95 mW, con una densidad de potencia de 153 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y un voltaje de carga de hasta 260 mV. El brazalete wearable autoalimentado y multi-sensorial funcionó de manera efectiva, permitiendo la monitorización simultánea de la temperatura, humedad y movimiento del cuerpo humano. El sistema de gestión de energía inteligente maximizó la utilización de la energía generada, independientemente de las condiciones cambiantes del cuerpo. Estas conclusiones respaldan la aplicabilidad y el potencial de los **FTEG** en la alimentación de dispositivos electrónicos personales y sistemas de monitoreo wearable.

Amit Tanwar, Swatchith Lal, Kafil M. Razeeb et al. (2021) realizaron un estudio titulado «**Structural Design Optimization of Micro-Thermoelectric Generator for Wearable Biomedical Devices**». El objetivo general de la investigación consistió en la optimización del diseño estructural de un generador micro-termoeléctrico destinado a aplicaciones en dispositivos biomédicos portátiles. El propósito fundamental radicaba en mejorar la eficiencia y la capacidad de generación de energía en entornos caracterizados por gradientes de temperatura bajos.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: Se recurrió al empleo del método de elementos finitos (**FEM**) a través de la plataforma COMSOL Multiphysics para llevar a cabo un análisis exhaustivo y la subsiguiente optimización de la influencia de la geometría y la estructura de las patas termoeléctricas en la producción de energía y la eficiencia del generador micro-termoeléctrico. Además, se hicieron uso de propiedades de materiales reales adquiridas mediante procedimientos de electrodeposición.

Las contribuciones principales que emanaron de esta investigación se resumen de la siguiente manera:

- **Diseño optimizado:** Se logró la optimización del diseño estructural del generador micro-termoeléctrico, teniendo en cuenta parámetros tales como la configuración geométrica, altura, espesor del material de interconexión, selección del material de relleno y el área de la sección transversal de las patas termoeléctricas.
- **Evaluación del rendimiento:** El rendimiento del generador micro-termoeléctrico optimizado fue evaluado mediante simulaciones, a partir de las cuales se obtuvieron valores máximos de producción de energía para distintos gradientes de temperatura.
- **Potencial para dispositivos portátiles:** Los resultados de la investigación indican que el generador micro-termoeléctrico optimizado ostenta un considerable potencial para su implementación como fuente de energía en dispositivos biomédicos portátiles.

Las conclusiones fundamentales de la investigación pueden resumirse de la siguiente manera:

- La utilización de materiales termoeléctricos tipo p y n, como el bismuto-antimonio-telurio (BiSbTe) y el cobre-telurio (CuTe), respectivamente, en conjunto con un diseño estructural optimizado, permitió obtener una producción de energía significativa a partir del calor corporal.
- El diseño optimizado del generador micro-termoeléctrico demostró ser altamente eficaz en la generación de energía eléctrica a partir de gradientes de temperatura reducidos, tales como 2-10 K.
- El generador micro-termoeléctrico presenta ventajas en términos de su tamaño compacto, bajo peso y la capacidad de establecer un contacto térmico íntimo con el cuerpo humano, características que lo hacen adecuado para aplicaciones en dispositivos portátiles y wearables de índole biomédica.

Poramed Wongjoma, Wannisa Thongsamrita, Harihara Ramamoorthy, Suriya Chinwongd, Ratchanok Somphonsane, Chesta Ruttanapun et al. (2020) presentan el artículo sobre «**Cost-**

Effective Experimental Setup for Studies of Spin Seebeck Effect and Electrical». El objetivo general de la investigación consistió en concebir un montaje experimental de bajo coste, altamente preciso y de implementación sencilla, con el propósito de llevar a cabo un estudio integral sobre el fenómeno del efecto Spin Seebeck (**SSE**) y el transporte eléctrico en materiales termoeléctricos.

Técnicas utilizadas en la investigación: En el marco de este estudio, se emplearon técnicas experimentales específicas con el fin de investigar tanto el efecto Spin Seebeck como el transporte eléctrico en materiales termoeléctricos. La elaboración de una cámara de vacío personalizada equipada con baños térmicos para la generación de gradientes de temperatura necesarios fue parte fundamental del proceso. Adicionalmente, se hizo uso de imanes permanentes de neodimio (**NdPM**) con la finalidad de generar un campo magnético uniforme. Asimismo, se incorporó un mecanismo de rotación de muestra de 360 grados, lo que permitió examinar la dependencia angular del campo magnético. Se llevaron a cabo mediciones de la respuesta de Spin Seebeck longitudinal (**LSSE**) y el efecto Nernst anómalo (**ANE**) en diversas estructuras y materiales termoeléctricos.

Instrumentos utilizados en la investigación: La instrumentación desplegada en el transcurso de la investigación incluyó imanes permanentes de neodimio (**NdPM**) para la generación de un campo magnético uniforme. Además, se diseñó y utilizó una cámara de vacío personalizada equipada con baños térmicos, junto con un mecanismo de rotación de muestra de 360 grados. Para caracterizar con precisión las respuestas de **LSSE** y **ANE**, así como la resistividad eléctrica de las muestras de Bi₂Te₃, se emplearon instrumentos de medición especializados.

Conclusiones: Como resultado de esta investigación, se logró concebir un montaje experimental de bajo coste y alta precisión, destinado al estudio del efecto Spin Seebeck y el transporte eléctrico en materiales termoeléctricos. Se demostró una excelente uniformidad en el campo magnético, una precisa estabilidad en el gradiente de temperatura, y una concordancia satisfactoria con los resultados previamente reportados en la literatura en cuanto a las respuestas de LSSE. Además, se evidenció la capacidad del montaje propuesto para la medición del efecto Nernst anómalo y la resistividad eléctrica en muestras de Bi₂Te₃. Estos resultados subrayan la

versatilidad del montaje para llevar a cabo una caracterización exhaustiva de materiales termoeléctricos.

Jin-Sung Park y Chang-Su Huh et al. (2012) «**A Study on Improved Efficiency and Cooling LED Lighting using a Seebeck Effect**». El objetivo general de la investigación consistió en llevar a cabo un análisis exhaustivo y comparativo de la eficiencia de diversos sistemas de enfriamiento aplicados a fuentes de iluminación LED, haciendo uso del efecto Seebeck como base para la evaluación.

Técnicas utilizadas en la investigación:

- El enfoque metodológico adoptado en el transcurso de la investigación incluyó las siguientes técnicas:
 - Diseño experimental: Se implementaron experimentos sistemáticos y comparativos para la evaluación del desempeño de distintos sistemas de enfriamiento destinados a la tecnología LED.
 - Medición de temperatura: Se hizo uso de termopares y dispositivos registradores de datos para llevar a cabo mediciones precisas y el registro de temperaturas en los diferentes sistemas de enfriamiento estudiados.
 - Análisis de datos: Se realizaron cálculos y análisis estadísticos con el propósito de efectuar una comparativa rigurosa de la eficiencia de los sistemas de enfriamiento analizados.

Instrumentos utilizados en la investigación:

- LED de 3W: Se empleó un dispositivo LED de 3 vatios como fuente luminosa en las evaluaciones experimentales.
- Disipador de calor: Se recurrió a disipadores de calor con el propósito de gestionar la disipación de calor generada por la fuente LED.
- Elemento Seebeck: Se implementaron elementos Seebeck en los sistemas de enfriamiento, los cuales capitalizaron las disparidades térmicas para la generación de energía eléctrica.
- Elemento Peltier: Se incluyeron elementos Peltier en los sistemas de enfriamiento, funcionando mediante la transferencia de calor al aplicar una corriente eléctrica.

Conclusiones:

- El sistema de enfriamiento basado en el elemento Peltier exhibió un rendimiento superior en términos de eficiencia de enfriamiento con respecto al sistema apoyado en el elemento Seebeck. No obstante, el sistema Peltier demandó una mayor potencia de entrada para operar de manera efectiva.
- El sistema de enfriamiento que incorporó el elemento Seebeck demostró una eficiencia ligeramente inferior en comparación con el elemento Peltier, aunque generó una cantidad adicional de energía eléctrica, aunque pequeña.
- El empleo de disipadores de calor de manera aislada reveló una eficiencia de enfriamiento inferior en comparación con los sistemas que integraron elementos Seebeck o Peltier.

Los resultados obtenidos en este estudio destacaron la relevancia de considerar distintos enfoques de enfriamiento con miras a optimizar la eficiencia de sistemas de iluminación LED y abordar los desafíos térmicos inherentes a esta tecnología.

Giuseppe Pelosi, Antonio Savini et al. (2020) « ***The Early Experiments of Alessandro Volta and the Seebeck Effect***». El propósito general de esta investigación no se encuentra explícitamente definido en el material proporcionado. En su lugar, el enfoque se centra en llevar a cabo un análisis exhaustivo de la historia temprana de la termoelectricidad, con énfasis en las contribuciones pioneras de Alessandro Volta y Thomas J. Seebeck.

Técnicas utilizadas en la investigación: A pesar de no detallarse específicamente las técnicas empleadas en la investigación, se resalta que Alessandro Volta condujo una serie de experimentos que involucraron la manipulación de diversos materiales con diferencias de temperatura en sus extremos. Thomas J. Seebeck también efectuó investigaciones experimentales relacionadas con la generación de corrientes termoeléctricas.

Instrumentos utilizados en la investigación: El contenido no brinda información precisa acerca de los instrumentos específicos empleados en la investigación. No obstante, se menciona que Alessandro Volta llevó a cabo sus experimentos utilizando elementos como arcos metálicos y ranas, aunque no se proporciona un análisis detallado de los instrumentos utilizados en sus investigaciones.

Conclusiones: Aunque no se presentan conclusiones específicas en el material proporcionado, se hace hincapié en que Alessandro Volta efectuó las primeras observaciones y experimentos significativos en el campo de la termoelectricidad. Asimismo, se atribuye a Thomas J. Seebeck el descubrimiento del fenómeno de generación de corriente eléctrica a partir de una diferencia de temperatura en una cadena de metal. Estos hallazgos históricos son referidos por Antonio Savini en su artículo revisado, lo que contribuye a la comprensión de los antecedentes fundamentales en el desarrollo de la termoelectricidad.

Otto Fernando Balseca-Sampedro ,Diego Fernando Mayorga-Pérez ,John Germán Vera-Luzuriaga ,Hugo Alexander Noriega-Cordovez ,Bryan Sebastián Mejía-Rodríguez ,Ronald Alexis Arévalo Sánchez ,Henry Stiwar Centeno-Amaguaya et al. (2022) «**Implementación de un Sistema de Generación Eléctrica mediante la aplicación del Efecto Seebeck con Celdas Peltier para aprovechar el Calor Residual de Gases de Procesos Industriales**». El objetivo general de esta investigación consistió en el desarrollo de un prototipo de sistema destinado a la captación y aprovechamiento de energía mediante la aplicación del efecto Seebeck, utilizando celdas Peltier, con el propósito de convertir el calor residual de gases generados en procesos industriales en electricidad. El enfoque central fue la demostración de la capacidad de las celdas Peltier para la generación de energía eléctrica a partir de gradientes de temperatura, con el fin de reducir el consumo energético y mitigar la huella de carbono asociada a la actividad industrial.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: Aunque el resumen no especifica las técnicas e instrumentos concretos empleados, en virtud de la naturaleza científica del estudio, es plausible inferir que se llevaron a cabo procedimientos experimentales para la obtención de datos. Estos posiblemente incluyeron mediciones de la diferencia de temperatura en las celdas Peltier y el análisis del flujo de calor residual a través del prototipo.

Contribuciones de la investigación: Las contribuciones fundamentales de esta investigación se centran en la concepción y desarrollo de un prototipo operativo que ejemplifica la generación de electricidad a partir del calor residual emanado de los gases en procesos industriales. Además, se subraya la relevancia de aprovechar el calor residual como una medida encaminada a la reducción del consumo de energía y, por consiguiente, la mitigación de la contaminación asociada a la actividad industrial.

Conclusiones de la investigación: Las conclusiones derivadas de esta investigación indican que el prototipo construido demostró la capacidad de generar aproximadamente seis voltios de electricidad mediante la explotación de las diferencias de temperatura a través de las celdas Peltier. Aunque el prototipo no incide directamente en la reducción de la contaminación, el aprovechamiento del calor residual en procesos industriales puede contribuir de manera significativa a la disminución del consumo energético y, por ende, a la reducción de la huella de carbono atribuible a la actividad industrial. Esto sugiere que la aplicación del efecto Seebeck con el uso de celdas Peltier representa una alternativa viable para la generación de electricidad a partir del calor residual en el contexto de los procesos industriales.

Donald Dibra, Matthias Stecher, Andreas Lindemann, Josef Lutz, Christoph Kadow Dibra et al. (2009) «**Seebeck Difference – Temperature Sensors Integrated into Smart Power Technologies**». El propósito fundamental de esta investigación consistió en la presentación y validación de sensores de diferencia de temperatura (ΔT) basados en el efecto Seebeck, los cuales fueron posteriormente integrados en tecnologías de MOSFET (Transistor de Efecto de Campo Metal-Oxido-Semiconductor) de potencia inteligente. Estos sensores tienen la capacidad de generar una señal de voltaje directamente proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT) presente en su entorno.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación:

- Diseño y fabricación de estructuras de prueba: Se desarrollaron y confeccionaron estructuras de prueba específicas destinadas a la evaluación y caracterización del coeficiente de Seebeck de los sensores de diferencia de temperatura (ΔT).
- Sensores de temperatura basados en pn-junction: Para efectos de referencia y comparación, se emplearon sensores de temperatura basados en pn-junction con el fin de medir las temperaturas en los extremos caliente y frío de los sensores de diferencia de temperatura (ΔT).
- Amplificador de instrumentación: Se utilizó un amplificador de instrumentación como elemento esencial para la medición de la señal de voltaje generada por los sensores de diferencia de temperatura (ΔT).

Contribuciones:

- Integración de sensores de diferencia de temperatura (ΔT) basados en el efecto Seebeck en tecnologías de MOSFET de potencia inteligente: Se logró, por primera vez, la exitosa integración de estos sensores en circuitos integrados de potencia inteligente, presentando potenciales aplicaciones en la protección térmica de dispositivos de potencia.
- Caracterización del coeficiente de Seebeck: Se llevó a cabo la medición y caracterización precisa del coeficiente de Seebeck de los sensores de diferencia de temperatura (ΔT) mediante el empleo de estructuras de prueba diseñadas para tal fin.

Conclusiones:

- Los sensores de diferencia de temperatura (ΔT) basados en el efecto Seebeck y su posterior integración en tecnologías de MOSFET de potencia inteligente se confirmaron como una solución viable y funcional.
- Se logró la medición de un coeficiente de Seebeck de hasta 0.92 mV/K mediante el uso de sensores de diferencia de temperatura (ΔT) basados en materiales como el silicio dopado con p y el polisilicio dopado con n+.
- Estos sensores demostraron ventajas significativas en términos de tamaño y acoplamiento térmico en comparación con los sensores de temperatura tradicionales basados en pn-junction que son comúnmente empleados.

En resumen, esta investigación presentó y validó la efectividad de los sensores de diferencia de temperatura (ΔT) basados en el efecto Seebeck, su integración en tecnologías de MOSFET de potencia inteligente, y se caracterizó su coeficiente de Seebeck, destacando sus ventajas en comparación con los sensores convencionales basados en pn-junction.

