



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Celda Peltier para la generación de electricidad
con fuentes pasivas de frío y calor**

presentada por

Ing. Oswaldo Aparicio Rodríguez

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

M.C. Alfredo González Ortega

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero 2026

Aceptación del documento de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; **16/diciembre/2025**
Oficio No. DIE/221/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. OSWALDO APARICIO RODRÍGUEZ**, con número de control **M24CE019** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"CELDA PELTIER PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON FUENTES PASIVAS DE FRÍO Y CALOR"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Alfredo González Ortega
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Aguayo Alarcón
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1

Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

REVISOR 2

Dra. Mónica Borunda Pacheco
Doctora en Filosofía
Cédula profesional S/C

C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Autorización de documento de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 17/diciembre/2025

Oficio No. SAC/299/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

OSWALDO APARICIO RODRÍGUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CELDA PELTIER PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON FUENTES PASIVAS DE FRÍO Y CALOR"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Resumen

La energía termoeléctrica basada en celdas Peltier ha emergido como una alternativa viable para la generación de energía renovable a partir de gradientes térmicos. Estos dispositivos, también conocidos como módulos termoeléctricos, operan en función de dos principios físicos fundamentales: el efecto Seebeck y el efecto Peltier. El efecto Seebeck es el responsable de la generación de un potencial eléctrico cuando se establece un diferencial de temperatura entre las caras caliente y fría del módulo, permitiendo así la conversión directa de energía térmica en energía eléctrica. Por otro lado, el efecto Peltier se manifiesta cuando se aplica una corriente eléctrica al módulo, produciendo un transporte de calor que genera un enfriamiento en una cara y un calentamiento en la otra. En el presente trabajo, se aprovecha el efecto Seebeck para la generación eléctrica, mediante el uso de una diferencia térmica controlada. Esta conversión se realiza de forma directa, silenciosa y sin partes móviles, lo que convierte a los módulos termoeléctricos en una solución robusta y de bajo mantenimiento para aplicaciones energéticas sostenibles.

Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas depende fuertemente de la diferencia térmica establecida, por lo que se requiere una adecuada gestión del flujo de calor. En este trabajo se propone un sistema de captación y conversión de energía solar térmica mediante el uso de un lente Fresnel de 30 cm × 30 cm como concentrador, dirigida hacia una estructura compuesta por 10 celdas Peltier modelo TEC1-12706 con un disipador de aluminio en las caras frías. El objetivo es lograr un diferencial térmico promedio de entre 15 °C y 20 °C, manteniendo las caras calientes entre 55 °C y 85 °C, y las caras frías entre 45 °C y 65 °C, dependiendo de las condiciones ambientales.

La energía eléctrica generada por las celdas se podría entregar a un convertidor elevador tipo Boost, diseñado para adecuar la tensión de salida a niveles más adecuados. Posteriormente, esta energía sea almacenada en un capacitor, el cual alimentaría finalmente un dispositivo de bajo consumo como una lámpara LED, permitiendo aprovechar la energía solar captada durante el día.

El diseño se valida mediante simulaciones, modelando las celdas Peltier, el convertidor Boost y el capacitor. Se realizan pruebas experimentales en condiciones reales, tomando como ubicación Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) campus Palmira.

Donde finalmente este enfoque demostrará la viabilidad de utilizar tecnología termoeléctrica solar con elementos económicos y de bajo mantenimiento, abriendo una alternativa interesante para aplicaciones de bajo consumo en zonas con alta radiación solar.

Abstract

Peltier cell-based thermoelectric energy has emerged as a viable alternative for generating renewable energy from thermal gradients. These devices, also known as thermoelectric modules, operate based on two fundamental physical principles: the Seebeck effect and the Peltier effect. The Seebeck effect is responsible for generating an electrical potential when a temperature difference is established between the hot and cold faces of the module, thus enabling the direct conversion of thermal energy into electrical energy. The Peltier effect, on the other hand, occurs when an electric current is applied to the module, producing heat transfer that cools one face and heats the other. In this work, the Seebeck effect is harnessed for electricity generation using a controlled temperature difference. This conversion is direct, silent, and without moving parts, making thermoelectric modules a robust and low-maintenance solution for sustainable energy applications.

However, the efficiency of these systems depends heavily on the established temperature difference, thus requiring proper heat flow management. This paper proposes a solar thermal energy capture and conversion system using a 30 cm × 30 cm Fresnel lens as a concentrator, directed towards a structure composed of 10 Peltier cells, model TEC1-12706, with an aluminum heat sink on the cold faces. The objective is to achieve an average temperature difference of between 15°C and 20°C, maintaining the hot faces between 55°C and 85°C, and the cold faces between 45°C and 65°C, depending on ambient conditions.

The electrical energy generated by the cells could be delivered to a boost converter, designed to adjust the output voltage to more suitable levels. This energy would then be stored in a capacitor, which would ultimately power a low-consumption device such as an LED lamp, allowing the solar energy captured during the day to be harnessed.

The design is validated through simulations, modeling the Peltier cells, the Boost converter, and the capacitor. Experimental tests are conducted under real-world conditions at the National Center for Technological Research and Development (CENIDET) Palmira campus.

This approach will ultimately demonstrate the feasibility of using solar thermoelectric technology with inexpensive and low-maintenance components, opening up an interesting alternative for low-consumption applications in areas with high solar radiation.

Dedicatoria

A mis padres, por ser el pilar inquebrantable en cada paso de mi vida.

Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos, por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo, paciencia y corazón.

Esta meta también es suya.

A mis amigos, por su compañía en los días largos, por las risas que hicieron más ligero el camino y por estar presentes en los momentos que realmente importan.

Gracias por su apoyo sincero y por recordarme que no estamos solos en este viaje.

Y a la vida misma, por los retos que parecían demasiado grandes y terminaron forjando mi carácter, por las caídas que enseñaron más que cualquier éxito y por darme la oportunidad de transformar cada experiencia en aprendizaje.

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme las instalaciones, recursos y el ambiente académico necesarios para el desarrollo de este trabajo. Extiendo también mi agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). por la beca otorgada, la cual fue fundamental para continuar con mis estudios de posgrado.

A mi comité revisor, expreso mi más profundo agradecimiento por el tiempo, la dedicación y las valiosas observaciones que contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento de este trabajo.

A mi director de tesis, el M.C. Alfredo González Ortega, le agradezco no solo su guía técnica, sino también su claridad, paciencia y confianza en cada etapa del proyecto. Su forma de enseñar, siempre firme pero cercana, me ayudó a crecer tanto como estudiante como profesional. Le agradezco sinceramente su compromiso y la confianza con la que siempre impulsó mi crecimiento académico.

A mi codirector, el Dr. Jesús Aguayo Alquicira, le expreso un agradecimiento muy especial por su acompañamiento sólido y constante durante este proyecto. Su forma clara y precisa de orientar cada etapa del trabajo, así como su disposición para explicar, revisar y guiar, fueron fundamentales para encaminar mis ideas y fortalecer mis resultados. Su experiencia y su capacidad para encontrar soluciones aún en momentos complejos me ofrecieron un apoyo invaluable.

A la Dra. Mónica Borunda Pacheco le agradezco sinceramente su apoyo y supervisión durante todo este tiempo. Su manera tan clara y generosa de orientar mis avances, así como su disposición para escuchar y guiarme cuando más lo necesitaba, hicieron una gran diferencia. Gracias por su paciencia, por sus consejos precisos y por estar siempre dispuesta a ayudar. Su apoyo fue fundamental para que este trabajo llegara a buen término.

Al Dr. Mario Ponce Silva, le agradezco sinceramente su participación como revisor, así como sus observaciones y comentarios acertados, los cuales contribuyeron a mejorar la calidad y el rigor de este trabajo. Su experiencia y perspectiva académica fueron un aporte valioso para su correcta consolidación.

A todos los docentes que formaron parte de mi formación académica durante el posgrado, gracias por compartir su conocimiento, por sus consejos y por su vocación, que inspiraron no solo a ser mejor estudiante, sino también mejor persona.

A mi madre, Gisela Rodríguez López, le dedico el agradecimiento más grande de este trabajo, porque cada paso que doy lleva su huella. Has sido y siempre serás mi mayor motivación y el ejemplo que guía mi vida.

Gracias, mamá, por ser mi fuerza diaria, por no soltarme nunca, ni siquiera en los momentos en los que yo mismo dudé de mis capacidades. Gracias por cada desvelo, por cada sacrificio silencioso desde el día en que nací hasta este momento, y por poner siempre mi bienestar y mis sueños antes que los tuyos. Tu esfuerzo constante, tu trabajo incansable y tu amor incondicional han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante.

Gracias por tus palabras que siempre llegaron cuando más las necesitaba, por tu paciencia infinita y por tu abrazo que sanó mis cansancios y mis miedos. Con tu ejemplo me enseñaste el valor del trabajo, la responsabilidad, la perseverancia y la humildad. Eres el pilar más fuerte de mi vida, la persona que ha sostenido mis sueños incluso cuando el camino se volvió pesado.

Nada de esto habría sido posible sin ti. Este logro también es tuyo, porque detrás de cada avance mío ha estado tu apoyo incondicional. Te amo muchísimo.

A mi padre, Regino Felipe Aparicio Jiménez, le agradezco profundamente su ejemplo de compromiso y trabajo. Gracias por tus consejos serenos, por tu presencia discreta pero firme, y por enseñarme a enfrentar los retos con responsabilidad y carácter. Tu apoyo ha sido un cimiento importante en mi camino.

A mi novia, Karen Vanesa Barrios Ruiz, le ofrezco un agradecimiento lleno de cariño y admiración. Gracias por acompañarme con paciencia en los momentos más exigentes de este proceso, por animarme cuando la presión era alta, por escucharme aún en mis silencios, y por recordarme con tu amor que no estaba solo. Tu compañía ha sido un refugio, una motivación y un impulso constante para seguir avanzando. Gracias por caminar conmigo con tanta ternura y comprensión.

Agradezco de manera especial a Mario Castillo Ruiz, quien sin estar desde el inicio ha sido un apoyo sincero durante esta etapa. Su ejemplo de trabajo, constancia y calidad humana ha sido valioso, así como el respeto y cariño que brinda a mi familia. Gracias por el ánimo, la disposición y la buena voluntad compartida.

A mis amigos, por acompañarme en el trayecto, por las charlas, las risas y también por escucharme en los días pesados. Su compañía hizo que esta etapa fuera más llevadera y significativa. De manera especial agradezco a Josefina Jiménez Juárez, Alan Yavin Hernández Ruiz, Salvador Elí Duran Morales y José Erik Lozano Martínez quienes, con su apoyo, su ayuda desinteresada y su amistad sincera estuvieron presentes desde el primer día.

Agradezco también a todas aquellas personas que, de una u otra forma, formaron parte de este proceso. Cada gesto, palabra o ayuda sumó a la construcción de este logro. Esta tesis no es solo un resultado académico, es el reflejo del apoyo constante, el esfuerzo compartido y el amor que me rodeó en este camino.

A todos ustedes: gracias de corazón.