Maran et al., (2016), « ***Use of the Seebeck Effect for Energy Harvesting***». El propósito fundamental de esta investigación consistió en analizar el impacto de la temperatura en el rendimiento de dispositivos termoeléctricos, específicamente generadores termoeléctricos, con la finalidad de evaluar su potencial como fuente de energía renovable y realizar una comparativa exhaustiva de su desempeño y costos en relación con paneles fotovoltaicos.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: El enfoque metodológico empleado en esta investigación se basó en técnicas de modelado físico y simulación. El software utilizado para este propósito fue Simulink, una herramienta de simulación física perteneciente a la suite de Matlab. Se llevaron a cabo simulaciones exhaustivas con el objetivo de evaluar el rendimiento de los generadores termoeléctricos, teniendo en cuenta diversos parámetros, como la diferencia de temperatura. Además, se realizó una comparación detallada en términos de rendimiento y costos con respecto a los paneles fotovoltaicos.

Contribuciones:

- Demostración del potencial de los generadores termoeléctricos como fuente de energía renovable, enfatizando su capacidad para generar electricidad a partir de gradientes de temperatura significativos.
- Realización de simulaciones que permiten la evaluación precisa del rendimiento de los generadores termoeléctricos, considerando tanto la generación de energía eléctrica como los aspectos económicos.
- Comparación minuciosa del desempeño y los costos asociados a los generadores termoeléctricos en relación con los paneles fotovoltaicos, lo que resalta su competitividad en términos de generación de energía y eficiencia de costos.
- Énfasis en las ventajas inherentes a los dispositivos termoeléctricos, como su capacidad para aprovechar gradientes de temperatura y su mayor confiabilidad en contraposición a sistemas térmicos tradicionales, destacando su potencial para aplicaciones sostenibles.

Conclusiones:

- Los generadores termoeléctricos poseen un innegable potencial para la generación eficiente de energía eléctrica, especialmente cuando se explotan gradientes de temperatura substanciales.
- En comparación con los paneles fotovoltaicos, los generadores termoeléctricos demuestran la capacidad de generar una cantidad significativa de energía eléctrica a un costo sustancialmente inferior, considerando una superficie de área equivalente.

- Los dispositivos termoeléctricos exhiben cualidades deseables, incluyendo la ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero, una vida útil prolongada y un menor nivel de ruido y vibración en comparación con sistemas térmicos convencionales.
- A pesar de la limitación evidente en términos de eficiencia de los generadores termoeléctricos, es importante destacar que avances en tecnologías de semiconductores prometen superar esta restricción en un futuro próximo.

Akihiro Kirihiro et al. (2014) « **Spin-Seebeck thermoelectric converter**». El propósito general de esta investigación consistió en la presentación de convertidores termoeléctricos basados en el efecto Spin-Seebeck (**SSE**) y la posterior demostración de su ley de escalamiento, la cual difiere sustancialmente de la aplicable a los dispositivos termoeléctricos convencionales. Paralelamente, se buscó la implementación de convertidores **SSE** de estructura simple mediante el empleo de métodos de recubrimiento de películas, lo que tiene el potencial de abrir el camino hacia una amplia variedad de aplicaciones que aprovechen diversas fuentes de calor.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación:

- Método de descomposición orgánica de metales (**MOD**): El método **MOD** se empleó con el propósito de crear películas magnéticas y aislantes sobre diversos sustratos, como parte de la construcción de los convertidores termoeléctricos SSE.
- Recubrimiento por giro (spin coating): La técnica de recubrimiento por giro se utilizó para aplicar la solución **MOD** de manera uniforme sobre los sustratos de los convertidores.
- Recocido (annealing): Se llevó a cabo un proceso de recocido de la solución **MOD** depositada sobre los sustratos, lo que resultó en la formación de las películas magnéticas aislantes necesarias para el funcionamiento de los convertidores.
- Sputtering: La técnica de sputtering se empleó para depositar una película de platino (Pt) sobre las películas de material Bi:YIG de los convertidores termoeléctricos **SSE**.

- Medición de voltaje: Un sistema de medición se utilizó para registrar las señales de voltaje generadas por los convertidores termoeléctricos **SSE** en respuesta a un campo magnético externo y una diferencia de temperatura aplicada.

Contribuciones:

- Desarrollo de convertidores termoeléctricos basados en el efecto Spin-Seebeck (**SSE**): Se presentó una categoría innovadora de convertidores termoeléctricos que capitalizan el efecto SSE, permitiendo la conversión directa del gradiente de temperatura en corriente eléctrica.
- Demostración de la ley de escalamiento: Se llevó a cabo una demostración experimental que confirmó que la señal de salida de los convertidores **SSE** aumenta directamente en relación al tamaño de los mismos, una ley de escalamiento que contrasta con la aplicable a los dispositivos termoeléctricos convencionales.
- Implementación de convertidores **SSE** de estructura simple mediante métodos de recubrimiento de películas: Se logró fabricar convertidores **SSE** mediante el uso de métodos de recubrimiento de películas, lo que posibilita su aplicación versátil en diversas fuentes de calor, incluso en superficies con geometrías variadas.

Las conclusiones fundamentales de esta investigación se resumen de la siguiente manera:

- El efecto Spin-Seebeck (**SSE**) representa una promisorio oportunidad en el desarrollo de convertidores termoeléctricos eficientes y versátiles.
- La ley de escalamiento de los convertidores **SSE** difiere notoriamente de la aplicable a los dispositivos termoeléctricos convencionales, lo que abre nuevas perspectivas para el diseño y la aplicación de estos dispositivos.
- Los convertidores **SSE** fabricados mediante métodos de recubrimiento de películas se caracterizan por su estructura sencilla y su capacidad de adaptación a diversas fuentes de calor, lo que amplía su potencial aplicativo.
- Para optimizar el rendimiento termoeléctrico de los convertidores **SSE**, es necesario considerar aspectos como el grosor de las capas y realizar investigaciones adicionales en esta área.

En resumen, esta investigación logró desarrollar y demostrar convertidores termoeléctricos basados en el efecto Spin-Seebeck, con una ley de escalamiento diferente a la de los dispositivos convencionales, y mostró la viabilidad de implementar convertidores SSE de estructura simple mediante métodos de recubrimiento de películas.

Tianjun Liao, Zhuolin Ye y Jincan Chen et al. (2017) «**Spin-Seebeck Temperature Sensors**». El objetivo general de la investigación contenida en el artículo "Spin-Seebeck Temperature Sensors" se centra en la proposición y conceptualización de dos sensores de temperatura a nivel nanométrico basados en el efecto spin-Seebeck (**SSE**). Estos sensores emplean tanto el efecto spin-Seebeck longitudinal (**LSSE**) en una estructura bicapa compuesta por un material aislante ferromagnético (Y3Fe5O12) y platino (Pt), como el efecto spin-Seebeck transversal (**TSSE**) en una configuración de Ni81Fe19/Pt. El propósito central radica en la conversión directa de la información de temperatura en una señal de voltaje eléctrico. Además, se investiga el impacto del ángulo de Hall de spin en el rendimiento de los sensores. Los resultados obtenidos sugieren que tanto el **LSSE** como el **TSSE** tienen el potencial de ser empleados en la creación de sensores de temperatura prácticos.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: En la ejecución de esta investigación, se presume que se llevaron a cabo análisis teóricos y simulaciones computacionales para la formulación y desarrollo de los modelos conceptuales relativos a los sensores propuestos. Asimismo, es factible que se hayan empleado técnicas de caracterización y métodos de medición para la evaluación del rendimiento de dichos sensores.

Las contribuciones significativas de la investigación abordada en el artículo incluyen la proposición de dos novedosos diseños de sensores de temperatura basados en el efecto spin-Seebeck, así como la descripción detallada de los principios operativos que permiten la conversión directa de información de temperatura en señales eléctricas. Además, se examina minuciosamente el impacto del ángulo de Hall de spin en el rendimiento de los sensores, proporcionando información crucial para la concepción y optimización de futuros dispositivos de naturaleza similar.

Con respecto a las conclusiones extraídas de la investigación, el artículo plantea que los conceptos propuestos tienen el potencial de introducir nuevas perspectivas para la medición de

la temperatura a escala nanométrica. Los resultados obtenidos en el estudio indican que tanto el **LSSE** como el **TSSE** poseen las cualidades necesarias para ser implementados en la creación de sensores de temperatura con aplicaciones prácticas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este resumen se limita a la presentación de un resumen del artículo y, como tal, no incluye las conclusiones específicas que se encuentran en el estudio completo.

Julius T. Sese et al. (2016) «**Spin-Seebeck Temperature Sensors**». El objetivo primordial de esta investigación consistió en evaluar la generación de energía eléctrica a partir del calor corporal generado durante diversas actividades físicas o entrenamientos. Para ello, se emplearon baldosas Peltier y un circuito Joule Thief como elementos clave. La investigación se centró en determinar cuál de las actividades analizadas generaba la mayor cantidad de voltaje en un periodo de tiempo definido y calcular el tiempo estimado necesario para cargar completamente una batería previamente descargada.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación:

- Baldosas Peltier: Se emplearon baldosas Peltier para capitalizar el efecto Seebeck, que da lugar a la generación de un voltaje en presencia de una diferencia de temperatura entre dos conductores de diversa naturaleza.
- Circuito Joule Thief: El circuito Joule Thief se utilizó como un amplificador de voltaje autooscilante adecuado para aplicaciones de baja potencia.
- Batería recargable: Una batería recargable se incorporó en el sistema para acumular el voltaje generado a través del circuito Joule Thief.
- Módulos de gestión de energía: Se recurrió a módulos de gestión de energía con el propósito de medir y regular el voltaje recolectado a través del circuito.

Las principales contribuciones derivadas de esta investigación se resumen de la siguiente manera:

- Se demostró la viabilidad de aprovechar el calor corporal generado durante actividades físicas para la generación de energía eléctrica mediante la combinación de baldosas Peltier y un circuito Joule Thief.

- Se identificó la actividad de jogging en una cinta como la más efectiva en términos de generación de voltaje, en comparación con el ciclismo estacionario y el press de banca.
- Se calculó el tiempo aproximado necesario para cargar por completo una batería previamente descargada utilizando la energía generada durante las actividades físicas.

Conclusiones:

- La combinación de baldosas Peltier y el circuito Joule Thief demostró ser un enfoque eficaz para aprovechar el calor corporal durante actividades físicas y convertirlo en energía eléctrica.
- Entre las actividades analizadas, se determinó que el jogging en una cinta generó la mayor cantidad de voltaje en un período de tiempo definido, superando al ciclismo estacionario y al press de banca.
- El cálculo del tiempo estimado para cargar completamente una batería descargada, utilizando la energía generada durante las actividades físicas, arrojó un valor de 38,461.54 horas con una batería de 1000 miliamperios-hora (mAh).

D. Randjelović, G. Kaltsas, Ž. Lazić y M. Popović. et al. (2002) **«Multipurpose Thermal Sensor Based on Seebeck Effect»**. La investigación corroboró la viabilidad de emplear el calor corporal como fuente de energía eléctrica durante actividades físicas y proporcionó valiosa información sobre la eficacia de diferentes actividades en términos de generación de voltaje.

El objetivo primordial de esta investigación radicó en el desarrollo y caracterización de un sensor térmico de propósito múltiple basado en el efecto Seebeck. Se propuso concebir y manufacturar un dispositivo con la capacidad de operar tanto como convertidor térmico como medidor de flujo de gas, y se llevó a cabo una comparación sistemática de su rendimiento frente a otros sensores preexistentes.

Técnicas e instrumentos utilizados en la investigación: El desarrollo del sensor térmico involucró la aplicación de técnicas de micro fabricación y micro maquinado. Esto incluyó la implementación de procesos de deposición y grabado de capas delgadas, así como el empleo de técnicas de litografía y grabado anisotrópico para estructurar las múltiples capas del sensor.

Además, se utilizaron fuentes de corriente y multímetros para llevar a cabo mediciones que permitieran evaluar la estabilidad y las características eléctricas del sensor.

Contribuciones:

- Confección y puesta a punto de un sensor térmico de naturaleza versátil basado en el efecto Seebeck.
- Realización de una caracterización experimental del sensor en dos modalidades de operación: en calidad de convertidor térmico y como medidor de flujo de gas.
- Comparación del rendimiento del sensor con otros dispositivos sensores preexistentes, particularmente en lo concerniente a la medición de flujos de gas.

Conclusiones:

- El sensor térmico desarrollado demostró ser robusto y sensitivo en la captura de señales de naturaleza alterna (AC).
- En la configuración de convertidor térmico, se observó que la estabilidad del voltaje de Seebeck se veía impactada por corrientes de alimentación superiores a 10 mA.
- El sensor evidenció una sensibilidad de 406 mV/W en relación con la medición de la potencia de entrada y una conductancia térmica total de 34.46 mW/K.
- El coeficiente de Seebeck del silicio dopado con boro, que se determinó, alcanzó un valor de 318 $\mu\text{V/K}$.
- El sensor basado en el efecto Seebeck exhibió ventajas notables en la medición de flujos de gas en comparación con otros sensores basados en principios de operación distintos.

2.2. PROBLEMÁTICA

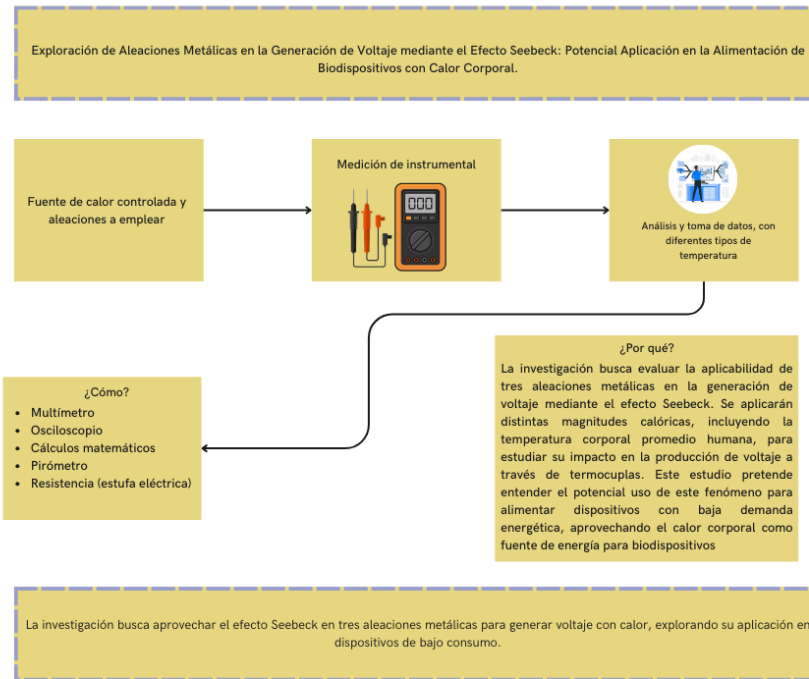
La conversión de energía térmica a partir del calor corporal humano planteaba una serie de desafíos y problemáticas únicas en el contexto de esta investigación. En primer lugar, se encontraba la limitación inherente en la eficiencia de la conversión de calor corporal en electricidad. Esta limitación se manifestaba en la capacidad reducida para transformar el calor producido por el cuerpo humano en energía eléctrica utilizable. Dicha baja eficiencia representaba un obstáculo significativo para la viabilidad y adopción generalizada de esta tecnología, ya que se requerían mejoras sustanciales en este aspecto para aprovechar al máximo el calor corporal como fuente de energía.