Contenido

Aceptación del documento de tesis	2
Autorización de documento de tesis	3
Resumen	4
Abstract	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Acrónimos y abreviaciones	11
Lista de Figuras	12
Lista de tablas	16
Capítulo 1: Introducción	18
1.1. Antecedentes	20
1.2. Planteamiento del problema	21
1.3. Propuesta de solución	24
1.4. Objetivos	26
1.5. Justificación	27
1.6. Limitaciones	27
Capítulo 2: Fundamentos teóricos	30
2.1. Efectos termoeléctricos	31
2.2. Celdas Peltier	36
2.3. Revisión de las topologías de la celda Peltier	38
2.4. Conclusiones del estado del arte	40
Capítulo 3: Diseño de prototipo	43
3.1. Lente Fresnel como concentrador solar	43
3.2. Estructura de soporte y ajuste focal	45
3.3. Arreglo de celdas Peltier	46
3.4. Protección térmica de las celdas	48
3.5. Prueba termográfica comparativa	49
3.6. Montaje final del prototipo	53
Capítulo 4: Diseño de parte experimental	56
4.1. Metodología de pruebas	56
4.2. Configuraciones evaluadas	56
4.3. Resultados en configuración serie	56

4.4. Resultados en configuración paralelo	62
4.5. Prueba sin movimiento	68
4.6. Discusión general de resultados de las pruebas	69
Capítulo 5: Comparación en simulación de la parte experimental.	71
5.1. Simulaciones de tensión y corriente en serie.....	72
5.2. Cálculo de parámetros de celdas Peltier	73
5.3. Comparación en simulación de las pruebas experimentales	76
5.4. Simulaciones del convertidor Boost adecuado a las celdas	88
5.5. Simulación del capacitor de almacenamiento.....	90
5.6. Simulación de resistencia representando la carga y consumo final.....	91
Capítulo 6: Conclusión.	94
6.1. Conclusiones generales	94
6.2. Aportaciones del trabajo	95
6.3. Limitaciones del sistema.....	96
6.4. Trabajos futuros	97
6.5. Recomendaciones para mejorar el desempeño	97
6.6. Cierre del capítulo.....	98
Bibliografía.	100
Anexos	105
Foto del prototipo de primera prueba en serie:.....	105
Foto de prototipo de segunda prueba en serie:.....	105
Foto de prototipo de tercera prueba en serie:.....	106
Fotos y comparación en simulación de primera prueba en paralelo:.....	106
Fotos y comparación en simulación de segunda prueba en paralelo:.....	110
Fotos y comparación en simulación de tercera prueba en paralelo.....	115
Fotos y tabla de prueba en serie sin movimiento.....	119
Apéndice	121

Acrónimos y abreviaciones

Tabla. 1. Tabla de acrónimos.

Acrónimos y Variables	Descripción
N	Materiales negativos
P	Materiales positivos
DC	Corriente directa
ΔT	Diferencia de temperatura entre dos puntos o momentos distintos.
BMS	Sistema de Gestión de Baterías (Battery Management System).
ON	Encendido
OFF	Apagado
LED	Diodo emisor de luz
°C	Grados centígrados
°K	Grados Kelvin
Ah	Amperes hora
A	Amperios
mA	Mili Amperios
V	Voltios
mV	Mili Voltios
W	Watts
θ	theta
ϕ	phi
δ	delta

Lista de Figuras

Figura. 1. Esquema del efecto Seebeck.....	32
Figura. 2. Esquema del efecto Peltier.....	33
Figura. 3. Esquema del efecto Thomson.....	34
Figura. 4. Esquema del efecto Joule.....	35
Figura. 5. Esquema del efecto Fourier.....	36
Figura. 6. Aspecto físico de una celda Peltier.....	37
Figura. 7. Estructura de una celda Peltier.....	37
Figura. 8. Lente Fresnel.....	44
Figura. 9. Lente Fresnel con marco.....	44
Figura. 10. Prototipo a 33 cm de distancia focal.....	45
Figura. 11. Prototipo a 10 cm de distancia focal.....	46
Figura. 12. Arreglo de celdas Peltier.....	47
Figura. 13. Vista superior del prototipo.....	47
Figura. 14. Placa de aluminio sobre celdas Peltier.....	48
Figura. 15. Punto focal concentrado en placa de aluminio.....	49
Figura. 16. Temperatura en punto focal de lámina de aluminio recubierta de primario automotriz.....	50
Figura. 17. Temperatura en punto focal de lámina de cobre pintada de negro.....	50
Figura. 18. Temperatura en cara caliente de celdas Peltier.....	51
Figura. 19. Temperatura en cara fría de celdas Peltier.....	52
Figura. 20. Temperatura superficial en el entorno.....	52
Figura. 21. Vista superior del prototipo funcional.....	54
Figura. 22. Vista lateral del prototipo funcional.....	54
Figura. 23. Gráfica de tensión primera prueba en serie.....	57
Figura. 24. Gráfica de corriente primera prueba en serie.....	58
Figura. 25. Gráfica de tensión segunda prueba en serie.....	59
Figura. 26. Gráfica de corriente segunda prueba en serie.....	59
Figura. 27. Gráfica de tensión tercera prueba en serie.....	61
Figura. 28. Gráfica de corriente tercera prueba en serie.....	61
Figura. 29. Gráfica de tensión primera prueba en paralelo 5x2.....	63
Figura. 30. Gráfica de corriente primera prueba en paralelo 5x2.....	63
Figura. 31. Gráfica de tensión segunda prueba en paralelo 5x2.....	65
Figura. 32. Gráfica de corriente segunda prueba en paralelo 5x2.....	65
Figura. 33. Gráfica de tensión tercera prueba en paralelo 5x2.....	67
Figura. 34. Gráfica de corriente tercera prueba en paralelo 5x2.....	67
Figura. 35. Gráfica tensión y corriente de prueba en serie sin movimiento.....	69
Figura. 36. Simulación de tensión en serie.....	72
Figura. 37. Simulación de corriente en serie.....	73
Figura. 38. Hoja de datos de celda Peltier modelo TEC1-12706 [56].....	74
Figura. 39. Coeficiente Seebeck y resistencia eléctrica por cada celda Peltier en simulación.....	75
Figura. 40. Conductancia térmica por cada celda Peltier en simulación.....	76
Figura. 41. Tensión y corriente máximas obtenida en primera prueba en serie.....	77

Figura. 42. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en primera prueba en serie.	77
Figura. 43. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en primera prueba en serie.	78
Figura. 44. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en primera prueba en serie.	78
Figura. 45. Tensión y corriente mínimas obtenida en primera prueba en serie.	79
Figura. 46. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en primera prueba en serie.	79
Figura. 47. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en primera prueba en serie.	80
Figura. 48. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en primera prueba en serie.	80
Figura. 49. Tensión y corriente máximas obtenida en segunda prueba en serie.	81
Figura. 50. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en segunda prueba en serie.	81
Figura. 51. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en segunda prueba en serie.	82
Figura. 52. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en segunda prueba en serie.	82
Figura. 53. Tensión y corriente mínimas obtenida en segunda prueba en serie.	83
Figura. 54. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en segunda prueba en serie.	83
Figura. 55. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en segunda prueba en serie.	84
Figura. 56. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en segunda prueba en serie.	84
Figura. 57. Tensión y corriente máximas obtenida en tercera prueba en serie.	85
Figura. 58. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en tercera prueba en serie.	85
Figura. 59. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en tercera prueba en serie.	86
Figura. 60. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en tercera prueba en serie.	86
Figura. 61. Tensión y corriente mínimas obtenida en tercera prueba en serie.	86
Figura. 62. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en tercera prueba en serie.	87
Figura. 63. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en tercera prueba en serie.	87
Figura. 64. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en tercera prueba en serie.	88
Figura. 65. Simulación del convertidor Boost de manera independiente.	89
Figura. 66. Simulación de las 10 celdas en serie acopladas al convertidor Boost.	90
Figura. 67. Simulación con condensador.	91
Figura. 68. Simulación del sistema completo representando el consumo final.	92

Figura. 69. Prototipo en operación prueba 1 en serie.	105
Figura. 70. Prototipo en operación prueba 2 en serie.	105
Figura. 71. Prototipo en operación prueba 3 en serie.	106
Figura. 72. Tensión y corriente máximas obtenida en primera prueba en paralelo.	107
Figura. 73. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en primera prueba en paralelo.	107
Figura. 74. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en primera prueba en paralelo.	108
Figura. 75. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en primera prueba en paralelo.	108
Figura. 76. Tensión y corriente mínimas obtenida en primera prueba en paralelo.	108
Figura. 77. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en primera prueba en paralelo.	109
Figura. 78. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en primera prueba en paralelo.	109
Figura. 79. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en primera prueba en paralelo.	110
Figura. 80. Prototipo en operación prueba 1 en paralelo.	110
Figura. 81. Tensión y corriente máximas obtenida en segunda prueba en paralelo.	111
Figura. 82. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en segunda prueba en paralelo.	111
Figura. 83. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en segunda prueba en paralelo.	112
Figura. 84. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en segunda prueba en paralelo.	112
Figura. 85. Tensión y corriente mínimas obtenida en segunda prueba en paralelo.	113
Figura. 86. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en segunda prueba en paralelo.	113
Figura. 87. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en segunda prueba en paralelo.	114
Figura. 88. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en segunda prueba en paralelo.	114
Figura. 89. Prototipo en operación prueba 2 en paralelo.	114
Figura. 90. Tensión y corriente máximas obtenida en tercera prueba en paralelo.	115
Figura. 91. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en tercera prueba en paralelo.	116
Figura. 92. comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en tercera prueba en paralelo.	116
Figura. 93. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en tercera prueba en paralelo.	116
Figura. 94. Tensión y corriente mínimas obtenida en tercera prueba en paralelo.	117
Figura. 95. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en tercera prueba en paralelo.	117
Figura. 96. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en tercera prueba en paralelo.	118

Figura. 97. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en tercera prueba en paralelo.	118
Figura. 98. Prototipo en operación prueba 3 en paralelo.....	119
Figura. 99. Tensión y corriente mínima y máxima obtenida en prueba sin movimiento....	120
Figura. 100. Prototipo en operación en prueba sin movimiento.	120

Lista de tablas

Tabla. 1. Tabla de acrónimos.....	11
Tabla. 2. Tabla del estado del arte.....	38
Tabla. 3. Prueba 1 en serie.....	56
Tabla. 4. Prueba 2 en serie.....	58
Tabla. 5. Prueba 3 en serie.....	60
Tabla. 6. Prueba 1 en paralelo.....	62
Tabla. 7. Prueba 2 en paralelo.....	64
Tabla. 8. Prueba 3 en paralelo.....	66
Tabla. 9. Prueba en serie sin movimiento.....	68
Tabla. 10. Prueba 1 en serie de valores máximos y mínimos.....	76
Tabla. 11. Prueba 2 en serie de valores máximos y mínimos.....	80
Tabla. 12. Prueba 3 en serie de valores máximos y mínimos.....	84
Tabla. 13. Prueba 1 en paralelo de valores máximos y mínimos.....	106
Tabla. 14. Prueba 2 en paralelo de valores máximos y mínimos.....	110
Tabla. 15. Prueba 3 en paralelo de valores máximos y mínimos.....	115
Tabla. 16. Prueba en serie sin movimiento de valores máximos y mínimos.....	119

Capítulo 1

Introducción

Capítulo 1: Introducción.

Durante las últimas décadas se ha notado un considerable deterioro climático debido principalmente al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en algunas actividades del ser humano [1].

La energía eléctrica es un componente crítico de la infraestructura de una nación y desempeña un papel vital en su crecimiento y desarrollo económico. Impulsa el sector manufacturero, apoya las redes de transporte y comunicación y permite la prestación de servicios esenciales, como la atención médica y la educación.

La energía eléctrica se produce típicamente utilizando varias fuentes, incluyendo carbón, petróleo, gas natural, entre otros. Desafortunadamente, estas fuentes están disminuyendo gradualmente y contribuyen a la contaminación al descargar materiales peligrosos y gases nocivos a la atmósfera y al agua. Además, los altos costos operativos, los gastos de combustible y otros factores obstaculizan la generación asequible de energía eléctrica a partir de estas fuentes [2, 3].

La solución al problema es aumentar la eficiencia energética de las instalaciones y procesos, así como la integración de fuentes renovables.

Las fuentes renovables son respetuosas con el medio ambiente y han demostrado ser candidatas eficientes, limpias y de bajo costo [4, 5] ya que son inagotables por naturaleza, ambientalmente seguras, escalables y pueden implementarse en diversas aplicaciones como áreas industriales, comerciales, agrícolas, residenciales y en regiones remotas e inadecuadas [6, 7].

Es por esto que llama bastante la atención la línea de investigación sobre energías renovables. Donde su principal objetivo es crear dispositivos generadores de energía lo suficientemente eficientes y rentables como para sustituir los combustibles fósiles [8].

A medida que las energías renovables ganan popularidad, el enfoque se dirige cada vez más hacia una utilidad más eficiente de estas fuentes y hacia la recolección de mayores cantidades de energía, con el fin de reducir la intermitencia que caracteriza a este tipo de generación.

Este panorama está generando una creciente demanda en métodos de almacenamiento de energía y elevando el interés en las baterías, ya que actualmente representan el principal medio de almacenamiento disponible para satisfacer una amplia variedad de necesidades [9, 10].

Para producir y recolectar la energía, la aplicación de energía solar es muy importante ya que tiene un uso muy amplio además que se considera una de las principales fuentes de energía renovables, ya que es fácil de obtener, limpia y barata [11].

La generación distribuida de energía solar ha sido reconocida como una solución beneficiosa para las redes inteligentes del futuro, ya que reduce en gran medida tanto las emisiones de dióxido de carbono como las pérdidas de transmisión de energía [12].

Uno de los usos de la energía solar es concentrar la energía térmica producida en un sistema termoelectrico que realice una diferencia de temperatura o también conocido como gradiente térmico y generando así una energía eléctrica [13, 14].

Para realizar esta diferencia de temperatura se utiliza una celda Peltier, que es un módulo formado por la unión de materiales tipo N y P, pares termoelectricos [15] y que se basa en postulados físicos tales como el efecto Seebeck y el efecto Peltier [16].

Estas generan calor por una de sus caras y frío por la otra, cuando se conectan a una fuente de corriente continua (efecto Peltier). Del mismo modo, si se aplica calor a una de sus caras y frío a la otra se puede generar energía eléctrica (efecto Seebeck). Entre mayor sea la diferencia de temperatura entre ambas caras, mayor será la tensión generada [17, 18].

Los efectos termoelectricos involucran la correlación entre corrientes eléctricas y tensiones contra transferencias de calor y temperatura y son los principales artífices de que la termoelectricidad tenga cavidad en el mundo [16].

Los orígenes de la termoelectricidad se remontan a principios del siglo XIX cuando 1822, Thomas Johann Seebeck, físico y médico de origen alemán, descubrió uno de los fenómenos termoelectricos más importantes, el cual lleva su nombre en honor a dicho hallazgo.

Seebeck observó que la aguja de una brújula se desviaba cuando se mantenían dos uniones de distintos metales a diferentes temperaturas. Este efecto se debía a que los niveles de energía de los electrones en cada metal variaban de forma diferente y generaban una tensión entre las uniones, lo que a su vez producía una energía eléctrica [19].

La celda Peltier operando con el efecto Seebeck es un elemento poco explotado debido a su pequeña tensión que genera [16] sin embargo presentan ventajas ya que no sólo funcionan sin ruido, sino que tampoco tienen piezas móviles y son de tamaño compacto, lo que los hace fiables durante un período de tiempo [13].

Este trabajo plantea el aprovechamiento de la energía solar mediante un sistema con fuentes pasivas y celdas Peltier. Como fuente pasiva de calor se utiliza un concentrador para focalizar la radiación sobre la cara caliente de las celdas, mientras que como fuente pasiva fría se utiliza un disipador en la cara fría favoreciendo la extracción del calor.

De esta manera, se busca maximizar la diferencia de temperatura entre ambas caras y, con ello, la generación de energía eléctrica a través del efecto Seebeck.

Se realizaron pruebas experimentales en un horario de 6:30 a 18:00 horas, registrando cada 30 minutos los valores de tensión y corriente producidos por el prototipo termoelectrico basado en celdas Peltier.

Para el análisis del sistema, se desarrollan simulaciones, una que incorpora un convertidor DC-DC Boost conectado a las salidas de las celdas Peltier, con el propósito de elevar la tensión obtenida a niveles más adecuados y otra que incluye un condensador como almacenamiento de la energía generada, junto con una resistencia que representa el consumo de una lámpara LED, utilizada como carga final.

Estas simulaciones permiten analizar el comportamiento del sistema en condiciones controladas, evaluando la capacidad del convertidor y del condensador para suministrar energía de manera continua y estable hacia la carga.

1.1. Antecedentes

A continuación, revisaremos algunos trabajos reportados en la literatura desde el año 2018 al 2022 encontrados como antecedentes sobre celdas Peltier aplicando el efecto Seebeck para generación de energía.

En 2018 [20] se desarrolló un sistema de iluminación LED alimentado mediante la energía generada por ocho celdas Peltier modelo TEC1-12706 conectadas en serie. El sistema integró un convertidor DC-DC Boost y un conjunto de baterías recargables para el almacenamiento de energía.

Para generar el gradiente térmico se utilizó una placa de aluminio y una resistencia calefactora en la cara caliente, mientras que en la cara fría se colocó un disipador de calor de dimensiones equivalentes. Como resultado, se obtuvo una diferencia de temperatura de 19.8 °C entre las caras de las celdas y una tensión de salida de 3.6 V.

En 2018 [21] se diseñó una máquina generadora de energía utilizando 273 celdas Peltier modelo CMO-32-62S conectadas en serie, seleccionadas por su capacidad de soportar temperaturas entre 400 °C y 800 °C en la cara caliente y en la cara fría se integraron disipadores de temperatura para mantener la diferencia térmica.

El sistema alcanzó una gradiente de temperatura de 450 °C, generando una tensión de 99.45 V, demostrando así la viabilidad de obtener altos niveles de energía mediante la conexión de múltiples celdas Peltier.

En 2019 [22] se diseñó un prototipo generador de energía utilizando 104 celdas Peltier modelo TEC1-12706 conectadas en configuración mixta. Para la cara caliente se aprovechó la temperatura de las aguas termales de Terma Santa Catalina (38–40 °C), empleando una caja hermética que permitió conservar la temperatura, mientras que en la cara fría se utilizaron disipadores de calor.

El sistema incluyó una batería de ciclo profundo de gel y un regulador de carga BMS, que controló la tensión generada por los módulos para evitar sobrecarga o descarga abrupta. Como resultado, se obtuvo una tensión de salida de 10.33 V.

En 2021 [23] se demostró la generación de energía a partir de celdas Peltier, aprovechando la energía térmica disipada por el sistema de escape de un motor de combustión interna. Para ello, se utilizó un pirómetro Fluke calibrado con el propósito de identificar el punto de mayor temperatura en el sistema de escape, donde se colocó papel aluminio y la cara caliente de cinco celdas Peltier modelo TEC1-12706 conectadas en serie.

En la cara fría se implementó un disipador de calor y la energía generada fue acondicionada mediante un módulo MT3608, encargado de elevar la tensión de salida del conjunto de celdas hasta aproximadamente 4.7 V, y un módulo TP4056, diseñado para regular dicha tensión y proporcionar una salida fija de 4.2 V adecuada para la carga de una batería LiPo de 3.7 V operando de manera estable con los valores de tensión y corriente suministrados por el sistema termoeléctrico.

En 2021 [24] se diseñó un sistema que aprovecha la energía térmica doméstica en Lomas de Carabayllo, Lima. Se implementaron dos pruebas: una en estufa urbana y otra en estufa rural, utilizando 12 celdas Peltier modelo TEC1-12706 conectadas en serie y colocando las caras calientes en contacto con la superficie de la estufa y las caras frías con un disipador de aletas.

La energía generada fue almacenada en una batería de 18 V y 12 A, alcanzando una tensión de 9.69 V para la estufa urbana y 12 V para la estufa rural, demostrando el potencial del sistema para el aprovechamiento de fuentes térmicas domésticas.

En 2022 [25] utilizó una celda Peltier TEC1–12710 obteniendo un voltaje de 0.81 V empleando recipientes de polipropileno, llenados con agua caliente y con agua fría en estado sólido en sus respectivas caras de la celda, después utilizó 2 celdas conectadas en serie modelo TEC1–12715 obteniendo 2.2 V con una temperatura de 59.9 °C en la cara caliente haciendo girar un motor DC de baja potencia.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad existen diversos sistemas donde el desperdicio de calor es considerable o son fuentes naturales que han sido poco explotadas. Tal es el caso de las celdas Peltier.

El uso de celdas Peltier para la generación de energía presenta una alternativa prometedora para aprovechar las diferencias de temperatura generadas por fuentes pasivas de calor y frío [26].

Sin embargo, aunque cada placa en sí no es cara, su rendimiento hoy en día es muy pequeño y se precisarían un gran número de celdas para alimentar dispositivos de bajo consumo como una lámpara LED además que la vida útil de cada celda está estimada en 20 años [17].

La integración de un lente concentrador solar puede potencialmente aumentar la eficiencia del sistema, pero introduce complejidades adicionales que deben abordarse [26].

Esta problemática se centra en la generación y utilidad eficiente de energía generada por celdas Peltier aplicando el efecto Seebeck con fuentes pasivas de calor y frío.

Las problemáticas a las que se enfrenta son:

1. Eficiencia limitada de las celdas Peltier:

Las celdas Peltier aunque son versátiles, tienen una eficiencia de conversión termoeléctrica baja, lo que limita la cantidad de energía eléctrica generada a partir de un gradiente térmico específico ya que la tensión de salida es proporcional a la diferencia de temperatura y mantener un gradiente térmico significativo y constante a lo largo del tiempo es un reto debido a la disipación de calor [13, 27].

2, Variabilidad de las condiciones ambientales:

La eficiencia del sistema depende en gran medida de la disponibilidad y la intensidad de la luz solar, que puede variar considerablemente debido a factores climáticos y estacionales afectando el control de la temperatura en las celdas Peltier, complicando el mantenimiento de un gradiente térmico óptimo [9].

3. Optimización del uso de un lente concentrador:

Se observa que muchas investigaciones científicas se centran principalmente en la energía solar, ya que el sol, es una buena opción para generar energía limpia.

Sin embargo, el uso directo de la energía solar no es suficiente para una emisión de calor efectiva. Por lo tanto, se utilizan varios tipos de concentradores solares, como espejos parabólicos, reflectores, tubos colectores solares y lentes especialmente diseñados, para lograr un flujo de calor efectivo [28].

La efectividad de un lente concentrador depende de su capacidad para enfocar la luz solar con precisión, lo que puede ser afectado por factores como el ángulo de incidencia de la luz solar y la calidad óptica del lente.

4. Implementación del convertidor Boost:

La principal limitación de las celdas Peltier al aplicar el efecto Seebeck es que la tensión de salida generada suele ser demasiado pequeña e inestable para su uso directo en dispositivos electrónicos. Por esta razón, es necesario incorporar un convertidor DC-DC Boost que eleve dicha tensión a un nivel más adecuado y constante para su aprovechamiento.

Sin embargo, este proceso presenta diversos desafíos técnicos, como la correcta selección de los componentes del convertidor (inductor, capacitor, diodo, transistor y resistencia), así como el cálculo preciso de sus parámetros de operación y la determinación del ciclo de trabajo óptimo que permita alcanzar la tensión deseada sin comprometer la eficiencia del sistema [29].

5. Almacenamiento de energía:

Aunque recientemente se han desarrollado tecnologías de almacenamiento más sostenibles, muchas de las baterías comercializadas actualmente aún presentan desafíos relacionados con su impacto ambiental y seguridad ya que están compuestas por materiales tóxicos difíciles de eliminar [30].

Pero el almacenamiento de energía es un componente clave y necesario para la diversificación de las fuentes de energía renovables debido a su intermitencia.

La intermitencia se refiere a la disponibilidad discontinua de energía eléctrica debido a factores externos que no se pueden controlar y que ocurren en fuentes de generación que varían en un período de tiempo corto.

Las fuentes renovables son intermitentes por naturaleza, por ejemplo, la energía solar, la mareomotriz y la energía eólica; las dos primeras pueden ser más predecibles debido a los patrones meteorológicos, mareales y diurnos, pero la energía eólica no es predecible ya que tiene más variaciones con respecto a la velocidad del viento, la densidad del aire y las características de la turbina.