Otro desafío crucial que se planteaba radicaba en la selección de materiales termoeléctricos adecuados. Esto implicaba la necesidad de encontrar materiales que no solo fueran eficientes en la conversión de calor en electricidad, sino que también fueran seguros y biocompatibles con el cuerpo humano. La búsqueda de tales materiales se convertía en un aspecto esencial, pero presentaba dificultades inherentes debido a las restricciones de biocompatibilidad y a la necesidad de conjugar propiedades termoeléctricas óptimas.

Además, el diseño y optimización de dispositivos termoeléctricos para su aplicación en el cuerpo humano se presentaba como un desafío técnico importante. La geometría de estos generadores, su capacidad para mantener una temperatura adecuada y la seguridad en términos de contacto con la piel eran factores críticos que requerían una consideración meticulosa. Estos dispositivos debían cumplir con criterios de comodidad y seguridad para su uso a largo plazo, lo que demandaba una atención minuciosa al diseño y la optimización.

La adaptación de esta tecnología a aplicaciones específicas relacionadas con la salud y el bienestar humano, como dispositivos portátiles de monitoreo de la salud, planteaba desafíos adicionales. Cada aplicación exigía soluciones personalizadas que respondieran a necesidades y demandas específicas, lo que agregaba una capa de complejidad al desarrollo y la implementación de generadores termoeléctricos basados en el calor corporal humano. La investigación se enfrentó a estos desafíos con el objetivo de abordar las limitaciones existentes y avanzar en la explotación efectiva de esta fuente de energía potencialmente valiosa.

2.3. IMAGEN INTEGRADORA



Fuente: Elaboración Propia.

El esquema presenta una secuencia detallada de pasos relacionados con la utilización de aleaciones metálicas para la generación de energía mediante el efecto Seebeck. Este fenómeno físico se manifiesta cuando dos metales o semiconductores con temperaturas divergentes se encuentran en unión. En tal escenario, se origina una disparidad de voltaje entre dichos materiales. Las aleaciones en cuestión serán sometidas a distintas temperaturas, abarcando incluso la temperatura corporal media humana. La cuantificación del voltaje generado en cada aleación a diferentes niveles térmicos constituirá un aspecto clave del análisis. Este procedimiento permitirá evaluar de manera precisa la respuesta de cada aleación ante variaciones térmicas específicas, con especial atención a la variación térmica representativa de la temperatura corporal humana promedio. Esto, permitirá comprender la potencial aplicación de este efecto físico para la alimentación de dispositivos aprovechando el calor corporal como potencial fuente de alimentación a biodispositivos de bajo consumo.

2.4. TABLA DE LIMITACIONES

Se identificaron múltiples limitaciones con respecto a los trabajos de distintos autores que desarrollaron temáticas similares o relativas a los resultados y aplicaciones del efecto Seebeck, se estableció condensar los resultados de catorce de estos trabajos (Tabla 1).

Tabla 1. Limitaciones

AUTOR(ES)	PAÍS DE ESTUDIO	ENFOQUE DEL ESTUDIO	TIPO DE LIMITACIÓN	DETALLE DE LIMITACIÓN
Bose et al., 2021	No se encontró país	El estudio se enfoca en desarrollar un convertidor elevador de autoinicio de un solo inductor con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para la conversión de energía térmica del calor corporal mediante un generador termoeléctrico (TEG).	La limitación principal se refiere a la baja tensión de entrada de 3.5 mV y la necesidad de autoinicio del convertidor a esta baja tensión. También se aborda el reto de maximizar la eficiencia en un rango de voltajes de entrada de 15-100 mV.	La limitación detallada consiste en lograr eficiencia y autoinicio óptimos en el convertidor con tensiones de entrada tan bajas como 3.5 mV. Se exploran diversas arquitecturas y técnicas, como el uso de un MPPT consciente de las pérdidas y una arquitectura de doble vía, para abordar esta limitación y lograr un funcionamiento eficiente y de autoinicio en tales condiciones.
Brogan & Ha, 2019	Estados Unidos	El enfoque de estudio es el diseño de un convertidor de refuerzo de una sola etapa para la recolección de energía a partir del calor corporal.	Este estudio enfrenta una limitación relacionada con la recolección de energía térmica proveniente de generadores termoeléctricos (TEGs), los cuales generan tensiones de corriente continua (CC) bajas debido a gradientes de temperatura reducidos.	Una limitación más detallada radica en la necesidad de utilizar un convertidor CC-CC o una bomba de carga para elevar las tensiones de entrada generadas por los TEGs a niveles adecuados para alimentar dispositivos. Además, la variabilidad de la impedancia de origen en los TEGs, influenciada por su construcción, requiere una coincidencia precisa con esta impedancia por parte del circuito de gestión de energía para lograr la transferencia de potencia máxima.

AUTOR(ES)	PAÍS DE ESTUDIO	ENFOQUE DEL ESTUDIO	TIPO DE LIMITACIÓN	DETALLE DE LIMITACIÓN
Proto et al., 2021	Republica Checa	El enfoque del estudio se centró en investigar la técnica de recolección de energía a partir del calor corporal para suministrar energía a dispositivos vestibles y reconocer actividades motoras.	El tipo de limitación abordada en el estudio fue la vida útil de la batería en dispositivos vestibles utilizados para monitorear actividades motoras en pacientes con trastornos motores.	Una limitación identificada es la vida útil limitada de las baterías en dispositivos vestibles para el monitoreo de pacientes con trastornos motores. Para abordar esto, se exploró el uso de generadores termoeléctricos flexibles en las piernas para capturar calor corporal y proporcionar energía a los dispositivos. Se realizaron experimentos con estudiantes universitarios y se desarrolló un modelo matemático para rastrear señales del generador termoeléctrico en relación con actividades motoras.
Bose et al., 2020	Estados Unidos	El enfoque se centra en desarrollar un sistema en chip (SoC) para detectar latidos cardíacos sin batería, utilizando el calor corporal como fuente de energía. El objetivo es la detección precisa y adaptativa de latidos cardíacos, incluso en presencia de artefactos de movimiento, mediante una arquitectura basada en un lazo de bloqueo de ancho de pulso (PWLL).	La limitación del estudio es la escasa disponibilidad de energía generada a partir del calor del cuerpo humano. A pesar de utilizar un generador termoeléctrico (TEG) junto con un convertidor de refuerzo y un sistema de gestión de energía, el gradiente de temperatura entre la piel y el ambiente proporciona solo unos pocos milivoltios de voltaje de entrada.	La limitación detallada radica en que la escasa disponibilidad de energía térmica requiere un diseño eficiente del circuito de conversión de voltaje para aprovechar al máximo dicha energía. Además, el arranque automático desde una fuente de energía tan baja plantea desafíos adicionales en el diseño del sistema. A pesar de que el sistema puede operar con 20 mV y 20 μ W, la limitación de energía puede afectar el rendimiento en aplicaciones prácticas.

AUTOR(ES)	PAÍS DE ESTUDIO	ENFOQUE DEL ESTUDIO	TIPO DE LIMITACIÓN	DETALLE DE LIMITACIÓN
Tabaie & Omidvar, 2023	Irán	El estudio revisó avances, desafíos y perspectivas de generadores termoeléctricos impulsados por calor corporal como fuente de energía para dispositivos portátiles.	La limitación se relaciona con la falta de pruebas experimentales en seres humanos por parte de los autores, ya que se centraron en una revisión de literatura.	La limitación detallada radica en la falta de datos empíricos directos, dado que el estudio se basó en información existente de estudios previos. Los resultados y recomendaciones dependen de la calidad de los datos disponibles en la literatura revisada.
Yuan & Zhu, 2019	China	El estudio se enfoca en desarrollar una pulsera portátil con un generador termoeléctrico flexible (FTEG) que aprovecha el calor corporal para alimentar dispositivos electrónicos y sensores portátiles	La limitación abordada es la baja densidad de potencia de los FTEG montados en el cuerpo, lo que dificulta su uso para alimentar dispositivos electrónicos personales y sistemas de monitoreo portátiles.	La limitación detallada se refiere a la baja potencia de salida de los FTEG existentes. Aunque se han utilizado materiales termoeléctricos como Bi ₂ Te ₃ , la potencia generada sigue siendo insuficiente para alimentar adecuadamente los dispositivos portátiles.
Tanwar et al., 2021	Irlanda	El estudio se enfoca en optimizar el diseño de un generador micro-termoeléctrico para dispositivos biomédicos portátiles.	La limitación abordada es la alta resistencia térmica entre la piel y el dispositivo, lo que reduce los gradientes de temperatura y, por lo tanto, la generación de energía.	La limitación detallada se refiere al bajo gradiente de temperatura (2-10 K) debido a la alta resistencia térmica entre la piel y el dispositivo. El estudio busca mejorar la potencia de salida mediante la optimización del diseño, incluyendo factores como la geometría de los pilares termoeléctricos y los materiales de interconexión.
Sese et al., 2016	Filipinas	En explorar la posibilidad de generar energía eléctrica a partir del calor corporal durante diversas actividades físicas utilizando baldosas de Peltier y circuitos de ladrón de Joule.	Fue la capacidad limitada de generar energía eléctrica con las baldosas de Peltier y los circuitos de ladrón de Joule.	Los valores de voltaje y corriente obtenidos fueron bajos y no fueron suficientes para cargar completamente una batería de 1000 mAh en un tiempo razonable. Esto indica una restricción en la capacidad de generación de energía eléctrica con esta tecnología en el contexto del estudio.

AUTOR(ES)	PAÍS DE ESTUDIO	ENFOQUE DEL ESTUDIO	TIPO DE LIMITACIÓN	DETALLE DE LIMITACIÓN
Wongjom et al., 2020	Tailandia	Diseñar un sistema experimental de bajo costo para investigar el efecto Spin Seebeck y el transporte eléctrico en materiales termoeléctricos.	La falta de sistemas experimentales adecuados para investigar el rendimiento a temperatura ambiente de los materiales termoeléctricos.	Falta de acceso a sistemas de medición versátiles, baratos y fáciles de implementar, que son necesarios para facilitar los esfuerzos de investigación y exploración de nuevos materiales que exhiben el efecto Spin Seebeck a temperatura ambiente.
Park & Huh et al., 2012	Corea del Sur	Investigar el uso de elementos Seebeck en el sistema de enfriamiento de sistemas de iluminación LED para mejorar su eficiencia y capacidad de disipación de calor.	Se compararon diferentes sistemas de enfriamiento para los LED, pero se enfocó principalmente en los elementos Seebeck y los elementos Peltier, sin explorar otras tecnologías de enfriamiento existentes.	Una limitación del estudio es que no se abordaron exhaustivamente otras consideraciones, como el costo, la durabilidad y la viabilidad práctica de implementar los diferentes sistemas de enfriamiento en aplicaciones reales de iluminación LED.
Kirihara et al., 2014	Japón	El estudio se enfoca en desarrollar convertidores termoeléctricos basados en el efecto Spin Seebeck (SSE) que convierten el gradiente térmico en corriente eléctrica usando materiales magnéticos y películas metálicas con alta interacción espín-órbita.	La limitación aquí es la eficiencia baja (TEC de 1 mV/K) del método de deposición de películas basado en la descomposición orgánica de metales (MOD). Esto se debe a la pequeña diferencia de temperatura y propiedades de los materiales.	

AUTOR(ES)	PAÍS DE ESTUDIO	ENFOQUE DEL ESTUDIO	TIPO DE LIMITACIÓN	DETALLE DE LIMITACIÓN
Luna-Soto, et al. 2018	México	Analizar y evaluar las celdas Peltier como fuente de energía alternativa	La limitación principal de este estudio es la disponibilidad de recursos financieros y tecnológicos para llevar a cabo investigaciones exhaustivas y experimentos a gran escala con las celdas Peltier.	La falta de financiamiento adecuado puede restringir la capacidad de realizar investigaciones detalladas sobre el rendimiento y la eficiencia de las celdas Peltier en diferentes condiciones ambientales y de operación. Además, la falta de acceso a equipos y laboratorios especializados puede limitar la capacidad de llevar a cabo experimentos rigurosos para validar los resultados obtenidos en el estudio.
Balseca Sampedro et al., 2022	México	Investigar y analizar el diseño de un sistema de captación de agua pluvial para uso doméstico en el contexto mexicano.	La limitación principal de este estudio radica en la disponibilidad limitada de datos precisos y actualizados sobre los patrones de precipitación y el comportamiento de los recursos hídricos en diferentes regiones de México	La falta de datos climáticos actualizados dificulta la evaluación de sistemas de captación de agua pluvial en México. La escasez de información sobre recursos hídricos y demanda de agua complica la estimación de su capacidad y rendimiento

Fuente: Elaboración Propia

III.OBJETIVOS

Este capítulo detalla los objetivos definidos para el desarrollo de la investigación, los cuales proporcionan una base sólida para las metodologías implementadas y los análisis contemplados a realizar.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema termoeléctrico basado en el efecto Seebeck para transformar la energía térmica en energía eléctrica mediante la utilización de distintas aleaciones.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar dispositivos experimentales para la medición del voltaje generado por cada aleación bajo distintos gradientes de temperatura.
- Identificar la aleación con mayor eficiencia termoeléctrica para la conversión de calor en energía eléctrica a través de una evaluación comparativa de las propiedades termoeléctricas de las aleaciones utilizadas.
- Analizar la viabilidad del prototipo termoeléctrico como fuente sostenible de energía eléctrica a partir del calor, mediante la realización de pruebas prácticas que permitan cuantificar su eficiencia y validar su funcionamiento en condiciones realistas.

IV. MÉTODOS

En este capítulo se expone de manera explícita el enfoque y las metodologías adoptadas para el desarrollo de la investigación. Se definen las variables de investigación y su impacto en las mediciones y pruebas realizadas. Además, se detalla la metodología de estudio y se describen las métricas de evaluación que son esenciales para determinar la efectividad en el proceso de transformación de energía a través del efecto Seebeck. Se presenta una imagen del proceso que sintetiza las etapas de todo el proyecto y se incluyen las aleaciones y materiales necesario para realizar las mediciones respectivas.

4.1. ENFOQUE

En este abordaje experimental, se llevaron a cabo experimentos y pruebas sistemáticas con el objetivo de adquirir datos empíricos y validar hipótesis formuladas. Se procedió al diseño y construcción de un prototipo de sistema de generación termoeléctrica destinado a aprovechar el calor endógeno del cuerpo humano. Durante la ejecución del protocolo experimental, se realizaron mediciones precisas de variables críticas como la temperatura, el voltaje y la corriente, bajo diversas condiciones, incluyendo variaciones controladas de la temperatura corporal. Los conjuntos de datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico riguroso con el propósito de evaluar el rendimiento del sistema y validar la eficiencia de la conversión de energía térmica en energía eléctrica. (Tabla 2).

4.1.1. MODELO EXPERIMENTAL

Tabla 2. Metodología planteada.