En general estas fuentes de generación se clasifican como fuentes de disponibilidad variable, ya que su producción no puede garantizarse de forma continua para satisfacer la demanda energética. Además, la generación renovable no depende únicamente de la disponibilidad temporal del recurso, sino también de la magnitud y estabilidad de la fuente generadora [9].

La resolución de estas problemáticas es esencial para desarrollar un sistema eficiente y viable para la generación de energía a partir de celdas Peltier con fuentes pasivas de calor y frío.

Si no se abordan adecuadamente, estos desafíos pueden limitar significativamente la eficiencia y la aplicabilidad práctica del sistema, reduciendo su potencial para contribuir a soluciones energéticas sostenibles.

1.3. Propuesta de solución

En esta propuesta se plantea la implementación de un prototipo de generación de energía basado en celdas Peltier con fuentes pasivas de frío y calor, cuya capacidad de generar energía depende de la diferencia de temperatura entre sus caras.

Los pasos a seguir de la propuesta son:

1.- Diseño y armado de la estructura de soporte:

Se construirá una estructura capaz de sostener de forma segura un lente Fresnel, las celdas Peltier y el disipador de temperatura. Dicha estructura permitirá mantener una alineación precisa con la trayectoria solar, de modo que el lente concentre la radiación sobre la cara caliente de las celdas, mientras el disipador en la cara fría facilite la extracción del calor, favoreciendo así la creación de un gradiente térmico adecuado [31].

2.- Cálculo de la inclinación óptima:

Se determinará el ángulo de inclinación ideal para la instalación en Cuernavaca, Morelos (CENIDET), tomando en cuenta la latitud y la época del año, con el fin de maximizar la captación de energía solar durante el día [32].

3.- Concentración de energía solar:

El uso de lentes Fresnel como concentradores solares se remonta a la década de 1950, siendo el foco principal la generación de energía solar y la energía fotovoltaica concentrada, aunque también se consideraron otras aplicaciones, desde la generación de hidrógeno y fotobiorreactores hasta la iluminación solar [33, 34].

Un lente Fresnel ha demostrado tener eficiencias ópticas del 85-90% además que lentes Fresnel fabricados de acrílico tienen la ventaja de que son ligeras, duraderas y fáciles de producir en masa [35-37].

La energía solar en aplicaciones térmicas se clasifica comúnmente en rangos de temperatura baja ($<80^{\circ}\text{C}$), moderada ($80\text{-}250^{\circ}\text{C}$) y alta ($>250^{\circ}\text{C}$). En el presente sistema, el lente de Fresnel de acrílico operará dentro del rango de temperatura moderada, concentrando la radiación solar en la cara caliente de las celdas Peltier para incrementar la temperatura.

4.- Disipación térmica en la cara fría:

Un disipador de calor cumple una función fundamental en la prevención del sobrecalentamiento, desempeñando un papel clave en la regulación térmica de los dispositivos.

Mediante superficies extendidas, estos elementos incrementan la disipación de calor desde una fuente térmica hacia el entorno, favoreciendo una baja resistencia térmica y asegurando un trayecto de flujo con mínimas pérdidas de presión [38].

Los métodos de disipación de temperatura pueden clasificarse en dos categorías principales: pasivos y activos. La gestión térmica pasiva se basa en mecanismos naturales como la conducción y la convección libre, destacándose por su simplicidad y fiabilidad.

En contraste, la gestión térmica activa utiliza medios forzados, como ventiladores, para incrementar la velocidad del flujo de aire, con lo cual se mejora la transferencia de calor y gracias a eso este enfoque es más utilizado en una amplia gama de dispositivos electrónicos, desde computadoras personales hasta sistemas de control aeronáuticos.

Ambas técnicas presentan ventajas específicas dependiendo del tipo de aplicación, pero el disipador pasivo tiene una buena conductividad térmica, bajo peso y costo relativamente bajo [39, 40].

En el sistema, se empleará un disipador de aluminio colocado en las caras frías de las celdas Peltier, con el propósito de mantener un gradiente térmico eficiente para maximizar la generación de energía y mejorar el desempeño general.

5.- Medición de tensión y corriente generada:

Se monitorearán los niveles de tensión y corriente generadas por el Prototipo de celdas Peltier para validar su funcionamiento bajo condiciones reales de operación.

6.- Implementación de un convertidor Boost:

Los convertidores DC-DC desempeñan un papel fundamental en los sistemas de conversión y acondicionamiento de energía, especialmente en aquellas aplicaciones que demandan bajo peso y tamaño reducido, como los vehículos eléctricos e híbridos, equipos aeronáuticos, sondas espaciales, satélites y sistemas de energía renovable, entre otros [41].

En cuanto a su principio de funcionamiento, los convertidores DC-DC operan en dos fases principales: la fase "ON" y la fase "OFF". Durante la fase "ON", el transistor se activa, permitiendo el almacenamiento de energía en el inductor.

En la fase "OFF", el transistor se desactiva, la energía acumulada se transfiere hacia la carga y el ciclo de trabajo controla la proporción de tiempo entre ambas fases, regulando así la tensión de salida del sistema [42].

En este proyecto, el convertidor Boost será analizado y simulado con el propósito de elevar la tensión de salida generado por las celdas Peltier hasta un nivel adecuado para su posterior almacenamiento. Dicha etapa permitirá validar el diseño y sus parámetros de operación para garantizar un funcionamiento eficiente del sistema.

7.- Almacenamiento de energía:

Actualmente existe una amplia variedad de tecnologías destinadas al almacenamiento de energía, entre las que se incluyen el bombeo hidroeléctrico, las instalaciones de almacenamiento de energía mediante aire comprimido, los volantes de inercia, el almacenamiento magnético, los supercondensadores y el almacenamiento de energía electroquímico.

Las cuatro primeras tecnologías mencionadas presentan ciertas limitaciones relacionadas con la dependencia del sitio, la capacidad o la velocidad de respuesta. Al contrario, el almacenamiento electroquímico que abarca tanto baterías como supercondensadores ofrece una mayor flexibilidad en cuanto a capacidad, junto con una respuesta rápida que permite atender una gama más amplia de aplicaciones.

Gracias a su versatilidad, elevada densidad energética, eficiencia y competitividad en costos, las baterías han tenido un crecimiento significativo en su aplicación dentro de los sistemas de almacenamiento de energía.

El mercado actual ofrece una amplia variedad de tecnologías basadas en diferentes composiciones químicas. Entre ellas se encuentran las baterías de níquel, plomo-ácido (LA), ion-litio (LI) y alcalinas, las cuales figuran entre las más comunes y comercialmente disponibles donde cada una cuenta con características específicas que las hacen más adecuadas para distintas aplicaciones [9, 43].

Para proteger y optimizar su vida útil de las baterías, se puede utilizar un BMS, encargado de igualar las demandas de potencia máxima, seguir la carga, reducir la intermitencia, proteger las celdas de la batería de la degradación interna y proporcionar patrones de carga óptimos [44].

En este proyecto, el almacenamiento de energía se simulará mediante un condensador que representará el comportamiento de un almacenamiento permitiendo observar el proceso de carga del sistema de forma controlada.

8.- Selección de una lámpara LED:

En este proyecto, la carga del sistema se representará mediante una resistencia equivalente. Dicho elemento modela a la lámpara LED que, en un escenario real, podría ser alimentada directamente con la energía almacenada del sistema. Para garantizar una iluminación adecuada y cómoda para la lectura, la lámpara debería proporcionar un flujo luminoso en el rango de 300 a 500 lúmenes [45].

1.4. Objetivos

Objetivo general:

Análisis y estudio de un desarrollo experimental utilizando celdas Peltier para la generación de electricidad empleando fuentes pasivas de frío y calor.

Objetivos específicos:

1. Realizar un estado del arte para conocer el funcionamiento de la celda Peltier y sus posibles aplicaciones.
2. Encontrar el mejor prototipo con las mejores características termoeléctricas para la iluminación doméstica.
3. Implementar un sistema de almacenamiento.
4. Comparación en simulación de los resultados obtenidos de energía.
5. Diseño y operación del prototipo.

1.5. Justificación

En la actualidad, la búsqueda de soluciones energéticas limpias, sostenibles y de bajo costo ha impulsado el desarrollo de tecnologías capaces de aprovechar al máximo la energía solar.

Dentro de estas alternativas, el uso de celdas Peltier como generadores termoeléctricos representa una opción prometedora, especialmente cuando se integran con sistemas de concentración solar que incrementan la diferencia de temperatura en sus caras, aumentando la conversión de calor a electricidad.

El aprovechamiento de esta energía térmica requiere no solo una adecuada captación, sino también una conversión eficiente mediante dispositivos electrónicos de potencia como los convertidores DC-DC Boost, que permiten elevar la tensión generada para hacerla útil en aplicaciones prácticas y el almacenamiento de energía en un condensador que resulta fundamental para garantizar el suministro continuo a cargas como lámparas LED.

La implementación y análisis de este prototipo híbrido (térmico-fotovoltaico-electrónico) responde a la necesidad de contar con soluciones autónomas, sostenibles y de bajo costo. Asimismo, este enfoque permite explorar nuevas formas de aprovechamiento de la energía solar, más allá de los tradicionales paneles fotovoltaicos.

Al finalizar el desarrollo de este proyecto, tanto en simulación como en pruebas experimentales, contribuirá al estudio de la viabilidad de las celdas Peltier como fuente alternativa de generación eléctrica en combinación con sistemas de concentración solar, y permitirá evaluar su potencial como solución energética para aplicaciones de baja potencia.

1.6. Limitaciones

Durante el desarrollo de este proyecto, se identificaron varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados y el alcance de la propuesta:

1.- Las pruebas experimentales se realizaron en la ubicación del CENIDET, Morelos, durante siete días distribuidos entre los meses de agosto y septiembre.

Cada prueba se llevó a cabo en un ciclo diurno, desde las 6:30 hasta las 18:30 horas, bajo condiciones ambientales predominantes de cada día.

Sin embargo, no se consideran explícitamente variaciones estacionales más amplias ni condiciones climáticas extremas o atípicas que puedan presentarse fuera de este periodo y contexto, lo que podría afectar la generalización de los mismos a otras estaciones o entornos.

2.- El sistema utiliza un lente Fresnel como concentrador solar, cuya alineación óptima con el sol dependerá del correcto funcionamiento de la estructura.

Sin embargo, posibles desviaciones en la orientación o nubosidad podrían reducir significativamente el rendimiento térmico de las celdas Peltier.

3.- El diseño en simulación del convertidor DC-DC Boost se realiza en un entorno controlado e ideal.

En esta etapa, no se contempla una implementación física completa del circuito ni la integración de estrategias avanzadas, por ejemplo, como MPPT o control en lazo cerrado, lo cual limita la capacidad de adaptación dinámica del sistema.

4.- La arquitectura se basa en dos configuraciones específicas de celdas Peltier: un arreglo de 10 celdas conectadas en serie y otro conformado por dos ramas de 5 celdas en serie conectadas en paralelo (5×2) lo que representa solo dos de las muchas configuraciones posibles.

5.- El sistema de almacenamiento se representa mediante un condensador en el entorno de simulación, el cual actúa como elemento de almacenamiento temporal de energía.

En esta etapa no se considera la inclusión de una batería real ni de un sistema de gestión (BMS), por lo que no se analizan aspectos como la degradación del almacenamiento, los ciclos de carga y descarga prolongados o el comportamiento bajo distintos perfiles de carga.

6.- El proyecto se enfoca en alimentar una carga de baja potencia (una lámpara LED de escritorio), por lo que no se extiende a otras aplicaciones que requieran mayor demanda energética ni a la integración del sistema con redes eléctricas o microrredes híbridas.

Capítulo 2

Fundamentos

teóricos

Capítulo 2: Fundamentos teóricos.

En el mundo actual, es necesario maximizar la generación de energía debido al aumento constante del consumo de energía eléctrica. Para ello, la energía renovable es la mejor opción [46].

Las energías renovables como la eólica, la mareomotriz y la energía solar, están adquiriendo importancia a la hora de abordar cuestiones energéticas y medioambientales [47].

Este paso constituye una estrategia fundamental para la reducción de la contaminación ambiental y la prevención de eventos climáticos adversos, tales como sequías e inundaciones, los cuales se han intensificado como consecuencia del calentamiento global.

Bajo este enfoque, los dispositivos termoeléctricos emergen como una tecnología prometedora que puede complementar el aprovechamiento de la energía renovable, contribuyendo así a la disminución de la contaminación ambiental [48, 49].

Para comprender el funcionamiento de los dispositivos termoeléctricos es fundamental conocer que la "termoelectricidad" es la fuerza electromotriz producida en dos materiales debido a la presencia de una pendiente de temperatura [50].

Una celda termoeléctrica está conformada por muchas juntas elementales, donde una sola produce bajos niveles de potencia, de tal manera que, para obtener potencias de utilidad práctica, es necesario conectar un número de estas juntas eléctricamente en serie para aumentar la tensión de salida y térmicamente en paralelo para disminuir su resistencia térmica [47].

El mejor material termoeléctrico debe tener las propiedades térmicas de los sólidos vítreos o amorfos, y las propiedades eléctricas de los materiales cristalinos [51].

Esto quiere decir que los mejores materiales semiconductores termoeléctricos implican un equilibrio entre tres factores, combinando una alta termopotencia y alta conductividad eléctrica, pero con una baja conductividad térmica [26].

Los materiales semiconductores que se utilizan generalmente en los módulos termoeléctricos son el telurio de bismuto (Bi_2Te_3), que tiene una densidad electrónica diferente, aunque se puede acceder a más materiales termoeléctricos según las aplicaciones necesarias, como las aleaciones de telurio de plomo (PbTe), silicio de germanio (SiGe) y bismuto de antimonio (BiSb) [47].

El efecto termoeléctrico ha sido estudiado en el mundo como una fuente alternativa de generación de energía eléctrica que va desde niveles bajos hasta altos de potencia [52].

Se mantienen tres efectos termoeléctricos en una celda termoeléctrica, pero solo el efecto Seebeck es el responsable de generar energía eléctrica, el efecto Peltier está unido al efecto Seebeck por las relaciones de Thomson, por lo tanto, en la modelización matemática de la generación eléctrica en las celdas Peltier se encontrarán los tres efectos reflejados.

Sin embargo, cuando se unen dos materiales metálicos o semiconductores diferentes, mantenidos a distintas temperaturas en sus uniones, no solo existen los tres efectos antes mencionados, si no también están presentes el efecto Joule y el efecto Fourier [53].

2.1. Efectos termoeléctricos

A) Efecto Seebeck:

El efecto Seebeck fue descubierto en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck, quien observó de manera accidental que al existir una diferencia de temperatura entre los extremos de una placa de metal se generaba un campo electromagnético.

Tras realizar diversos experimentos, Seebeck determinó que este fenómeno ocurría debido al desplazamiento de electrones desde la zona caliente hacia la fría, lo que daba origen a una energía eléctrica. En la Figura 1 se puede observar un esquema representativo del efecto Seebeck.

En términos simples, cuando un extremo de un material conductor se calienta y el otro se enfría, el gradiente térmico producido genera una tensión eléctrica que permite el flujo de corriente [1].

Ecuación Seebeck:

$$V = \alpha(T_c - T_f)$$

V= Voltaje

α =Coeficiente Seebeck

T_c= mayor temperatura

T_f=menor temperatura [53].

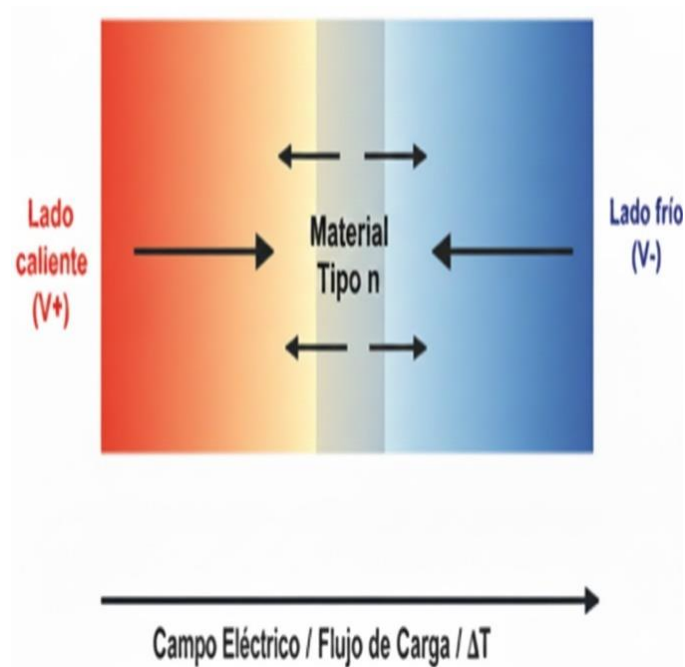


Figura. 1. Esquema del efecto Seebeck.

B) Efecto Peltier:

El efecto Seebeck resulta ser el recíproco del efecto Peltier, el físico francés Jean Charles Peltier descubrió este efecto en 1834; 13 años después de que se descubriera el Efecto Seebeck [1].

El efecto Peltier es un fenómeno termoeléctrico en el que la circulación de una corriente eléctrica entre dos conductores distintos provoca un intercambio de calor en sus uniones. Cuando la corriente fluye, una de las uniones absorbe calor (enfriándose) mientras la otra lo libera (calentándose). En la Figura 2 se muestra el esquema del efecto Peltier.

Ecuación Peltier:

$$Q = I (\pi_B - \pi_A)$$

Q = Flujo de calor

I = Corriente

π_B = Coeficiente Peltier material A

π_A = Coeficiente Peltier material B [47].

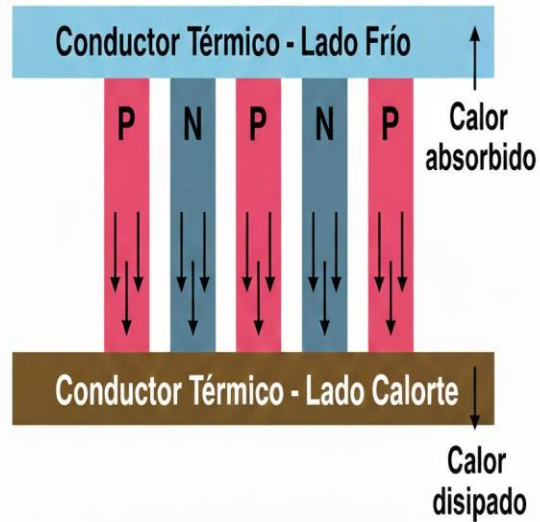


Figura. 2. Esquema del efecto Peltier.

C) Efecto Thomson:

El físico y matemático británico William Thomson descubrió este efecto en el año 1851, siendo él quien demostró una relación existente entre el efecto Seebeck y el efecto Peltier produciendo así el tercer efecto del llamado efecto termoeléctrico.

Este establece que, cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor que presenta un gradiente de temperatura, se produce una absorción o liberación de calor a lo largo del material.

A diferencia del efecto Joule, donde el calor generado es siempre positivo y proporcional al cuadrado de la corriente, el efecto Thomson puede ser positivo o negativo dependiendo del sentido del flujo de corriente.

En otras palabras, si la corriente circula del extremo frío hacia el caliente, el material absorbe calor; mientras que, si la corriente fluye en sentido contrario, el calor se libera hacia el entorno. En la Figura 3 se muestra el esquema del efecto Thomson.

A diferencia de los dos efectos anteriores, el efecto Thomson no se aplica directamente a termopares, sino a un solo material [1].

Ecuación Thomson:

$$\pi = \alpha T$$

π = Coeficiente Peltier

α = Coeficiente Seebeck

T = Temperatura [16].

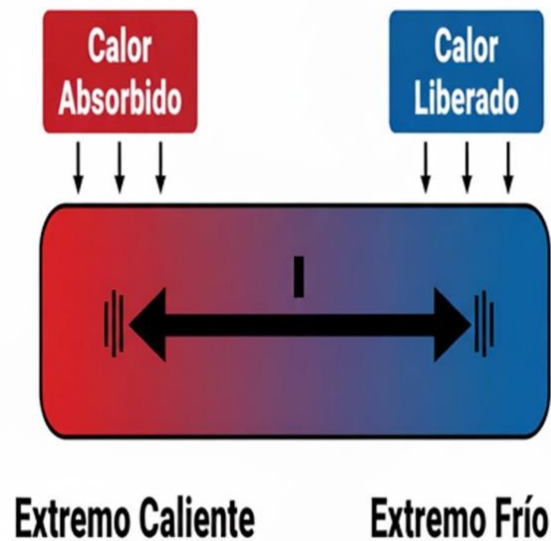


Figura. 3. Esquema del efecto Thomson.

D) Efecto Joule:

El efecto Joule, descubierto por el físico inglés James Prescott Joule en 1841, describe el calentamiento que se produce en un material conductor o semiconductor cuando una corriente eléctrica circula a través de él.

Este fenómeno ocurre debido a la resistencia eléctrica del material, que transforma parte de la energía eléctrica en calor. En la Figura 4 se muestra el esquema del efecto Joule.

A diferencia de los efectos termoelectricos (Seebeck, Peltier y Thomson), el efecto Joule no depende de un gradiente de temperatura ni de la naturaleza de los materiales en contacto, sino únicamente del paso de la corriente y de la resistencia del conductor [1].

Ecuación Joule:

$$Q=I^2RT$$

Donde Q es la energía calorífica producida (en joules), I es la corriente eléctrica que circula por el conductor (en amperios), R es la resistencia eléctrica del material (en ohmios) y T representa el tiempo durante el cual fluye la corriente (en segundos) [53].

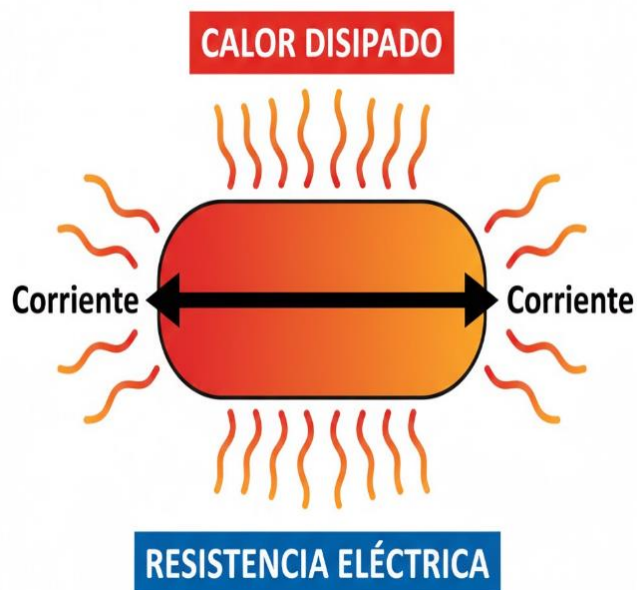


Figura. 4. Esquema del efecto Joule.

E) Efecto Fourier:

Un factor relevante relacionado con la eficiencia de la celda Peltier es la conductividad térmica entre cada una de las caras (frío y calor). Esta conducción de calor es una propiedad de los materiales, y actúa cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas están en contacto, transmitiendo calor del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura. En la Figura 5 se muestra el esquema del efecto Fourier.

Ecuación Fourier:

$$QC=-k \Delta T$$

El flujo de calor que atraviesa la unidad de área por unidad de tiempo, QC, es proporcional al gradiente de temperatura, ΔT , denominándose conductividad térmica al coeficiente de proporcionalidad, k [1].