ETAPA DEL MODELO EXPERIMENTAL	DESCRIPCIÓN
Diseño del prototipo del sistema de generación termoeléctrica	En esta etapa, se diseñó y construyó un prototipo del sistema que aprovechaba el calor corporal humano mediante el efecto Seebeck. Se determinaron los materiales utilizados, las dimensiones y la configuración del sistema, considerando los requisitos de eficiencia y seguridad.
Recopilación de datos	Se realizaron mediciones de temperatura, voltaje y corriente en diferentes condiciones experimentales. Se emplearon sensores y equipos de medición adecuados para registrar los datos relevantes durante las pruebas experimentales.
Análisis estadístico de los datos	Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis estadístico exhaustivo. Se utilizaron técnicas estadísticas para evaluar el rendimiento del sistema y se calcularon medidas de eficiencia, como la eficiencia de conversión de energía térmica a energía eléctrica. Además, se realizó un análisis de la variación de los resultados en función de las variables controladas.
Verificación de la eficiencia de la conversión de energía	Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores teóricos esperados. Se verificó la eficiencia de la conversión de energía térmica en energía eléctrica, evaluando la correspondencia entre los datos experimentales y los cálculos teóricos
Optimización del diseño del sistema	Basándose en los resultados y análisis previos, se realizaron ajustes y mejoras en el diseño del sistema de generación termoeléctrica. Se buscaron oportunidades de optimización para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema, considerando factores como la selección de materiales, la geometría y las condiciones operativas.
Conclusiones y recomendaciones	Se elaboraron conclusiones basadas en los resultados obtenidos en el estudio experimental. Se identificaron los principales hallazgos y se presentaron recomendaciones para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas del sistema de generación termoeléctrica, considerando posibles mejoras y áreas de enfoque adicionales.

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

La variable independiente, también denominada variable explicativa o predictor en el contexto de la investigación científica, se define como la condición o factor que se manipula o controla deliberadamente en un experimento o estudio. Esta variable se presume que ejerce un efecto o influencia sobre otra variable, llamada variable dependiente.

En un enfoque científico, el investigador modifica la variable independiente con el propósito de observar y analizar cómo dicha modificación afecta la variable dependiente. Esta última, también conocida como variable de resultado o variable de respuesta, se considera influenciada o afectada por la variable independiente en cuestión (Ilustración 1).

4.2.1. VARIABLES DEPENDIENTES

- Metales seleccionados para termocuplas: La selección de los metales adecuados es crucial debido a que el efecto Seebeck, responsable de la generación de voltaje en las termocuplas, varía significativamente según los materiales utilizados. Entre las elecciones comunes se encuentran el cromel-constantán, hierro-constantán y cromel-alumel. Las características termoeléctricas de estos metales les confieren la capacidad de generar un voltaje significativo en respuesta a las discrepancias de temperatura entre las uniones de la termocupla.
- Temperatura aplicada: representa la magnitud de la energía térmica proporcionada a las termocuplas. La temperatura aplicada influye directamente en la diferencia de temperatura entre las uniones de la termocupla, lo que a su vez afecta la magnitud del voltaje generado de acuerdo con el efecto Seebeck. La variación en la temperatura aplicada permite explorar cómo las termocuplas responden a diferentes niveles de calor, lo que proporciona una comprensión más profunda de su rendimiento y su capacidad para medir y registrar la temperatura en diversas condiciones. (Ilustración 1).

4.2.2. VARIABLE INDEPENDIENTE:

- Voltaje obtenido en termocuplas: hace referencia a la diferencia de potencial eléctrico medida entre los extremos de la termocupla cuando se expone a una variación en la temperatura de la unión de dos materiales diferentes. Este voltaje es una medida de la

diferencia de temperatura entre los puntos de medición y se genera como resultado del efecto Seebeck, el cual produce una corriente eléctrica en respuesta a un gradiente térmico aplicado a la termocupla.

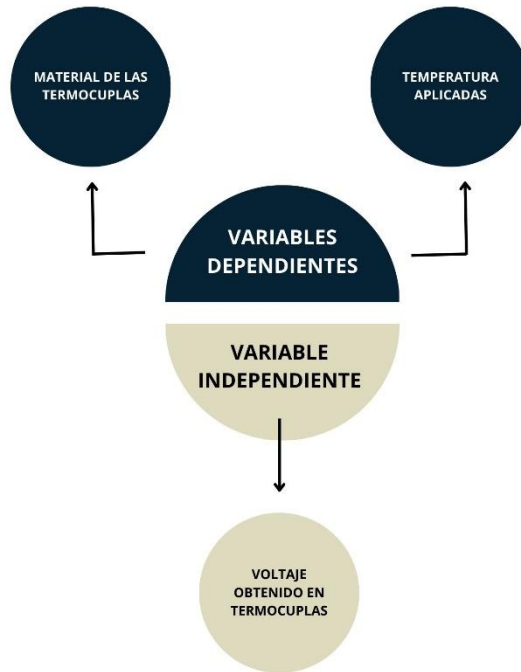


Ilustración 1. Diagrama de Variables

Fuente: Elaboración propia

4.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 3. Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Voltaje obtenido en termocuplas	Las mediciones y análisis del voltaje en termocuplas constituyen la evaluación cuantitativa del fenómeno derivado del efecto Seebeck. Este efecto, caracterizado por la generación de una diferencia de potencial eléctrico al someter a la unión de dos materiales diversos a un gradiente térmico, establece la base para la generación de voltaje en las termocuplas. La definición conceptual radica en la cuantificación del voltaje resultante de este efecto termoeléctrico.	La dimensión del voltaje obtenido en termocuplas abarca la variabilidad cuantitativa de este parámetro en respuesta a las disparidades de temperatura entre las regiones caliente y fría de la termocupla. Además, se consideran dimensiones experimentales, como las condiciones de prueba y los materiales empleados, que pueden influir en la magnitud y comportamiento del voltaje.	Los indicadores cruciales comprenden la magnitud y la variación del voltaje generado en función de las condiciones experimentales específicas. Los coeficientes de Seebeck y la respuesta termoeléctrica de los materiales utilizados constituyen indicadores fundamentales. La evaluación de la variabilidad del voltaje en condiciones experimentales diversas proporciona información valiosa para discernir la influencia de otros factores en el fenómeno estudiado.
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Metales seleccionados para termocuplas	La selección de los metales adecuados es crucial debido a que el efecto Seebeck, responsable de la generación de voltaje en las termocuplas, varía significativamente según los materiales utilizados. Entre las elecciones comunes se encuentran el cromel-constantán, hierro-constantán y cromel-alumel. Las características termoeléctricas de estos metales les confieren la capacidad de generar un voltaje significativo en	La selección de metales para las termocuplas se dimensiona en función de las propiedades termoeléctricas inherentes a cada combinación. La diversidad en estas propiedades contribuye a la variabilidad en la generación de voltaje en respuesta a cambios térmicos. Las dimensiones también abarcan consideraciones prácticas, como la disponibilidad y la	Los indicadores clave incluyen las propiedades termoeléctricas específicas de cada combinación de metales, como coeficientes de Seebeck y conductividades térmicas. La capacidad de generación de voltaje en función de las diferencias de temperatura se convierte en un indicador crítico del rendimiento. Además, la idoneidad de los materiales elegidos se evalúa

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Temperatura aplicada	<p>respuesta a las discrepancias de temperatura entre las uniones de la termocupla.</p> <p>Representa la magnitud de la energía térmica proporcionada a las termocuplas. La temperatura aplicada influye directamente en la diferencia de temperatura entre las uniones de la termocupla, lo que a su vez afecta la magnitud del voltaje generado de acuerdo con el efecto Seebeck.</p>	<p>capacidad de fabricación de las combinaciones elegidas.</p> <p>La dimensión de la temperatura aplicada implica la variedad de niveles térmicos empleados para evaluar las termocuplas. Esta dimensión también abarca el método de aplicación y control de la temperatura, utilizando equipos como termopares y termómetros para garantizar mediciones precisas y reproducibles.</p>	<p>mediante indicadores prácticos, como la estabilidad térmica y la resistencia a la corrosión.</p> <p>Los indicadores relevantes se centran en la respuesta termoeléctrica de las termocuplas ante diferentes temperaturas. Esto incluye la variación en el voltaje generado en relación con las discrepancias térmicas. La precisión y estabilidad en la medición de la temperatura, mediante el uso de termopares y termómetros, constituyen indicadores cruciales para la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.4. OBJETIVO DEL MÉTODO

A continuación, se presenta una tabla metodológica que describe los procesos de la investigación, su propósito, así como los recursos, instrumentos o técnicas utilizados para llevar a cabo el estudio.

Tabla 4. Objetivo del Método

MÉTODO	OBJETIVO	TÉCNICA O INSTRUMENTO
Experimento	Realizar experimentos con diversos materiales con el fin de analizar y medir las disparidades de voltaje generadas al aplicar calor a las uniones de dichos materiales.	Alambre Cromel, constantán y hierro
Simulación	Analizar y evaluar el rendimiento y la eficiencia de los generadores termoeléctricos en variados escenarios. El objetivo primordial es obtener información acerca de la eficiencia energética y la capacidad de generación de electricidad de los dispositivos termoeléctricos.	Multisim, Proteus
Análisis	Examinar los resultados obtenidos tanto en los experimentos realizados como en las simulaciones llevadas a cabo.	Amperímetro, Osciloscopio, pirómetro, multímetro, resistencia (estufa eléctrica)

4.5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Para la realización de este proyecto, se llevó a cabo una exhaustiva investigación en diversas fuentes en línea, que incluyeron IEEE Xplore, ACM Digital Library, IOPscience, Scitation - AIP Publishing y MDPI - Publisher of Open Access Journals. El objetivo de esta investigación fue identificar equipos y nuevas tecnologías relacionadas con el efecto Seebeck y comprender en qué áreas se había trabajado previamente con este fenómeno y en qué aplicaciones se había utilizado.

Tras la investigación inicial sobre el efecto Seebeck, se procedió a considerar cómo aplicar este fenómeno y con qué propósito. Con base en la literatura encontrada y revisada, se identificaron los materiales adecuados para llevar a cabo las mediciones y aplicaciones. En el transcurso de la revisión de la literatura, se identificaron varios tipos de materiales, y se consideraron aspectos como el rango de temperatura, el elemento positivo y el elemento negativo.

Entre los materiales que extraje fueron de termocuplas que se encontraron en la investigación diferentes termocuplas disponibles en el país, se seleccionaron las siguientes: Tipo K, Tipo J, Tipo E. Estas que están compuesto que son los metales que se encuentran dentro de la termocupla, luego se hizo la unión de los materiales y así poder realizar los dispositivos Seebeck para realizar mediciones del calor corporal de individuos a diferentes temperaturas dependiendo de la persona, se hizo 3 grupos de 5 personas donde cada grupo de 5 tenía un dispositivo, un grupo con Cromel-alumel, otro con Hierro-Constantán y el ultimo con Cromel-Constantán dependiendo de la persona. El objetivo principal era estudiar y medir el calor corporal de manera precisa.

Al realizar los dispositivos se conectaron a un amperímetro y que proporcionó mediciones a través de los 2 metales, otro amperímetro que mide la temperatura corporal. Las mediciones se presentaron en mili voltios y posteriormente se amplificaron a voltaje para analizar si había una variación en el voltaje en función de diferentes niveles de temperatura.

4.6. IMAGEN DEL PROCESO

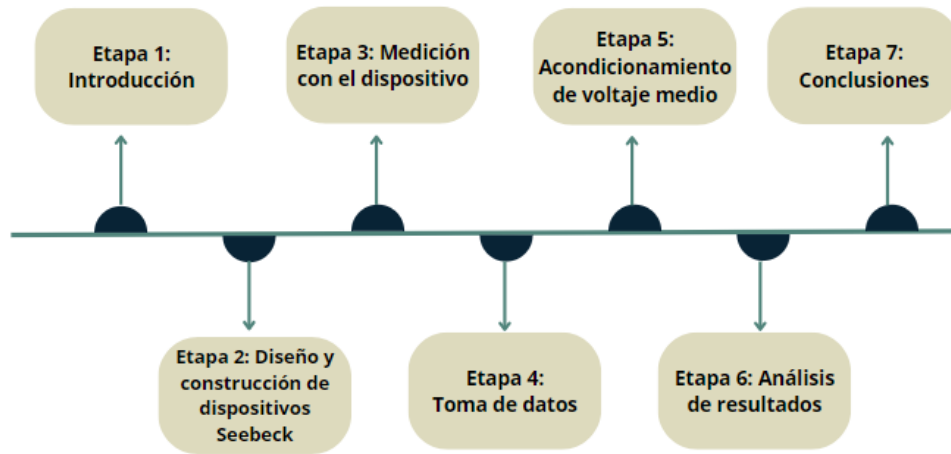


Ilustración 2. Imagen de proceso.

Fuente: Elaboración propia

- **Etapa 1 – Introducción:** En esta etapa se establece el contexto y los objetivos de la investigación sobre la conversión de energía térmica del calor corporal humano mediante el efecto Seebeck.
- **Etapa 2 - Diseño y Construcción de Dispositivos Seebeck:** En esta etapa se lleva a cabo el diseño y la construcción de los dispositivos Seebeck, que son los encargados de aprovechar la energía térmica y convertirla en energía eléctrica mediante el efecto Seebeck.
- **Etapa 3 - Medición con el Dispositivo:** En esta etapa se realiza la medición de los dispositivos Seebeck para evaluar su rendimiento y eficiencia en la conversión de energía térmica a energía eléctrica. Se utilizan técnicas y equipos de medición adecuados.
- **Etapa 4 - Toma de Datos:** En esta etapa se recopilan los datos obtenidos durante las mediciones realizadas con los dispositivos Seebeck. Estos datos son necesarios para realizar un análisis y evaluación posterior.
- **Etapa 5 - Acondicionamiento de Voltaje Medido:** En esta etapa se realiza el acondicionamiento del voltaje medio obtenido a partir de la conversión de energía térmica. Esto puede incluir el uso de circuitos y componentes electrónicos para ajustar y estabilizar el voltaje.

- **Etapa 6 - Análisis de Resultados:** En esta etapa se lleva a cabo el análisis de los resultados obtenidos a partir de los datos recopilados. Se evalúa el rendimiento de los dispositivos Seebeck y se realizan comparaciones y conclusiones basadas en los resultados.

- **Etapa 7 – Conclusiones:** En esta etapa se presentan las conclusiones derivadas del análisis de resultados. Se resumen los hallazgos y se discuten las implicaciones de la investigación, incluyendo posibles mejoras o aplicaciones futuras

4.7 POBLACIÓN Y MUESTRA

Se realizaron quince mediciones cada una con participantes distintos. De estos, cuatro individuos son de género masculino, mientras que once fueron clasificados como pertenecientes al género femenino. La muestra de participantes incluyó individuos de diversas edades, que abarcan desde personas jóvenes hasta mayores, con el objetivo de examinar el comportamiento de diferentes dispositivos.

4.8 MATERIALES UTILIZADOS

4.8.1. Cromel-Constantán

En la primera descripción, el conductor positivo estuvo compuesto principalmente de una aleación de níquel-cromo conocida como Cromel, mientras que el conductor negativo se fabricó utilizando la aleación Constantán. Estos materiales proporcionaron una combinación óptima de conductividad térmica, resistencia y estabilidad.

4.8.2. Hierro-Constantán

En la segunda descripción, se optó por utilizar el hierro como material principal para el conductor positivo, combinado con la aleación Constantán para el conductor negativo. La combinación de hierro-Constantán ofreció una respuesta térmica eficiente, mientras que el Constantán aseguró la estabilidad a largo plazo.

4.8.3. Cromel-alumel

En la tercera descripción, se empleó la aleación de níquel-cromo (Cromel) para el conductor positivo y la aleación níquel-aluminio (Alumel) para el conductor negativo. Estos materiales ofrecieron una combinación equilibrada de características, como una respuesta térmica

eficiente y una estabilidad a largo plazo. La termocupla tipo K resultante fue idónea para aplicaciones que requerían mediciones precisas en un rango de temperatura de 0 a 600 grados Celsius.

4.8.4. Multímetro Truper MUT-202

El multímetro Truper MUT-202 ofrece un conjunto versátil de funciones de medición, abarcando voltaje de corriente continua (DC), corriente alterna (AC), resistencia, prueba de continuidad y medición de diodos. Con rangos específicos para cada función, como voltajes DC de 200 mV a 1000V y corrientes DC de 200 μ A a 10 A, proporciona una amplia capacidad de medición. La pantalla digital, destacada por su tamaño y legibilidad, puede incluir retroiluminación para condiciones de baja luminosidad. Características adicionales como retención de datos y apagado automático contribuyen a la eficiencia y conservación de la batería. Cumpliendo con estándares de seguridad eléctrica, este multímetro suele contar con certificación CAT para la protección contra sobretensiones. Se suministra con puntas de prueba y, en algunos casos, con la batería necesaria para su funcionamiento.

4.8.5. Multímetro BM818 True RMS 600UN

El multímetro BM818 True RMS 600UN ofrece funciones esenciales para mediciones eléctricas, abarcando corriente alterna (AC), corriente continua (DC), voltaje AC/DC, resistencia, continuidad y prueba de diodos, con capacidades adicionales de medición de frecuencia y capacidad en algunos modelos. La característica True RMS proporciona mediciones precisas en señales no sinusoidales, destacando su utilidad en entornos industriales con formas de onda complejas. Con un rango de medición de corriente de hasta 600 amperios, pantalla LCD de fácil lectura, y características como retención de datos, apagado automático, retroiluminación y capacidad de almacenamiento de mediciones, este multímetro digital garantiza eficiencia y comodidad en diversas aplicaciones eléctricas. Además, cumple con estándares de seguridad eléctrica, con clasificaciones de sobretensión y categoría CAT para indicar su uso seguro en diferentes

4.7. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN / VALIDACIÓN

- Mediciones de referencia: Se realizan mediciones de referencia utilizando una fuente de voltaje estable y conocida. El dispositivo de medición se conecta a esta fuente y se registran los valores medidos, luego se comparan con las lecturas del dispositivo para identificar desviaciones o errores.
- Amplificación del voltaje: En caso de amplificar el voltaje medido, se debe utilizar un amplificador adecuado y bien calibrado. La salida del amplificador se verifica con una señal de voltaje de referencia, comparando los resultados amplificados con los valores esperados.
- Mediciones de temperatura corporal: Se utiliza un termómetro confiable y calibrado para medir la temperatura corporal. Se siguen las instrucciones del fabricante para obtener mediciones precisas. Para validar la precisión, se pueden comparar estas mediciones con otros termómetros.
- Control de variables: Durante los experimentos, es importante controlar todas las variables relevantes que puedan afectar las mediciones. Esto incluye mantener condiciones ambientales estables, evitar interferencias electromagnéticas y realizar mediciones en un entorno adecuado.
- Replicación de experimentos: Se realizan mediciones y experimentos repetidos para obtener datos coherentes y confiables. Esto permite evaluar la reproducibilidad de los resultados y confirmar la precisión de las mediciones realizadas.

V. RESULTADOS

En este capítulo, se exponen los resultados derivados del estudio del Efecto Seebeck, empleando tres dispositivos heterogéneos. Cada una de las aleaciones fue meticulosamente elegida debido a sus propiedades termoeléctricas inherentes, y sometida a rigurosas pruebas experimentales para examinar la dinámica del voltaje generado en respuesta a variaciones en los gradientes de temperatura.

5.1. ESPECIFICACIONES DEL PROTOTIPO:

Las aleaciones empleadas en este estudio consistían en dos conductores, uno positivo y otro negativo, cada uno con funciones específicas. El conductor positivo se dedicaba a la medición de la temperatura en el punto de contacto con la aleación, mientras que el conductor negativo servía como referencia para garantizar la precisión en las mediciones térmicas. Las tres aleaciones empleadas fueron las siguientes:

- Cromel – Alumel: este dispositivo se clasifica como un termopar tipo K, el cual consta de dos conductores metálicos: el cromel (una aleación de níquel-cromo) como conductor positivo y el negativo alumel (una aleación de níquel-aluminio). Dentro de las propiedades termoeléctricas más importantes se encuentran:
 - Coeficiente de Seebeck: representa el voltaje generado por cada unidad de diferencia de temperatura en el material, su valor es de 41 microvoltios por centígrado, con una referencia de temperatura de 20°C.
 - Factor de potencia: indica la eficacia del material para poder convertir energía térmica en energía eléctrica. Su valor es de 2.6uW/cm*K².
 - Eficiencia de conversión (η): representa el porcentaje de energía térmica que se convierte a energía eléctrica, su rango va de 5 a 8%.
- Hierro – Constantan: este dispositivo se clasifica como un termopar tipo J. El conductor positivo es el hierro y el negativo el constantan (aleación de cobre y níquel). Dentro de sus propiedades termoeléctricas más relevantes:
 - Coeficiente de Seebeck: aproximadamente 53 microvoltios por centígrado, con una referencia de temperatura de 20°C.

- Factor de potencia: es de aproximadamente $2.5 \text{ uW/cm}^2\text{K}^2$
- Eficiencia de conversión (η): el rango está entre 5 a 8%.
- Cromel – Constantan: este dispositivo se considera un termopar tipo E. La aleación del conductor positivo es de cromo (aleación de níquel y cromo), y el conductor negativo es de constantan (aleación de cobre y níquel). Algunas de sus propiedades eléctricas más importantes:
 - Coeficiente de Seebeck: es de aproximadamente de 63 microvoltios por centígrado, con una referencia de temperatura de 20°C .
 - Factor de potencia: es de $6.5 \text{ uW/cm}^2\text{K}^2$.
 - Eficiencia de conversión (η): su rango abarca de 8% a 12%.

El voltaje generado por cada dispositivo se relaciona directamente con el efecto Seebeck, el cual establece que la diferencia de temperatura entre dos puntos de un conductor afectará la cantidad de voltaje producido. Esta generación de voltaje es característica de las aleaciones empleadas en el dispositivo, ya que cada una posee un coeficiente de Seebeck específico que determina su sensibilidad al gradiente térmico. Por consiguiente, la temperatura a la que se expone el dispositivo y las propiedades termoeléctricas de las aleaciones que lo componen son factores críticos que influyen en el voltaje generado.

En el presente documento, se detallan los ensayos realizados para cada una de las aleaciones mencionadas, acompañados de sus correspondientes gráficos que muestran el voltaje medido y amplificado. Estos gráficos ofrecen una representación visual de la respuesta termoeléctrica de cada termopar, suministrando información relevante sobre su desempeño en diversas condiciones térmicas.

5.2. FÓRMULA VOLTAJE GENERADO POR EFECTO SEEBECK

Existe una fórmula para calcular el voltaje generado por el efecto Seebeck en un termopar. La fórmula es la siguiente:

$$V = \alpha * (T_2 - T_1) \quad (1)$$

En dónde;

- **V** es el voltaje generado por el termopar
- **α** se refiere al coeficiente de Seebeck del material del termopar, este va a variar dependiendo de la aleación utilizada. Se expresa en mili voltios por centígrados (mV/C).
- **$T_2 - T_1$** se refiere a la diferencia de temperatura entre dos puntos del termopar, medida en kelvin. T_1 siempre va a ser 0.

5.3. CROMEL – ALUMEL

Durante el proceso de medición del dispositivo, se aplicaron diversas herramientas y técnicas con el fin de asegurar mediciones precisas y confiables. Además del uso del multímetro Fluke, reconocido por proporcionar lecturas de voltaje de alta precisión y fiabilidad, se empleó un pirómetro para la precisa medición de la temperatura del líquido donde se inmersó el termopar. Esta estrategia permitió el control y monitoreo minucioso de la temperatura del entorno de prueba.

Los resultados obtenidos a través de los cálculos aplicando la ecuación 1 revelaron magnitudes en un rango comprendido entre 1 y 2 mV para la aleación Cromel - Alumel (Tabla 5). Estos resultados fueron luego contrastados con las mediciones obtenidas durante el experimento físico. De manera complementaria, se implementó una resistencia para calentar el líquido de forma controlada, asegurando así que las mediciones se llevaran a cabo en condiciones consistentes y controladas, lo que minimizó posibles fuentes de error.

Se realizaron múltiples pruebas que variaban los grados de temperatura con el objetivo de evaluar exhaustivamente la respuesta del termopar Cromel-Alumel en diferentes condiciones térmicas. Estas pruebas abarcaron cambios graduales de temperatura, así como pruebas a temperaturas específicas para explorar el comportamiento del termopar en rangos térmicos

determinados. Los datos recopilados durante estas pruebas proporcionaron información valiosa sobre el rendimiento y la precisión del termopar en condiciones prácticas, facilitando una evaluación exhaustiva de su capacidad para medir y responder a cambios de temperatura en aplicaciones del mundo real.

Condiciones:

- Fórmula utilizada para el cálculo: $V = \alpha * (T_2 - T_1)$
- Coeficiente de Seebeck (Cromel – Alumel) = 41 $\mu\text{V}/\text{C}$ (41×10^{-6})
- T_1 siempre es 0 °C. En el análisis termoeléctrico, es frecuente utilizar 0 °C como una referencia estándar, generalmente en el proceso de generación de voltaje a partir de diferencias de temperatura. Esta práctica simplifica los cálculos y ofrece una base común para realizar comparaciones.

Tabla 5. Mediciones teóricas Aleación 1

TEMPERATURA (°C)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
28°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(28^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,489 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.148 mV
29°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(29^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,189 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.189 mV
30°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(30^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,230 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.23 mV
31°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(31^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,270 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.27 mV
32°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(32^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,132 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.31 mV
33°C	$= (41 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(33^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 1,353 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	1.35 mV

TEMPERATURA (°C)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
35°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(35^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,435 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.43 mV
36°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(36^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,476 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.47 mV
37°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(37^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,517 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.51 mV
38°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(38^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,558 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.558 mV
39°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(39^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,559 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.559 mV
40°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(40^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,640 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.640 mV
41°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(41^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,681 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.681 mV
42°C	$= (41 \frac{\mu V}{C})(42^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,722 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.722 mV

En el estudio realizado para determinar el voltaje generado por un termopar Cromel-Alumel bajo distintas condiciones térmicas, se calculó teóricamente el voltaje usando la ecuación $V = \alpha * (T_2 - T_1)$, en donde V es el voltaje generado, α representa el coeficiente de Seebeck específico de la aleación, que es de $41 \mu V/^{\circ}C$, y $T_2 - T_1$ la diferencia de temperatura entre los dos puntos de unión del termopar, con T_1 establecido en $0^{\circ}C$. Se observó que, con un aumento de la temperatura desde $35^{\circ}C$ hasta $42^{\circ}C$, el voltaje teóricamente calculado incrementaba proporcionalmente, variando desde aproximadamente 1.43 mV a 1.722 mV. Estos cálculos se

llevaron a cabo previamente a la experimentación, con la expectativa de que los valores teóricos coincidieran con los voltajes medidos durante los ensayos experimentales. (Tabla 5)

Tabla 6. Mediciones Aleación 1

GRADOS (°C)	VOLTAJE (mV)	VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)
28°C	1.10 mV	9.42 mV
29°C	1.14 mV	9.44 mV
30°C	1.20 mV	9.48 mV
31°C	1.26 mV	9.51 mV
32°C	1.28 mV	9.52 mV
33°C	1.30 mV	9.54 mV
34°C	1.37 mV	9.57 mV
35°C	1.42 mV	9.60 mV
36°C	1.44 mV	9.61 mV
37°C	1.49 mV	9.63 mV
38°C	1.52 mV	9.64 mV
39°C	1.58 mV	9.67 mV
40°C	1.63 mV	9.69 mV
41°C	1.66 mV	9.70 mV
42°C	1.71 mV	9.72 mV

En la serie de experimentos realizados para evaluar el comportamiento termoeléctrico de la aleación Cromel-Alumel, se sometió al termopar a una gama de temperaturas, desde los 28°C hasta los 42°C. Se registraron meticulosamente los voltajes inducidos por estas variaciones térmicas, reflejando los incrementos de voltaje correspondientes con cada grado centígrado ascendente. Los valores de voltaje medido directamente fluctuaron desde 1.10 mV a 1.71 mV. Paralelamente, se realizó un proceso de amplificación de la señal termoeléctrica para facilitar la medición y el análisis, resultando en voltajes amplificados que oscilaron entre 9.42 mV y 9.72 mV. (Tabla 6),

El análisis de la relación termoeléctrica para la aleación Cromel-Alumel se representó visualmente en un gráfico, el cual mostraba la dependencia del voltaje generado por el efecto

Seebeck en función de la temperatura. La representación gráfica reveló una tendencia lineal clara, confirmando la proporcionalidad directa entre el aumento de temperatura y el incremento en el voltaje producido por el termopar. Este comportamiento lineal se cuantificó a través de la ecuación de la recta $y = 0.0428x + 1.0641$ con un coeficiente de determinación, R^2 , de 0.9963, indicando una alta correlación entre las variables medidas. La pendiente de la línea, que refleja el coeficiente de Seebeck de la aleación, se aproximó a 41 microvoltios por grado Celsius, proporcionando un dato cuantitativo de la sensibilidad termoeléctrica del termopar Cromel-Alumel. Los hallazgos validaron la hipótesis inicial de que el voltaje generado aumentaría con la temperatura, corroborando así la efectividad del efecto Seebeck en la aleación utilizada. (Ilustración 3)

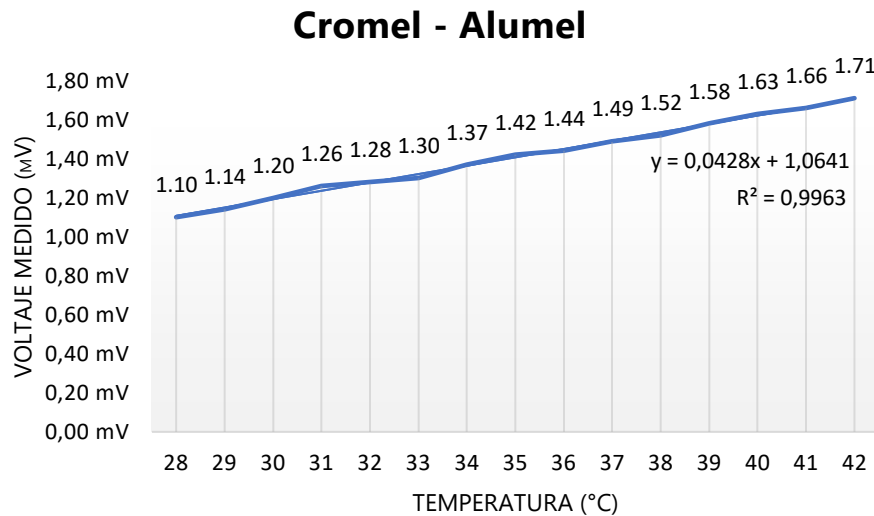


Ilustración 3. Aleación 1, voltaje medido

En el análisis del termopar Cromel-Alumel, se identificó una correlación lineal entre la temperatura y el voltaje amplificado. La medición directa del voltaje generado por el efecto Seebeck suele presentar dificultades debido a su reducida magnitud, por lo que se desarrolló y aplicó un circuito electrónico para amplificar dicho voltaje, facilitando su cuantificación. Este hallazgo sugiere que el coeficiente de Seebeck de la aleación Cromel-Alumel permaneció constante dentro del rango de temperaturas examinado. Además, la inclinación de la línea en el gráfico reflejó la sensibilidad del termopar ante las variaciones de temperatura, mostrando en este caso una sensibilidad moderada (Ilustración 4).