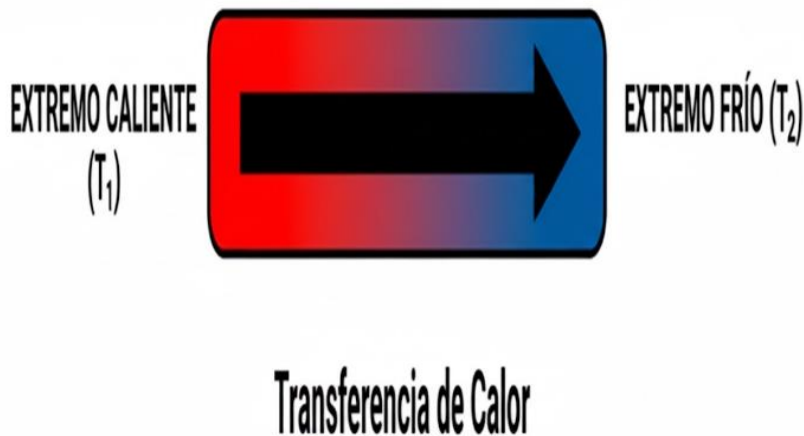


Figura. 5. Esquema del efecto Fourier.

2.2. Celdas Peltier

Las celdas que se comercializan esencialmente están compuestas por dos tipos de elementos semiconductores: telurio de bismuto.

Las celdas estándar como por ejemplo TEC1-12706 son las más usadas, ya que, son de fácil montaje, manejo y trabajan en amplios rangos de temperatura. Además, son altamente accesibles en el mercado y por esta razón se las puede encontrar a precios muy económicos. En la Figura 6 se muestra el aspecto físico de una celda Peltier y en la Figura 7 se muestra su estructura interna.

La diferencia de temperatura que una Peltier normalmente genera entre sus dos caras es de unos $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, es decir si queremos que la cara fría esté a unos $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la parte caliente no debería superar los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La máxima temperatura con la que trabaja normalmente las celdas es de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y cuando se sobrepasa este límite se corre el riesgo de romperse de forma irreversible [53].

Se puede utilizar una combinación variada de celdas Peltier utilizando conexiones en serie para obtener una mayor tensión y en paralelo para obtener una mayor corriente.

Las celdas Peltier se utilizan en el hogar, en la medicina, en el ejército, en la investigación espacial, en bombas de calor, en secadores de aire y principalmente sistemas de refrigeración [54, 55].



Figura. 6. Aspecto físico de una celda Peltier.



Figura. 7. Estructura de una celda Peltier.

2.3. Revisión de las topologías de la celda Peltier

Para el desarrollo del presente proyecto, se llevó a cabo una revisión documental del estado del arte, consultando artículos científicos, tesis, publicaciones técnicas y fuentes especializadas. En la Tabla 2 se muestra el cuadro del estado del arte.

La investigación se enfocó en los siguientes elementos: las celdas Peltier, el convertidor DC-DC Boost, el almacenamiento con baterías y capacitores, sistemas de gestión y lentes Fresnel utilizados para concentración solar.

En primer lugar, se analizaron los principios de funcionamiento de las celdas Peltier, profundizando en los efectos termoeléctricos que las rigen, su estructura interna, y los materiales semiconductores con los que está fabricada con el objetivo de evaluar su capacidad de generación eléctrica. Asimismo, se investigaron diferentes configuraciones de conexión (serie y paralelo) con el fin de optimizar la energía de salida del prototipo.

Se investigaron diversas fuentes pasivas de calor y frío con el propósito de generar el gradiente térmico útil para un buen funcionamiento del prototipo con las celdas Peltier. Como fuente de calor pasiva se eligió la radiación solar, la cual se concentra mediante un lente Fresnel dirigido hacia las caras calientes de las celdas y como fuente fría pasiva en las caras frías se eligió un disipador de aluminio.

Finalmente, se estudiaron los principios de operación del convertidor DC-DC Boost, cuya función es incrementar la energía generada por las celdas Peltier hasta niveles adecuados para su aprovechamiento y se analizaron las características esenciales de las baterías y capacitores, así como los sistemas de gestión de batería (BMS), los cuales son fundamentales para garantizar un almacenamiento seguro y estable.

Tabla. 2. Tabla del estado del arte.

Referencia	Año	Aporte
[1]	2018	Efectos termoeléctricos.
[2]	2024	Fórmulas para calcular los valores de una celda Peltier.
[3]	2021	Generador termoeléctrico como tecnología destacada.
[4]	2018	Parámetros de tamaño de la celda Peltier.
[5]	2020	Cálculo de eficiencia con sistema de refrigeración pasiva.
[6]	2023	Las energías renovables.
[7]	2023	Aplicaciones de las energías renovables.
[8]	2024	Energía limpia con generadores termoeléctricos.
[9]	2022	Comparación de almacenamiento de energía y sus características.
[10]	2024	Cálculos para carga de baterías.

[11]	2021	Componentes y estructura de la celda Peltier.
[12]	2016	Introducción a la energía solar.
[13]	2014	Fórmulas para calcular eficiencia en una celda Peltier.
[14]	2025	Aplicaciones de energía solar.
[15]	2021	Definición de pares termoeléctricos.
[16]	2017	Conexiones en paralelo con celdas Peltier.
[17]	2012	Vida útil de la celda Peltier.
[18]	2024	Módulos Peltier.
[19]	2021	Termoelectricidad y materiales termoeléctricos.
[20]	2018	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[21]	2018	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[22]	2019	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[23]	2021	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[24]	2021	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[25]	2022	Antecedentes de celdas Peltier para generación de energía.
[26]	2021	Tamaño de las celdas y eficiencia.
[27]	2017	Simulaciones con convertidor Boost.
[28]	2019	Energía solar con la implementación de lentes concentradores.
[29]	2016	Circuito equivalente de un convertidor Boost.
[30]	2019	Circuito equivalente de celdas Peltier en serie y en paralelo.
[31]	2024	Potencial energético de las celdas Peltier.
[32]	2017	Angulo de inclinación.
[33]	2019	Lentes Fresnel.
[34]	2015	Diagrama de un lente Fresnel.
[35]	2016	Concentradores solares.
[36]	2016	Concentrador Fresnel.
[37]	2012	Eficiencia de un lente Fresnel.
[38]	2024	Tipos de disipadores de calor y sus características.
[39]	2014	Construcción de disipadores de calor.
[40]	2021	Disipadores de calor pasivos y activos.
[41]	2021	Convertidores Boost.
[42]	2023	Características de un convertidor Boost.
[43]	2023	Baterías de Ion litio.
[44]	2024	BMS y sus ventajas.
[45]	2023	Lúmenes para lectura.
[46]	2020	Principio de operación de las celdas Peltier.
[47]	2023	Tipos de semiconductores.
[48]	2023	Módulo termoeléctrico.

[49]	2023	Modelado de un convertidor Boost, una celda Peltier y una batería.
[50]	2019	Ecuaciones de efectos termoeléctricos.
[51]	2021	Enfriamiento pasivo de la cara fría de las celdas Peltier.
[52]	2015	Caracterización de la celda Peltier.
[53]	2022	Generador termoeléctrico y termoelectricidad.
[54]	2023	Conexiones en serie con celda Peltier.
[55]	2018	Celda Peltier.
[56]	2025	Hoja de datos de celda Peltier modelo TEC1-12706
[57]	2023	Coeficiente Seebeck en celdas fabricadas con telurio de bismuto.
[58]	2014	Coeficiente Seebeck
[59]	2022	Deslumbramiento
[60]	2024	Iluminación
[61]	2023	Calidad de luz

2.4. Conclusiones del estado del arte

El análisis del estado del arte permitió establecer una base sólida de conocimientos para el diseño e implementación de un prototipo de generación termoeléctrico mediante celdas Peltier.

A través de la revisión bibliográfica, se identificaron los principios físicos que rigen el funcionamiento termoeléctrico de las celdas Peltier, así como sus estructuras internas, materiales semiconductores y configuraciones más eficientes, tanto en serie como en paralelo.

Además, se encontraron antecedentes relevantes sobre su capacidad de generación energética y vida útil, lo cual permitió dimensionar correctamente el sistema a implementar.

Se profundizó en el uso de fuentes pasivas de calor y frío, destacando la viabilidad de utilizar la radiación solar concentrada mediante un lente Fresnel como fuente térmica principal, y soluciones como un disipador de calor para mantener un gradiente térmico efectivo.

Por otro lado, se revisaron múltiples enfoques sobre el funcionamiento y modelado de un convertidor DC-DC tipo Boost, lo que facilitó la selección de una topología adecuada para elevar la tensión generada por el prototipo y simularlo correctamente.

Asimismo, se estudiaron las características técnicas de diferentes tipos de sistemas de almacenamiento y como modelarlos, así como la importancia de un sistema de gestión de batería (BMS) para preservar la integridad y operatividad del sistema de almacenamiento.

Esta recopilación de información resulta fundamental para sustentar las decisiones técnicas del proyecto y guiar su desarrollo experimental y en simulación con base en criterios fundamentados y actualizados.

Capítulo 3 Diseño de prototipo

Capítulo 3: Diseño de prototipo.

El propósito fue identificar el prototipo más adecuado para aplicaciones de iluminación doméstica, considerando tanto su desempeño termoeléctrico como su viabilidad práctica.

Para lograrlo, se abordaron diversas etapas que incluyeron la construcción y ensamblado del prototipo, la incorporación de diferentes materiales y configuraciones, así como la evaluación de la distribución térmica en láminas mediante el uso de una cámara termográfica.

Esta prueba permitió analizar qué lámina favorecía una mejor distribución y uniformidad de la temperatura en las caras calientes de las celdas Peltier siendo factor determinante para optimizar la conversión de energía y garantizar un funcionamiento estable del prototipo.

De esta manera, los resultados obtenidos representarán un paso clave en la selección del diseño final, al integrar tanto criterios de eficiencia energética como aspectos prácticos de construcción y operación.

3.1. Lente Fresnel como concentrador solar

Con el objetivo de concentrar la radiación solar en las caras calientes de las celdas Peltier, se adquirió un lente Fresnel de material acrílico (PMMA) con dimensiones de 30 × 30 cm y que trabaja a una distancia focal de 33 cm como se puede observar en la Figura 8.

Este lente permitirá focalizar la energía solar, aumentando así el gradiente térmico necesario para la generación termoeléctrica.

Para facilitar su manipulación, montaje y alineación, se fabricó un marco de soporte que rodea el lente como se puede observar en la Figura 9, otorgándole mayor rigidez estructural y protección física; este marco, construido con material ligero pero resistente, permite integrar el lente al sistema y asegurar su correcta orientación durante las pruebas experimentales.

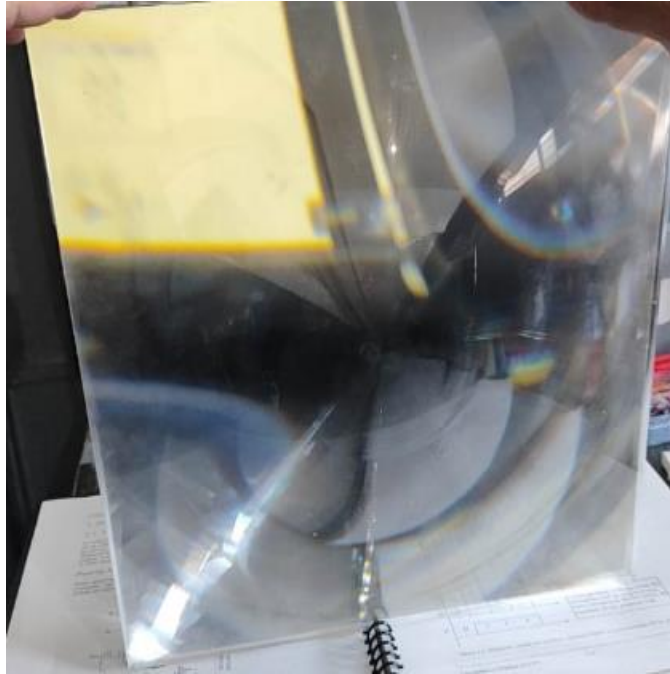


Figura. 8. Lente Fresnel.



Figura. 9. Lente Fresnel con marco.

3.2. Estructura de soporte y ajuste focal

Para ajustar con precisión la distancia entre el lente Fresnel y las celdas Peltier, se diseñó una estructura mecánica con brazos móviles que permite acercar o alejar el lente respecto a la base como se puede observar en las Figuras 10 y 11.

Este sistema de desplazamiento manual facilita la alineación del punto focal de acuerdo con la distancia focal teórica del lente y las condiciones solares del momento, lo que resulta esencial para lograr una concentración efectiva del calor sobre las caras calientes de las celdas Peltier.

Además del ajuste vertical, la estructura también fue diseñada con la capacidad de realizar desplazamientos horizontales hacia la izquierda o derecha permitiendo reorientar el sistema manualmente cada media hora durante la fase experimental, de manera que el lente se mantenga alineado con los rayos solares el mayor tiempo posible a lo largo del día.

Gracias a esta doble movilidad, se optimiza la captación de energía solar, lo que se traduce en un mayor gradiente térmico y por ende en una mejor producción de energía eléctrica por parte del prototipo termoelectrico.



Figura. 10. Prototipo a 33 cm de distancia focal.

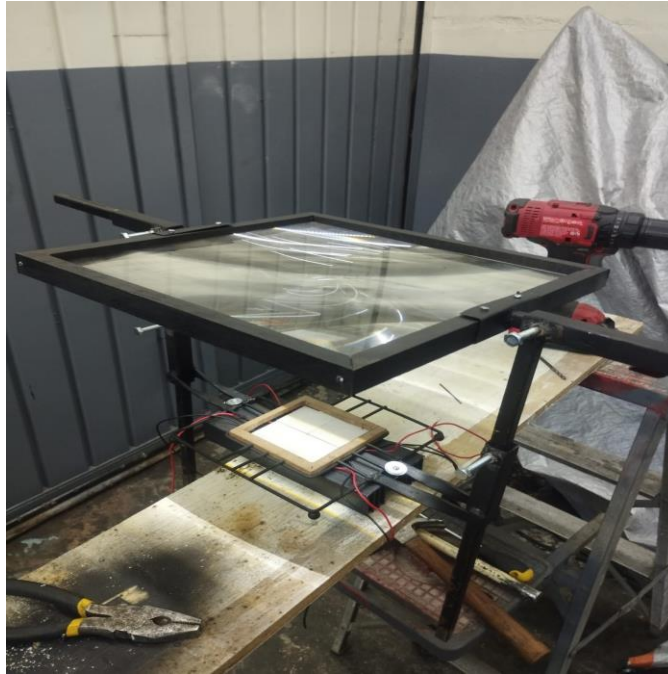


Figura. 11. Prototipo a 10 cm de distancia focal.

3.3. Arreglo de celdas Peltier

A continuación, se muestran las celdas Peltier modelo TEC1-12706. En la Figura 12 se puede observar como las caras frías de las celdas han sido fijadas a un disipador de aluminio plano, utilizando pasta térmica para asegurar un contacto eficiente y minimizar las pérdidas de transferencia de calor.

Esto permite mantener una baja temperatura en la parte inferior de la celda, necesaria para establecer el gradiente térmico. Por otro lado, en la Figura 13, se aprecia como la radiación solar concentrada por el lente Fresnel incide directamente sobre las caras calientes de las celdas.

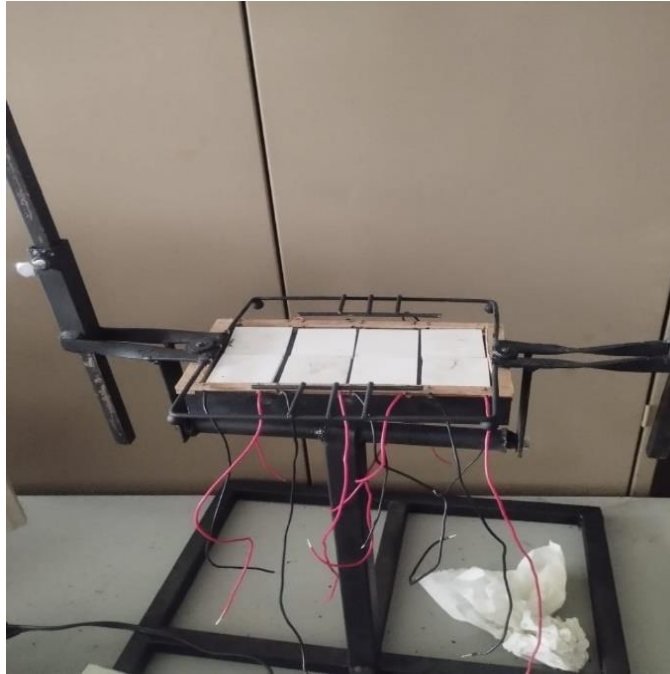


Figura. 12. Arreglo de celdas Peltier.

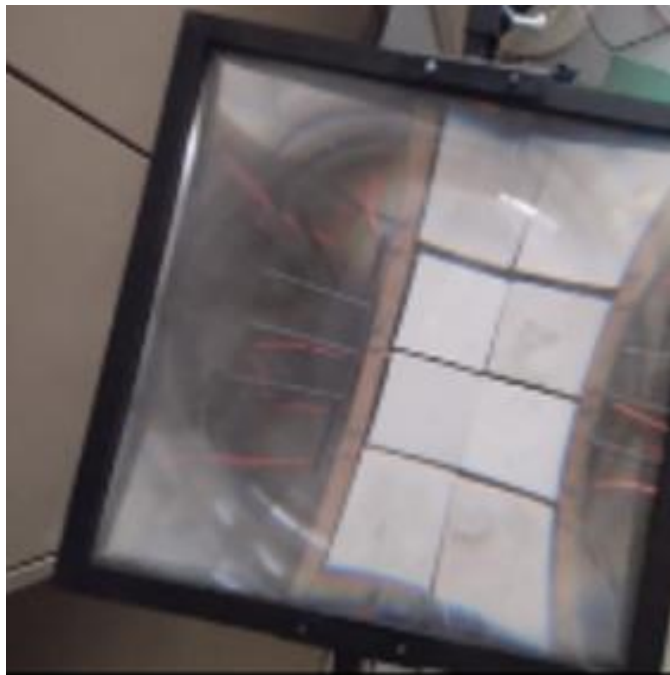


Figura. 13. Vista superior del prototipo.

3.4. Protección térmica de las celdas

Con el objetivo de proteger las celdas Peltier de un posible sobrecalentamiento provocado por el punto focal del lente Fresnel, se integró una placa sobre las caras calientes de las celdas Peltier como se puede observar en las Figuras 14 y 15.

Esta placa actúa como una barrera térmica que evita daños por exposición directa y al mismo tiempo, favorece una distribución más uniforme del calor sobre todas las caras calientes de las celdas.

Inicialmente, se seleccionó una lámina de aluminio recubierta con un material conocido como primario automotriz, el cual se utiliza comúnmente en la industria de la pintura de vehículos.

Este recubrimiento tiene la propiedad de elevar la temperatura en su superficie exterior, mientras que en su cara interna permite una disipación moderada del calor, lo que la convirtió en una opción viable para esta primera etapa de pruebas.

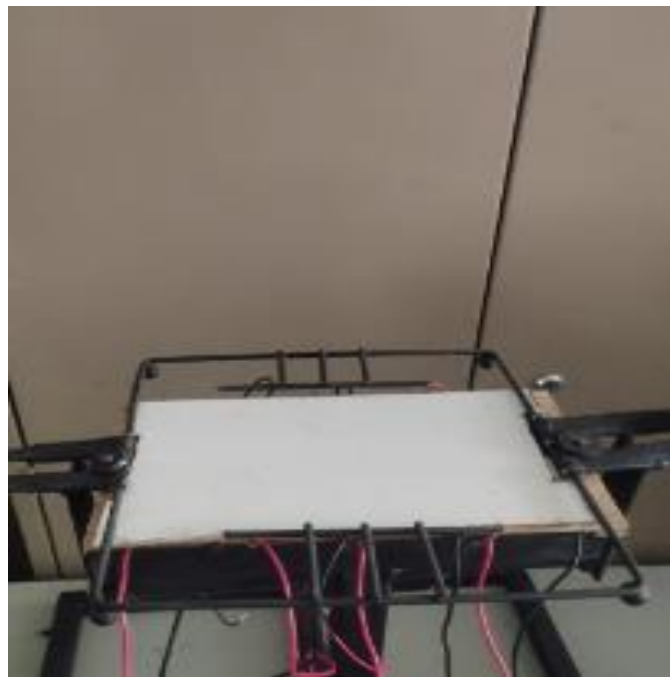


Figura. 14. Placa de aluminio sobre celdas Peltier.



Figura. 15. Punto focal concentrado en placa de aluminio.

3.5. Prueba termográfica comparativa

Con el propósito de evaluar el comportamiento térmico de la primera placa conductora de calor, se realizó una prueba con una cámara termográfica para registrar las temperaturas alcanzadas en distintos puntos del sistema.

En esta etapa inicial, la estructura se mantuvo fija a un ángulo de 90 grados respecto al plano horizontal, con el fin de centrarse exclusivamente en el análisis de la distribución del calor en las caras calientes y el efecto del disipador en las caras frías de las celdas Peltier.

Para esta prueba se comparó la lámina de aluminio recubierta con primario automotriz con una lámina de cobre pintada de color negro, seleccionada por sus mejores propiedades de conducción térmica y su capacidad de absorción solar.

La intención fue comprobar cual placa permitía una distribución de calor más uniforme y eficiente sobre las diez celdas Peltier, contribuyendo así a un mayor gradiente térmico.

La distancia entre el lente Fresnel y la placa se fijó en 33 cm, correspondiente a la distancia focal especificada por el fabricante del lente. Esta configuración asegura que los rayos solares converjan adecuadamente sobre la superficie, maximizando el efecto térmico sin dañar directamente las celdas.

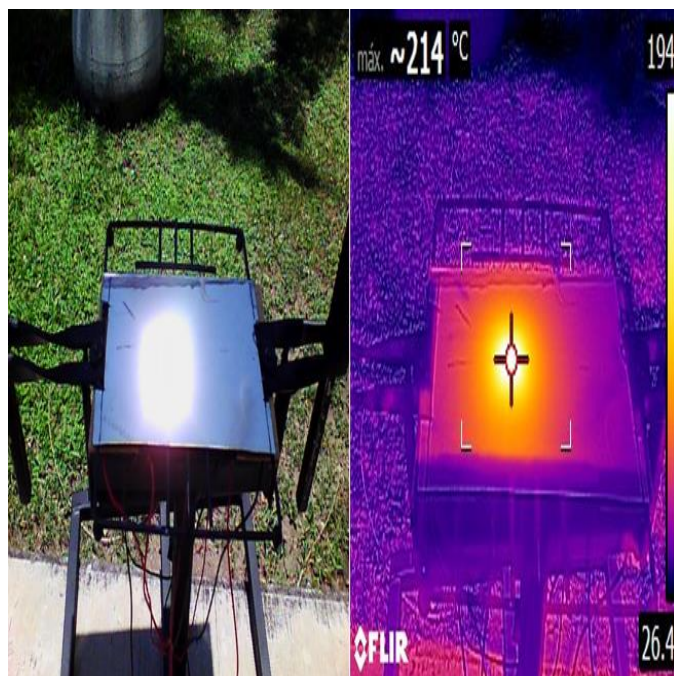


Figura. 16. Temperatura en punto focal de lámina de aluminio recubierta de primario automotriz.



Figura. 17. Temperatura en punto focal de lámina de cobre pintada de negro.

La Figura 17 muestra que, en la placa de cobre pintada de negro, el punto focal alcanzó una temperatura máxima de 165 °C. Esta placa favoreció una mejor distribución del calor sobre la superficie; sin embargo, aún se aprecian ligeras variaciones térmicas alrededor del área de concentración.

En contraste en la Figura 16 muestra que, la placa de aluminio recubierta con primario automotriz alcanzó una temperatura mayor, de hasta 214 °C, pero con una distribución del calor menos uniforme y más concentrada en la zona focal.