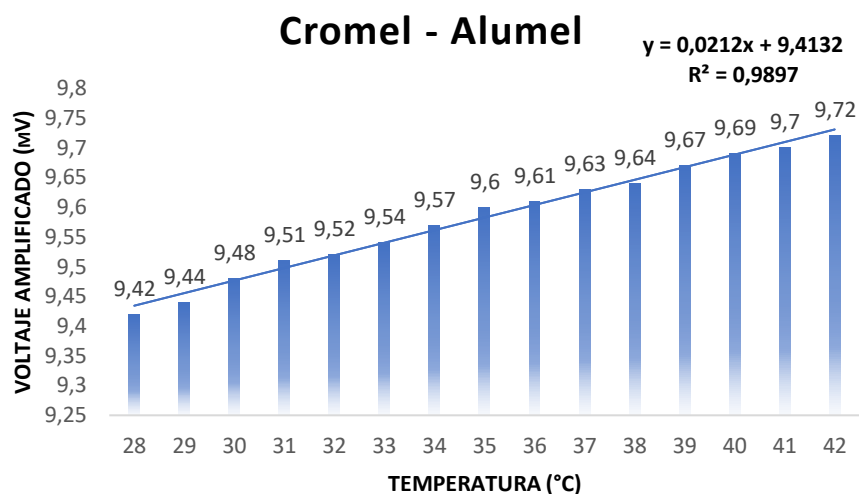


Ilustración 4. Aleación 1, voltaje amplificado

Estas aleaciones se caracterizan por su capacidad para operar eficientemente en un amplio espectro de temperaturas. Este rango abarca desde temperaturas extremadamente bajas hasta niveles muy elevados, por ejemplo, desde -200°C hasta 1000°C . Esta versatilidad minimiza la necesidad de reemplazar frecuentemente los termopares en diversas aplicaciones.

5.4. HIERRO – CONSTANTAN

Condiciones:

- Fórmula utilizada para el cálculo: $V = \alpha * (T_2 - T_1)$
- Coeficiente de Seebeck (Hierro - Constantan) = $53 \mu\text{V}/\text{C}$ (53×10^{-6})
- T_1 siempre es 0°C . En el ámbito de la termoelectricidad, comúnmente se establece el punto de referencia en 0°C al generar voltaje en respuesta a variaciones de temperatura. Esta elección simplifica los cálculos y facilita la comparación entre distintos datos y resultados.

Para los ensayos con la aleación Hierro-Constantan, se calculó el voltaje generado a través de la relación termoelectricidad definida por el coeficiente de Seebeck de $53 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Se empleó la ecuación termoelectricidad estándar $V = \alpha * (T_2 - T_1)$, donde V representa el voltaje generado, α el coeficiente de Seebeck, y $T_2 - T_1$ la diferencia de temperatura entre los dos puntos de contacto del termopar. Las mediciones teóricas, que abarcaban desde los 28°C hasta los 42°C , produjeron valores de voltaje calculado que empezaron en 1.489 mV y llegaron hasta 2.224 mV . Esta

progresión de voltaje, en función de las pruebas de temperatura, se registró y se presentó en detalle, mostrando un incremento constante conforme se elevaba la temperatura. Los valores teóricos calculados proporcionaron una base para comparar con las mediciones experimentales, anticipando que serían equivalentes o presentarían una mínima desviación. (Tabla 7)

Tabla 7. Mediciones teóricas Aleación 2

TEMPERATURA (°C)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
28°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(28^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,722 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.489 mV
29°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(29^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,537 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.537 Mv
30°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(30^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,590 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.590 mV
31°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(31^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1643 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.643 mV
32°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(32^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,696 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.696 mV
33°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(33^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,749 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.749 mV
34°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(34^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,802 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.802 mV
35°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(35^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,855 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.855 mV
36°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(36^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 1,908 mV (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	1.908 mV
38°C	$= (53 \frac{\mu V}{C})(38^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,014 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.014 mV

TEMPERATURA (°C)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
39°C	$= (53 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(39^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 2,067 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	2.067 mV
40°C	$= (53 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(40^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 2,120 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	2.120 mV
41°C	$= (53 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(41^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 2,173 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	2.173 mV
42°C	$= (53 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(42^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})$ $= 2,224 \mu\text{V} (\frac{1\text{mV}}{1,000\mu\text{V}})$	2.224 mV

Fuente: Elaboración propia

Durante los experimentos con la aleación Hierro-Constantan, se condujeron mediciones precisas para evaluar el voltaje generado al someter el termopar a un espectro de temperaturas entre 28°C y 42°C. Se midió tanto el voltaje directo como un voltaje amplificado, proporcionando una mayor claridad en la relación voltaje-temperatura. Las lecturas de voltaje directo demostraron un incremento sostenido, partiendo de 1.44 mV a 28°C y alcanzando 2.18 mV a 42°C, mientras que el voltaje amplificado reflejó una similar tendencia ascendente, con lecturas que se extendieron desde 9.61 mV hasta 9.86 mV en el mismo rango de temperatura. (Tabla 8. **Aleación 2, Voltaje medido**)

Tabla 8. Aleación 2, Voltaje medido

GRADOS (°C)	VOLTAJE (mV)	VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)
28°C	1.44 mV	9.61 mV
29°C	1.48 mV	9.63 mV
30°C	1.51 mV	9.64 mV
31°C	1.56 mV	9.66 mV
32°C	1.64 mV	9.70 mV
33°C	1.69 mV	9.72 mV
34°C	1.76 mV	9.74 mV

GRADOS (°C)	VOLTAJE (mV)	VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)
35°C	1.80 mV	9.76 mV
36°C	1.86 mV	9.78 mV
38°C	1.96 mV	9.81 mV
39°C	1.99 mV	9.82 mV
40°C	2.10 mV	9.84 mV
41°C	2.15 mV	9.86 mV
42°C	2.18 mV	9.86 mV

Se llevó a cabo un análisis cuantitativo del comportamiento termoeléctrico de la aleación Hierro-Constantan. Con los datos se confirmó una relación lineal robusta, donde el voltaje medido mostró un incremento proporcional ante el aumento de la temperatura. Con una pendiente de 0.055 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9958, se evidenció una alta sensibilidad de la aleación al gradiente térmico, congruente con las expectativas teóricas basadas en el efecto Seebeck. Esta sensibilidad se traduce en la capacidad del termopar de generar voltajes mensurables y precisos, adecuados para la medición y monitoreo de la temperatura. La pendiente junto con el valor de R^2 , proporciona una estimación precisa del coeficiente de Seebeck, situando a la aleación Hierro-Constantan como un material termoeléctrico eficiente. (Ilustración 5)

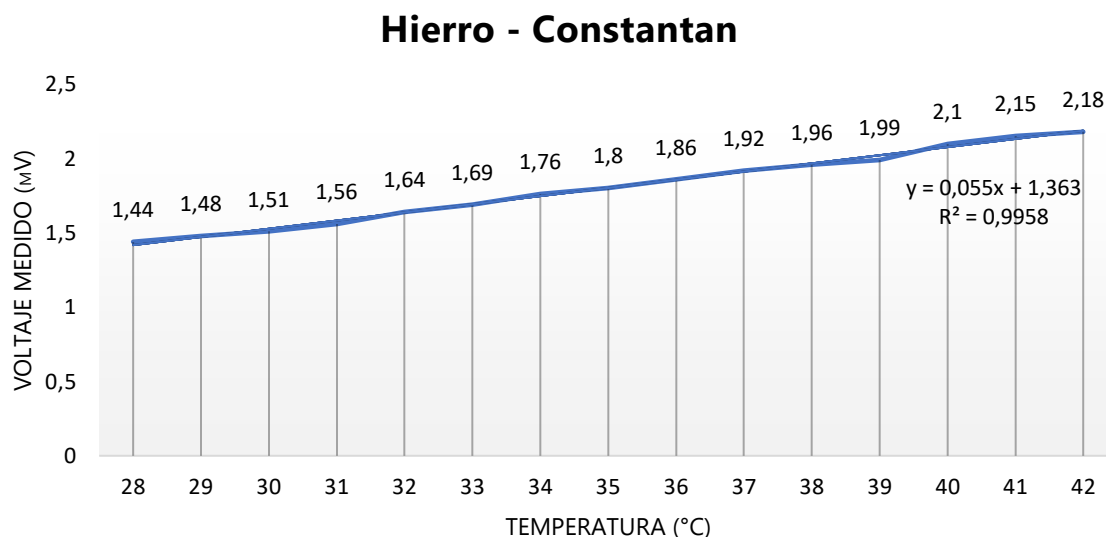


Ilustración 5. Aleación 2, voltaje medido

El análisis de los datos del voltaje amplificado demostró una correlación lineal entre las variables de temperatura y voltaje amplificado para el termopar Hierro-Constantan. La pendiente de la curva, más pronunciada en comparación con otras aleaciones estudiadas, señala una sensibilidad elevada de este material a las fluctuaciones de temperatura dentro del intervalo evaluado, evidenciando su eficacia en detectar incluso mínimas variaciones térmicas. Esta capacidad de respuesta detallada es crucial para aplicaciones que demandan alta precisión y reacción ágil a los cambios ambientales. La ecuación lineal $y = 0.0189x + 9.5972$ y el coeficiente de determinación, R^2 de 0.9838, subrayan una proporcionalidad casi perfecta, confirmando la previsibilidad y la consistencia del comportamiento termoeléctrico de la aleación en el rango de temperatura de 28°C a 42°C. (Ilustración 6)

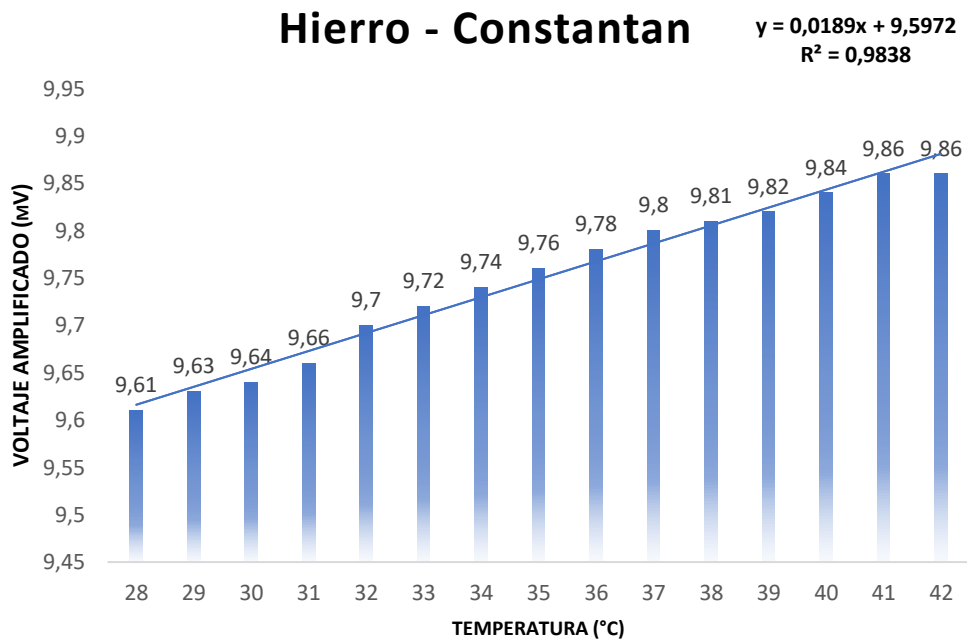


Ilustración 6. Aleación 2, voltaje amplificado

5.1. CROMEL – CONSTANTAN

Condiciones:

- Fórmula utilizada para el cálculo: $V = \alpha * (T_2 - T_1)$

- Coeficiente de Seebeck (Hierro - Constantan) = 63 $\mu\text{V}/\text{C}$ (63×10^{-6})
- T_1 siempre es 0 $^{\circ}\text{C}$. En el análisis termoeléctrico, es común usar 0 $^{\circ}\text{C}$ como punto de referencia al generar voltaje a partir de cambios de temperatura. Esto hace que los cálculos sean más simples y permite comparar fácilmente los resultados.

En el contexto del análisis termoeléctrico de la aleación Cromel-Constantan, se efectuaron cálculos para estimar el voltaje teórico generado en función de un rango de temperaturas que abarcaba desde los 28 $^{\circ}\text{C}$ hasta los 42 $^{\circ}\text{C}$. Se aplicó un coeficiente de Seebeck de 63 $\mu\text{V}/\text{C}$, inherente a dicha aleación, para calcular el voltaje según la fórmula $V = \alpha * (T_2 - T_1)$. En esta ecuación, V simboliza el voltaje estimado, α representa el coeficiente de Seebeck, y $T_2 - T_1$ denota la diferencia de temperatura entre los dos puntos de contacto en el termopar. Las temperaturas incrementales se correlacionaron con un ascenso en el voltaje calculado, evidenciando valores que comenzaban en 1.764 mV y concluían en 2.646 mV. Este procedimiento metodológico ofreció un marco de referencia para los ensayos prácticos, permitiendo contrastar los voltajes teóricos con los medidos y amplificados experimentalmente. (Tabla 9)

Tabla 9. Mediciones teóricas Aleación 3.

TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
28 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(28^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 1,764 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	1.764 mV
29 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(29^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 1,827 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	1.827 mV
30 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(30^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 1,890 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	1.890 mV
31 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(31^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 1,953 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	1.953 mV
32 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(32^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 2,016 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	2.016 mV
33 $^{\circ}\text{C}$	$= (63 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}})(33^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$ $= 2,079 \text{ uV} (\frac{1\text{mV}}{1,000\text{uV}})$	2.079 mV

TEMPERATURA (°C)	FÓRMULA DESARROLLADA	VOLTAJE CALCULADO
34°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(34^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,142 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.142 mV
35°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(35^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,205 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.205 mV
36°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(36^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,268 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.268 mV
37°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(37^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,331 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.331 mV
38°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(38^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,394 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.394 mV
39°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(39^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,457 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.457 mV
40°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(40^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,520 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.520 mV
41°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(41^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,583 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.583 mV
42°C	$= (63 \frac{\mu V}{C})(42^{\circ}C - 0^{\circ}C)$ $= 2,646 \mu V (\frac{1mV}{1,000\mu V})$	2.646 mV

Se ejecutaron experimentos meticulosos con la aleación Hierro-Constantan para documentar la variabilidad del voltaje inducido por el efecto Seebeck a medida que se alteraban las temperaturas de prueba. Las temperaturas se ajustaron de forma secuencial, registrando los correspondientes voltajes directos y amplificados, los cuales mostraron un patrón de crecimiento coherente con el incremento térmico. Los valores de voltaje directo experimentaron un incremento desde 1.67 mV a 2.53 mV en el rango de 28°C a 42°C. Simultáneamente, los voltajes

amplificados revelaron una progresión comparable, escalando desde 9.71 mV a 212.00 mV, lo que permitió comprender la consistencia y fiabilidad de las mediciones. (Tabla 10)

Tabla 10. Aleación 2, Voltaje medido

GRADOS °C	VOLTAJE (mV)	VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)
28°C	1.67 mV	9.71 mV
29°C	1.77 mV	9.75 mV
30°C	1.81 mV	9.76 mV
31°C	1.67 mV	9.71 mV
32°C	1.92 mV	9.80 mV
33°C	1.96 mV	9.81 mV
34°C	2.00 mV	9.82 mV
35°C	2.10 mV	9.84 mV
36°C	2.20 mV	9.87 mV
37°C	2.25 mV	9.88 mV
38°C	2.31 mV	9.89 mV
39°C	2.35 mV	9.89 mV
40°C	2.42 mV	9.91 mV
41°C	2.47 mV	209.00 mV
42°C	2.53 mV	212.00 mV

El análisis de los datos del termopar Cromel-Constantan revela una relación lineal entre la temperatura y el voltaje medido. A medida que la temperatura aumenta, se evidencia un incremento proporcional en el voltaje generado por el termopar. Estos resultados validan la sensibilidad del termopar Cromel-Constantan a las variaciones térmicas y su habilidad para producir voltajes mensurables en respuesta a dichos cambios. La pendiente proporciona una estimación del coeficiente de Seebeck de la aleación, el cual se ubica aproximadamente en 63 microvoltios por grado Celsius (Ilustración 7).

Cromel - Constantan

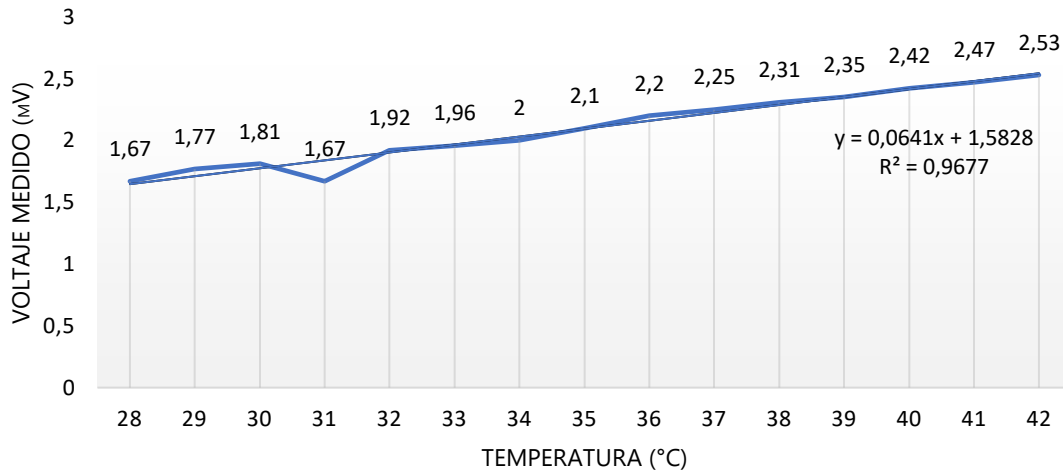


Ilustración 7. Aleación 3, voltaje medido

Se analizó retrospectivamente el comportamiento del voltaje amplificado en la aleación Cromel-Constantan bajo variaciones de temperatura. Se reflejó un incremento sustancial del voltaje amplificado al elevar la temperatura, ilustrando una capacidad notable de la aleación para discernir cambios térmicos, aun siendo estos de menor magnitud. La pendiente fue menos pronunciada hasta alcanzar los 40°C, momento en el cual se registró un aumento desproporcionado, posiblemente atribuido a una anomalía en el proceso de medición o amplificación. A pesar de este salto inesperado en los valores de voltaje amplificado hacia el final del rango de temperatura evaluado, la Cromel-Constantan mostró un coeficiente de Seebeck relativamente alto, indicando que el termopar era altamente eficaz en la generación de un voltaje más elevado en respuesta a incrementos modestos de temperatura. Este comportamiento sugiere una sensibilidad térmica superior en comparación con las aleaciones previamente mencionadas, favoreciendo su uso en aplicaciones donde la detección precisa de la temperatura es crucial. (Ilustración 8).

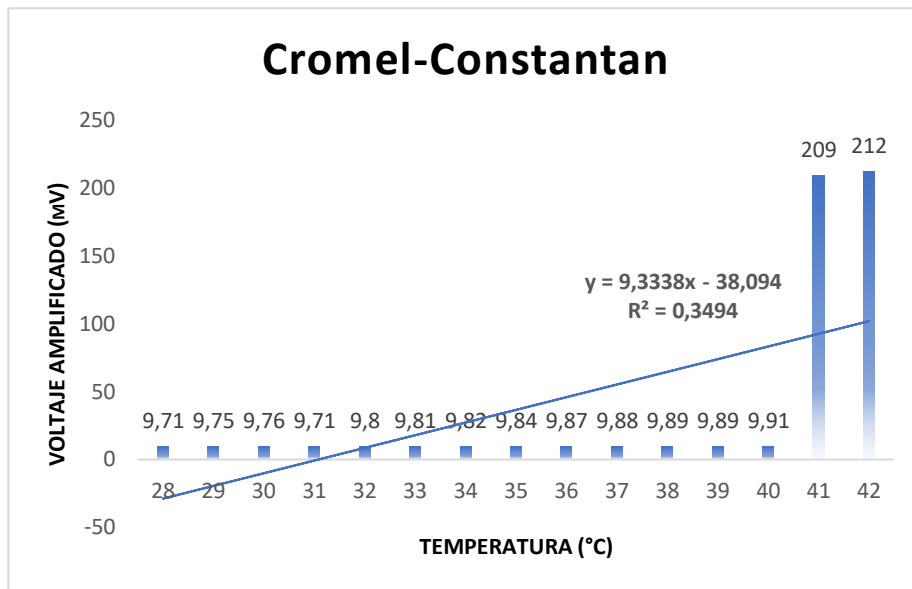


Ilustración 8. Aleación 3, voltaje amplificado

Cada una de las aleaciones utilizadas en los termopares presenta propiedades termoeléctricas específicas que influyen en su rendimiento. El coeficiente de Seebeck es una medida de la sensibilidad del termopar al gradiente térmico, es decir, cuánto voltaje se genera por unidad de diferencia de temperatura. Un coeficiente de Seebeck mayor indica una mayor sensibilidad y, por lo tanto, una mayor generación de voltaje. Además del coeficiente de Seebeck, se mencionan otras propiedades termoeléctricas relevantes, como el factor de potencia, que indica la eficiencia del material para convertir energía térmica en energía eléctrica, y la eficiencia de conversión, que representa el porcentaje de energía térmica convertida en energía eléctrica.

Estas propiedades termoeléctricas son fundamentales para comprender y evaluar el rendimiento de los termopares en aplicaciones prácticas que requieren mediciones precisas de temperatura. Cada aleación tiene características únicas que determinan su sensibilidad al gradiente térmico y su capacidad para generar voltaje.

En resumen, los gráficos obtenidos de los termopares Cromel-Alumel, Hierro-Constantan y Cromel-Constantan confirman la relación entre la temperatura y el voltaje generado, validando así el efecto Seebeck en estas aleaciones. Estos resultados respaldan la aplicación de los termopares en la medición y respuesta a cambios de temperatura en diversas aplicaciones. La pendiente de las líneas en los gráficos proporciona estimaciones de los coeficientes de Seebeck específicos de cada aleación, que son 41, 53 y 63 micro voltios por grado Celsius respectivamente.

Estos hallazgos contribuyen al entendimiento y la caracterización de las propiedades termoeléctricas de los termopares estudiados. Las tres aleaciones son diferentes y su efectividad variará dependiendo de cómo sean aplicadas.

Los gráficos de voltaje amplificado proporcionan información detallada sobre la respuesta termoeléctrica de cada termopar. Estos gráficos permiten evaluar la sensibilidad de cada termopar a los cambios de temperatura y comparar su rendimiento en términos de generación de voltaje. Los resultados obtenidos respaldan la selección de las aleaciones utilizadas y brindan información útil para futuras aplicaciones donde se requiera una medición precisa y confiable de la temperatura mediante termopares.

Los valores de voltaje calculados para cada termopar en incrementos de temperatura de 1°C, se registraron por medio de las mediciones de los experimentos prácticos (Tabla 11). A medida que la temperatura aumenta, también lo hace el voltaje generado por cada termopar. Al comparar las mediciones de voltaje en función de la temperatura de referencia (28°C - 42°C), se identifica que el termopar Cromel-Constantan exhibe el voltaje más alto en cada punto de temperatura en comparación con los otros dos termopares.

Tabla 11 comparativa entre aleaciones

VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)			
TEMPERATURA °C	CROMEL - ALUMEL	HIERRO CONSTANTAN	CROMEL CONSTANTAN
28°C	9.42 mV	9.61 mV	9.71 mV
29°C	9.44 mV	9.63 mV	9.75 mV
30°C	9.48 mV	9.64 mV	9.76 mV
32°C	9.52 mV	9.70 mV	9.80 mV
33°C	9.54 mV	9.72 mV	9.81 mV
34°C	9.57 mV	9.74 mV	9.82 mV
35°C	9.60 mV	9.76 mV	9.84 mV
36°C	9.61 mV	9.78 mV	9.87 mV
37°C	9.63 mV	9.80 mV	9.88 mV

VOLTAJE AMPLIFICADO (mV)			
TEMPERATURA °C	CROMEL - ALUMEL	HIERRO CONSTANTAN	CROMEL CONSTANTAN
38°C	9.64 mV	9.81 mV	9.89 mV
39°C	9.67 mV	9.82 mV	9.89 mV
40°C	9.69 mV	9.84 mV	9.91 mV
41°C	9.70 mV	9.86 mV	209.00 mV
42°C	9.72 mV	9.86 mV	212.00 mV

El Cromel-Constantan es una aleación termoeléctrica comúnmente empleada en la fabricación de termopares debido a su coeficiente de Seebeck relativamente alto. Este coeficiente determina la capacidad del material para generar voltaje cuando se expone a diferencias de temperatura. Con un coeficiente de Seebeck aproximado de $63 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, el Cromel-Constantan se posiciona como una opción favorable para aplicaciones que requieren una respuesta sensible a los cambios de temperatura. Además de su coeficiente de Seebeck, el Cromel-Constantan se caracteriza por su buena estabilidad a temperaturas elevadas, resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación. Estas propiedades hacen que el Cromel-Constantan sea una elección versátil y confiable para una variedad de aplicaciones que necesitan medir con precisión la temperatura mediante el efecto Seebeck.

En resumen, el Cromel-Constantan es preferido para la generación de voltaje por efecto Seebeck debido a su coeficiente de Seebeck relativamente alto y otras propiedades favorables que lo hacen adecuado para aplicaciones termoeléctricas. Los valores obtenidos mediante la simulación en el software Proteus permitieron evaluar la sensibilidad de cada termopar a los cambios de temperatura y comparar su rendimiento en términos de generación de voltaje. Estos resultados respaldan la elección de las aleaciones utilizadas y ofrecen información útil para futuras aplicaciones donde se requiera una medición precisa y confiable de la temperatura mediante termopares.

VI. DISCUSIÓN

El presente estudio se centró en la evaluación del comportamiento termoeléctrico de la aleación Cromel-Alumel mediante la medición del voltaje generado por un termopar bajo diferentes condiciones térmicas. Los resultados obtenidos a través de los cálculos teóricos y las mediciones experimentales proporcionaron información valiosa sobre el rendimiento y la precisión del termopar en aplicaciones del mundo real.

La fórmula utilizada para calcular el voltaje generado por el efecto Seebeck en un termopar se basa en el coeficiente de Seebeck (α) y la diferencia de temperatura ($T_2 - T_1$) entre los dos puntos de unión del termopar. El coeficiente de Seebeck específico de la aleación Cromel-Alumel se determinó como $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Se observó que, a medida que la temperatura aumentaba desde 35°C hasta 42°C , el voltaje teóricamente calculado incrementaba proporcionalmente, variando desde aproximadamente 1.43 mV a 1.722 mV .

Los resultados obtenidos mediante los cálculos teóricos fueron contrastados con las mediciones obtenidas durante los ensayos experimentales. Se implementaron diversas herramientas y técnicas, como el uso de un multímetro Fluke de alta precisión y fiabilidad, así como un pirómetro para medir con precisión la temperatura del líquido donde se ingresó el termopar. Además, se utilizó una resistencia para calentar el líquido de manera controlada, lo que contribuyó a minimizar posibles fuentes de error y garantizar mediciones consistentes y controladas.

Las mediciones experimentales revelaron que los voltajes generados por el termopar Cromel-Alumel se encontraban dentro de un rango comprendido entre 1 y 2 mV . Estos resultados respaldaron los cálculos teóricos previos y demostraron la capacidad del termopar para medir y responder a cambios de temperatura en condiciones prácticas.

Se llevaron a cabo múltiples pruebas que variaban los grados de temperatura con el objetivo de evaluar exhaustivamente la respuesta del termopar en diferentes condiciones térmicas. Estas pruebas abarcaron cambios graduales de temperatura, así como pruebas a

temperaturas específicas para explorar el comportamiento del termopar en rangos térmicos determinados. Los datos recopilados durante estas pruebas proporcionaron una evaluación exhaustiva de la capacidad del termopar para su implementación en aplicaciones del mundo real.

Es importante destacar que se utilizó 0°C como una referencia estándar en el análisis termoeléctrico, lo que simplificó los cálculos y permitió realizar comparaciones consistentes. La elección de la aleación Cromel-Alumel se basó en su coeficiente de Seebeck y su idoneidad para la generación de voltaje en respuesta a cambios de temperatura.

En resumen, este estudio ha demostrado que el termopar Cromel-Alumel presenta un comportamiento termoeléctrico consistente y preciso en una variedad de condiciones térmicas. Los resultados obtenidos respaldan la aplicación de este termopar en aplicaciones prácticas que requieren mediciones de temperatura confiables y precisas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el rendimiento del termopar puede verse influenciado por otros factores, como la calidad de los materiales utilizados y la calibración adecuada del instrumento de medición. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar y optimizar aún más su rendimiento en diferentes entornos y aplicaciones específicas.

VII. CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema robusto que aprovecha la diferencia de temperatura para generar electricidad, demostrando de esta manera la aplicabilidad del efecto de Seebeck en el contexto médico. Se realizaron distintas pruebas con diversas aleaciones las cuales mostraron un alto rendimiento en términos de conversión de energía.
- Se desarrollaron tres dispositivos utilizando combinaciones de aleaciones tales como Cromel - Alumel, Hierro - Constantan y Cromel - Constantan. Estos permitieron evaluar de manera precisa la capacidad de conversión de energía térmica a eléctrica mediante el efecto Seebeck. De manera complementaria, se identificó como el voltaje variaba en función del material utilizado en cada dispositivo.
- Los resultados experimentales demostraron que las aleaciones Cromel-Constantan, Hierro-Constantan, y Cromel-Alumel tienen diferentes coeficientes de Seebeck, factores de potencia y rangos de eficiencia de conversión. La aleación Cromel-Constantan se identificó como la más eficiente para la conversión termoeléctrica de calor en electricidad, demostrando un coeficiente de Seebeck superior y una mayor eficiencia de conversión (8% a 12%), indicando una mayor sensibilidad y eficiencia en la conversión de energía térmica en eléctrica, especialmente útil para aplicaciones donde la precisión y respuesta rápida ante cambios térmicos son críticas.
- Las pruebas prácticas corroboraron que el prototipo termoeléctrico que emplea la aleación Cromel-Constantan constituye un método efectivo para la generación de electricidad a partir de fuentes térmicas. Este hallazgo valida la capacidad del sistema para operar en condiciones realistas y destaca su potencial para aplicaciones prácticas en la alimentación de dispositivos biomédicos o wearables. La investigación aporta datos valiosos para la innovación en el diseño de dispositivos termoeléctricos, especialmente en lo que respecta a la selección de aleaciones y la optimización de sus configuraciones para maximizar la eficiencia energética. Finalmente, este estudio contribuye significativamente a la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles, ofreciendo una vía hacia la autonomía energética de dispositivos portátiles y wearables.

Los resultados apoyan el desarrollo de tecnologías que reduzcan la dependencia de baterías y promuevan la sostenibilidad ambiental.

VIII. RECOMENDACIONES

- Explorar nuevos materiales y técnicas de procesamiento para aumentar la eficiencia térmica y eléctrica de las aleaciones termoeléctricas.
- Integrar sistemas de gestión de energía y control térmico con el fin de optimizar el rendimiento y garantizar la estabilidad de los dispositivos termoeléctricos en diversas condiciones de operación.
- Investigar y explorar aplicaciones específicas, como dispositivos de monitoreo de la salud, dispositivos de asistencia médica portátiles y dispositivos de seguimiento de actividad física con el fin de mejorar su autonomía energética y funcionalidad.
- Investigar la viabilidad de dispositivos termoeléctricos implantables en el cuerpo humano para la generación de energía a partir del calor interno del organismo. Como, por ejemplo, marcapasos, sensores de monitoreo de glucosa y estimuladores neurológicos.
- Investigar y desarrollar estrategias para optimizar el diseño de sistemas de recolección y almacenamiento de energía térmica, con el fin de aumentar la autonomía y la fiabilidad de los dispositivos termoeléctricos en entornos móviles y remotos.

IX. REFERENCIAS

1. Smith, R. I., & Johnston, M. L. (2021). Analysis of Skin-Worn Thermoelectric Generators for Body Heat Energy Harvesting to Power Wearable Devices. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 7158-7161. <https://doi.org/10.1109/EMBC46164.2021.9629473>
2. Bose, S., Anand, T., & Johnston, M. L. (2021). A 3.5-mV Input Single-Inductor Self-Starting Boost Converter With Loss-Aware MPPT for Efficient Autonomous Body-Heat Energy Harvesting. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 56(6), 1837-1848. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.3042962>
3. Bose, S., Shen, B., & Johnston, M. L. (2020). A Batteryless Motion-Adaptive Heartbeat Detection System-on-Chip Powered by Human Body Heat. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 55(11), 2902. <https://doi.org/10.1109/jssc.2020.3013789>
4. Brogan, Q., & Ha, D. S. (2019). A Single Stage Boost Converter for Body Heat Energy Harvesting with Maximum Power Point Tracking and Output Voltage Regulation. 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702772>
5. Proto, A., Vondrak, J., Schmidt, M., Kubicek, J., Gorjani, O. M., Havlik, J., & Penhaker, M. (2021). A Flexible Thermoelectric Generator Worn on the Leg to Harvest Body Heat Energy and to Recognize Motor Activities: A Preliminary Study. *IEEE Access*, 9, 20878-20892. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054405>
6. Tabaie, Z., & Omidvar, A. (2023). Human body heat-driven thermoelectric generators as a sustainable power supply for wearable electronic devices: Recent advances, challenges, and future perspectives. *Heliyon*, 9(4), e14707. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14707>
7. Yuan, J., & Zhu, R. (2019). Self-Powered Wearable Multi-Sensing Bracelet with Flexible Thermoelectric Power Generator. 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS

& EUROSENSORS XXXIII), 1431-1434.
<https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808231>

8. Energies | Free Full-Text | Structural Design Optimization of Micro-Thermoelectric Generator for Wearable Biomedical Devices. (s. f.). Recuperado 25 de octubre de 2023, de <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2339>
9. Wongjom, P., Thongsamrit, W., Ramamoorthy, H., Chinwong, S., Somphonsane, R., & Ruttanapun, C. (2020). Cost-Effective Experimental Setup for Studies of Spin Seebeck Effect and Electrical Transport in Thermoelectric Materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 3587-3594. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2935597>
10. Park, J.-S., & Huh, C.-S. (2012). A study on improved efficiency and cooling LED lighting using a seebeck effect. 2012 International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICPERE.2012.6287245>
11. Savini, A. (2020). The early experiments of Alessandro Volta and the Seebeck effect. *URSI Radio Science Bulletin*, 2020(372), 52-55. <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9240106>
12. Balseca Sampedro, O. F., Vera Luzuriaga, J. G., Mayorga Pérez, D. F., Noriega Cordovez, H. A., Mejía Rodríguez, B. S., Arévalo Sánchez, R. A., & Centeno Amaguaya, H. S. (2022a). Implementación de un Sistema de Generación Eléctrica mediante la aplicación del Efecto Seebeck con Celdas Peltier para aprovechar el Calor Residual de Gases de Procesos Industriales. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 7(6 (JUNIO 2022)), 1719-1755.
13. Dibra, D., Stecher, M., Lindemann, A., Lutz, J., & Kadow, C. (2009). Seebeck difference—Temperature sensors integrated into smart power technologies. 2009 21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, 216-219. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2009.5158040>

14. Kiriwara, A., Ishida, M., Uchida, K., Someya, H., Iwasaki, Y., Ihara, K., Kohmoto, S., Saitoh, E., & Murakami, T. (2014b). Spin-Seebeck thermoelectric converter. 2014 IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC), 1-3.
<https://doi.org/10.1109/INEC.2014.7460433>
15. Liao, T., Ye, Z., & Chen, J. (2017). Spin-Seebeck Temperature Sensors. IEEE Transactions on Electron Devices, 64(6), 2655-2658.
<https://doi.org/10.1109/TED.2017.2691762>
16. Randjelovic, D., Kaltsas, G., Lazic, Z., & Popovic, M. (2002). Multipurpose thermal sensor based on Seebeck effect. 2002 23rd International Conference on Microelectronics. Proceedings (Cat. No.02TH8595), 1, 261-264.
<https://doi.org/10.1109/MIEL.2002.1003189>
17. Han, C.-G., Qian, X., Li, Q., Deng, B., Zhu, Y., Han, Z., Zhang, W., Wang, W., Feng, S.-P., Chen, G., & Liu, W. (2020). Giant thermopower of ionic gelatin near room temperature. Science (New York, N.Y.), 368(6495), 1091-1098.
<https://doi.org/10.1126/science.aaz5045>
18. ICARS-2019-Full-Extended-abstracts_eProceeding-eISBN-978-967-17781-0-4.pdf. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2023, de https://research.utm.my/wp-content/uploads/sites/18/2020/01/ICARS-2019-Full-Extended-abstracts_eProceeding-eISBN-978-967-17781-0-4.pdf#page=138
19. Jurkans, V., Blums, J., & Gornevs, I. (2018). Harvesting Electrical Power from Body Heat Using Low Voltage Step-up Converters with Thermoelectric Generators. 2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC), 1-4.
<https://doi.org/10.1109/BEC.2018.8600958>
20. Kubov, V. I., Dymyrov, Y. Y., & Kubova, R. M. (2016). LTspice-model of thermoelectric Peltier-Seebeck element. 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 47-51.
<https://doi.org/10.1109/ELNANO.2016.7493007>

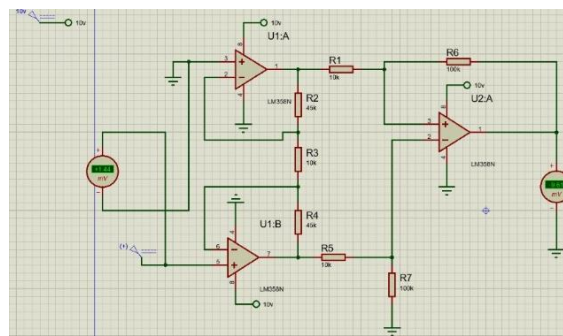
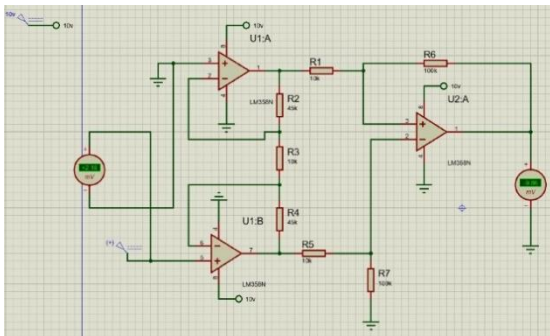
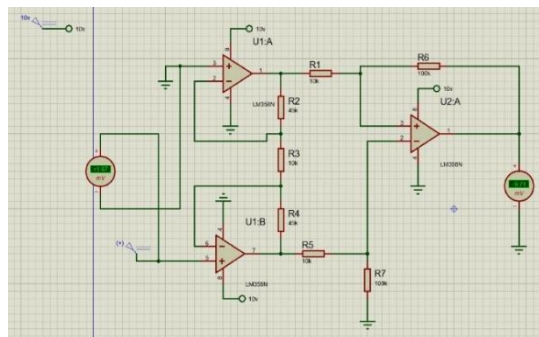
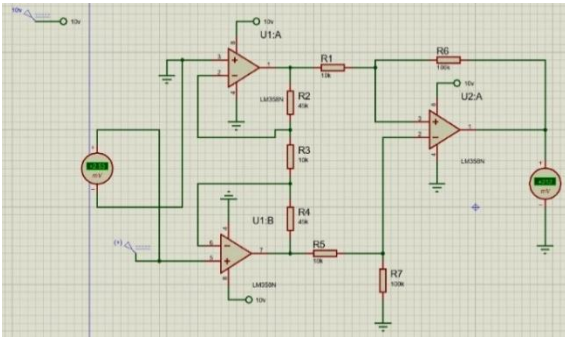
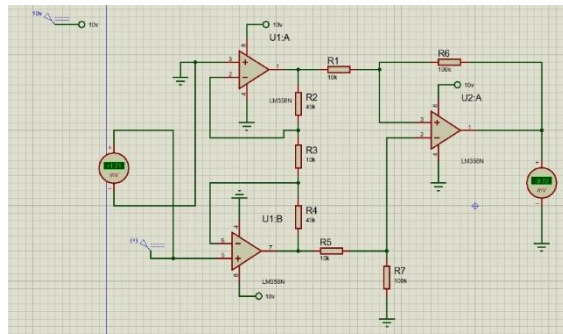
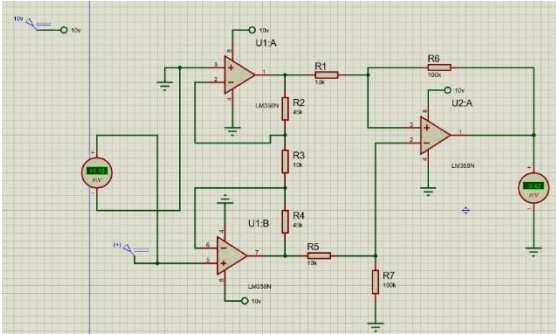
21. Maran, A. L. O., Henao, N. C., Silva, E. A., Schaeffer, L., & Ando Junior, O. H. (2016). Use of the Seebeck Effect for Energy Harvesting. *IEEE Latin America Transactions*, 14(9), 4106-4114. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7785940>
22. María Ramos-Escamilla, Javier Serrudo-Gonzales, Eleana Rosales-Borbor, Jesús Soriano-Velasco, Enrique Peralta-Castro, Imelda Escamilla-Bouchan, Vladimir Luna-Soto, et al. (2018). (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2023, de https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num4/Revista_del_Dise%C3%B1o_Innovativo_V2_N4.pdf#page=45
23. Mejdal, M., Abouhilal, A., Chahid, E. H., & Malaoui, A. (2016). Effects of temperature in the performance of the thermoelectric devices: Power generation. 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 338-343. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984011>
24. Proto, A., Vondrak, J., Schmidt, M., Kubicek, J., Gorjani, O. M., Havlik, J., & Penhaker, M. (2021). A Flexible Thermoelectric Generator Worn on the Leg to Harvest Body Heat Energy and to Recognize Motor Activities: A Preliminary Study. *IEEE Access*, 9, 20878-20892. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054405>
25. Rayón.pdf. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/145911/Ray%C3%B3n?sequence=1>
26. rdu, E. (2021, junio 28). La termoelectricidad: Convirtiendo el calor en electricidad. RDU UNAM. https://www.revista.unam.mx/2021v22n4/la_termoelectricidad_convirtiendo_el_calor_en_electricidad/
27. RESISTIVIDAD ELECTRICA Y COEFICIENTE SEEBECK EN COMPUESTOS DEL TIPO Ca(La)MnO PREPARADOS POR EL MÉTODO DE REACCIÓN DE ESTADO SÓLIDO. (s. f.). Recuperado 25 de octubre de 2023, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-44702017000100001&script=sci_arttext

28. Sese, J. T., Ibarra, J. B. G., Latina, M. A. E., Buenafe, R. T., Cruz, G., Mirano, M. A., & Yu, J. J. (2016b). Harvesting electrical power through body heat in different workout activities using Peltier tiles. 2016 6th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 460-463. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2016.7893618>
29. Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf>
30. Smith, R. I., & Johnston, M. L. (2021). Analysis of Skin-Worn Thermoelectric Generators for Body Heat Energy Harvesting to Power Wearable Devices. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 7158-7161. <https://doi.org/10.1109/EMBC46164.2021.9629473>
31. Tanwar, A., Lal, S., & Razeeb, K. M. (2021). Structural Design Optimization of Micro-Thermoelectric Generator for Wearable Biomedical Devices. *Energies*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/en14082339>

X. ANEXOS

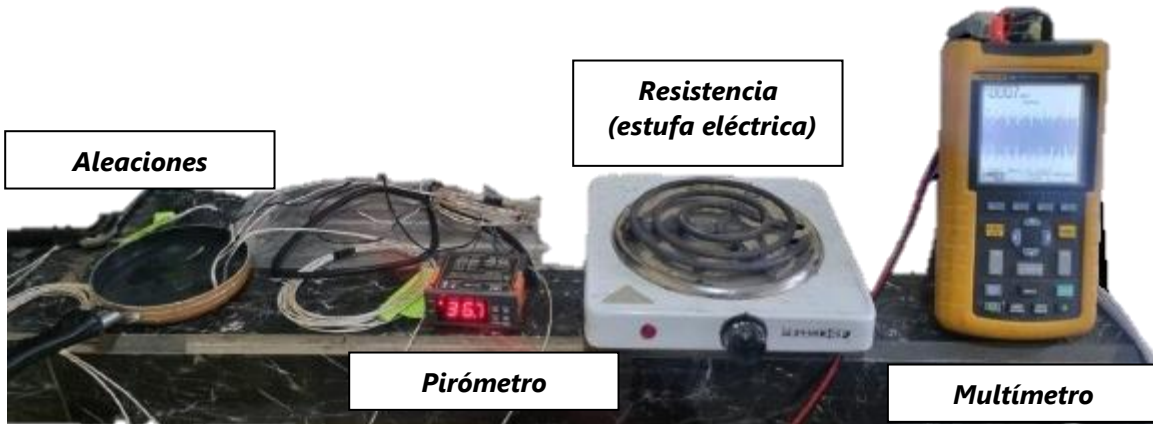
Anexo 1. Simulaciones realizadas en multisim (amplificación de voltaje).

AMPLIFICACIONES DE VOLTAJES



Anexo 2. Circuito Completo

MATERIALES IMPLEMENTADOS



Anexo 3. Voltaje Amplificado

Voltaje