Estos resultados permiten concluir que, si bien el aluminio con recubrimiento concentra más energía en el punto focal, el cobre pintado de negro ofrece una mejor homogeneidad térmica, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones donde se requiere un gradiente de temperatura equilibrado sobre las celdas Peltier.

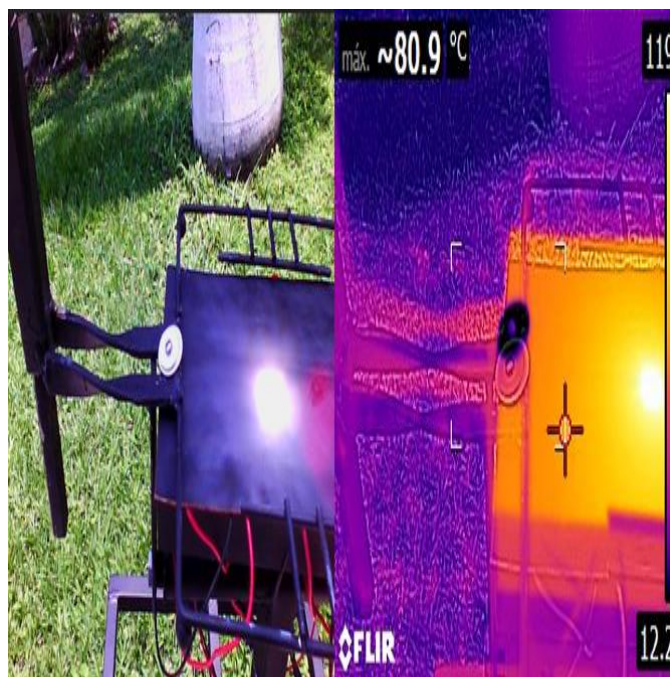


Figura. 18. Temperatura en cara caliente de celdas Peltier.

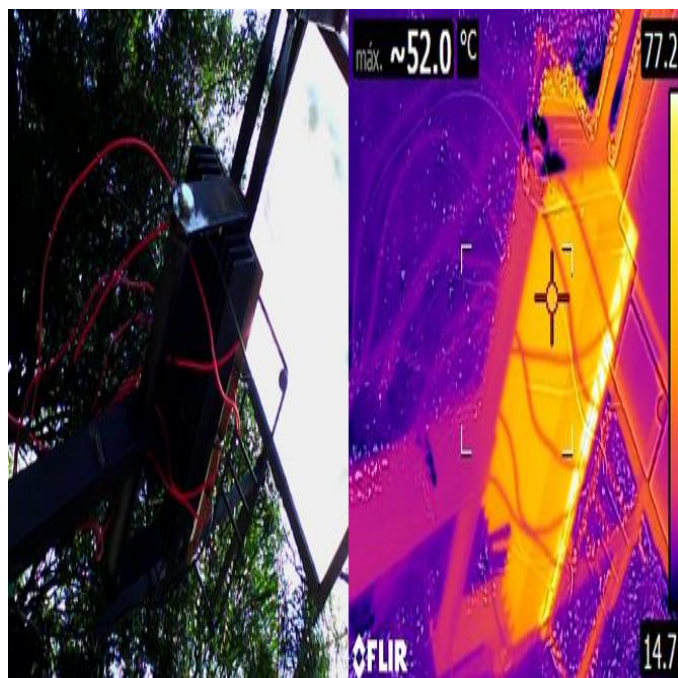


Figura. 19. Temperatura en cara fría de celdas Peltier.

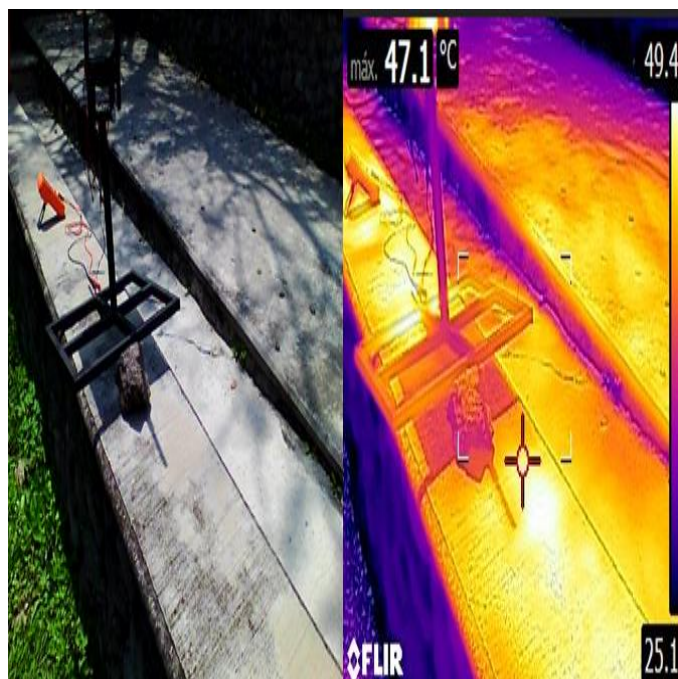


Figura. 20. Temperatura superficial en el entorno.

Como se puede observar en la Figura 18 en las zonas laterales de la placa, donde se distribuye el calor hacia las celdas Peltier, se registraron temperaturas promedio de 80.9 °C, evitando así el sobrecalentamiento localizado en las celdas.

En cuanto a la cara fría de las celdas, en contacto con el disipador de aluminio, en la Figura 19 se puede observar que la temperatura registrada fue de 52.0 °C y, por otra parte, en la Figura 20 se observa que la temperatura superficial del entorno durante la prueba fue de 47.1 °C, lo que indica que el disipador logró extraer parte del calor generado, aunque aún con un gradiente térmico moderado. Estos valores servirán como referencia inicial para futuras comparaciones con otros ángulos y horarios.

3.6. Montaje final del prototipo

Una vez completadas las etapas de ensamblaje, ajuste y alineación, la estructura quedó totalmente montada y funcional, lista para dar inicio a la fase experimental.

En las Figuras 21 y 22 se muestra el sistema en su estado final: el lente Fresnel instalado con su respectivo marco de soporte, las celdas Peltier, el disipador de aluminio en contacto con las caras frías, los brazos móviles que permiten ajustar la distancia focal y el eje central de soporte que permite realizar ajustes de orientación hacia la izquierda o la derecha durante el día.

Este montaje final cumple con los criterios establecidos en el diseño, permitiendo aprovechar únicamente fuentes pasivas (energía solar y disipación natural) para generar un gradiente térmico.

Con ello, se garantiza que el sistema se encuentra operativamente listo para iniciar las mediciones de tensión y corriente generadas bajo condiciones reales de radiación solar.



Figura. 21. Vista superior del prototipo funcional.



Figura. 22. Vista lateral del prototipo funcional.

Capítulo 4 Diseño de parte experimental

Capítulo 4: Diseño de parte experimental.

Se presentan las pruebas experimentales realizadas con el prototipo termoeléctrico con celdas Peltier. El objetivo fue evaluar el desempeño bajo diferentes configuraciones eléctricas (serie y paralelo), así como con y sin movimiento de seguimiento solar, para comparar la tensión y corriente generada a lo largo del día.

4.1. Metodología de pruebas

Las pruebas se realizaron en TecNM CENIDET, ubicado en la latitud 18.8766° N y longitud 99.2199277° O, durante los meses de agosto y septiembre, desde las 6:30 hasta las 18:00 horas, registrando datos cada media hora.

Para maximizar la captación de radiación solar, la estructura se orientó hacia el sur, siguiendo un ángulo de inclinación óptimo de aproximadamente 81° respecto al plano horizontal.

Este ángulo (θ) se calculó considerando la latitud del lugar ($\phi=18.8766^{\circ}$ N) y la declinación solar durante agosto y septiembre ($\delta \approx 10^{\circ}$), utilizando la expresión: ángulo ($\theta=90^{\circ} - \text{latitud del lugar } (\phi=18.8766^{\circ}) + \text{declinación solar en agosto y septiembre } (\delta=10^{\circ})$). Sustituyendo los valores es a $\theta - \phi + \delta = 81.1234^{\circ}$.

Esta orientación garantiza que la radiación solar incida de una manera adecuada en las caras calientes de las celdas Peltier durante todo el periodo de medición, favoreciendo la generación termoeléctrica de manera consistente.

4.2. Configuraciones evaluadas

- 1.- 10 celdas Peltier conectadas en serie, con movimiento cada media hora.
- 2.- 10 celdas Peltier conectadas en paralelo (5x2), con movimiento cada media hora.
- 3.- 10 celdas Peltier en serie sin movimiento, para evaluar la diferencia respecto al sistema con movimiento.

4.3. Resultados en configuración serie

Se realizaron tres pruebas con la conexión de 10 celdas Peltier en serie, aplicando movimiento cada media hora.

A continuación, se presentan las tablas 3,4 y 5 donde se muestran los valores obtenidos de tensión y corriente y en las Figuras 23 a 28 las gráficas resultantes de las tres pruebas, las cuales representan el comportamiento general del sistema bajo esta configuración.

Tabla. 3. Prueba 1 en serie.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1.2	1.2
7:00	1.9	1.8

7:30	1.9	1.9
8:00	2.2	2.2
8:30	2.4	2.4
9:00	2.5	2.5
9:30	2.7	2.6
10:00	2.7	2.7
10:30	2.6	2.6
11:00	2.7	2.7
11:30	2.6	2.6
12:00	2.7	2.7
12:30	2.8	2.8
13:00	2.7	2.6
13:30	2.7	2.8
14:00	2.6	2.7
14:30	2.8	2.8
15:00	2.6	2.6
15:30	2.5	2.4
16:00	2.4	2.3
16:30	2.2	2.1
17:00	2	1.9
17:30	1.8	1.8
18:00	1.7	1.7

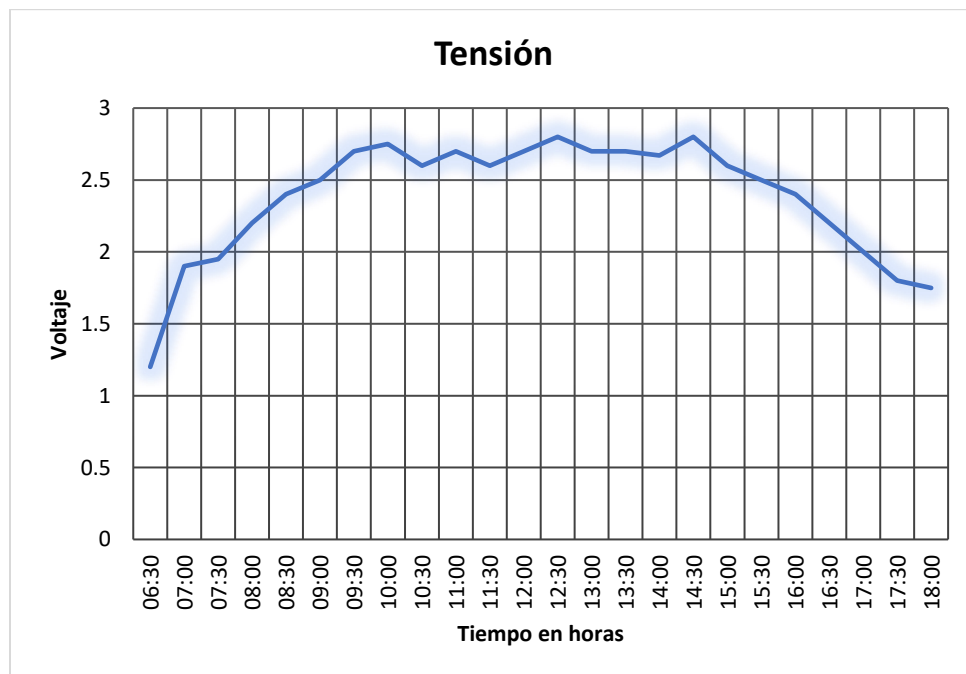


Figura. 23. Gráfica de tensión primera prueba en serie.

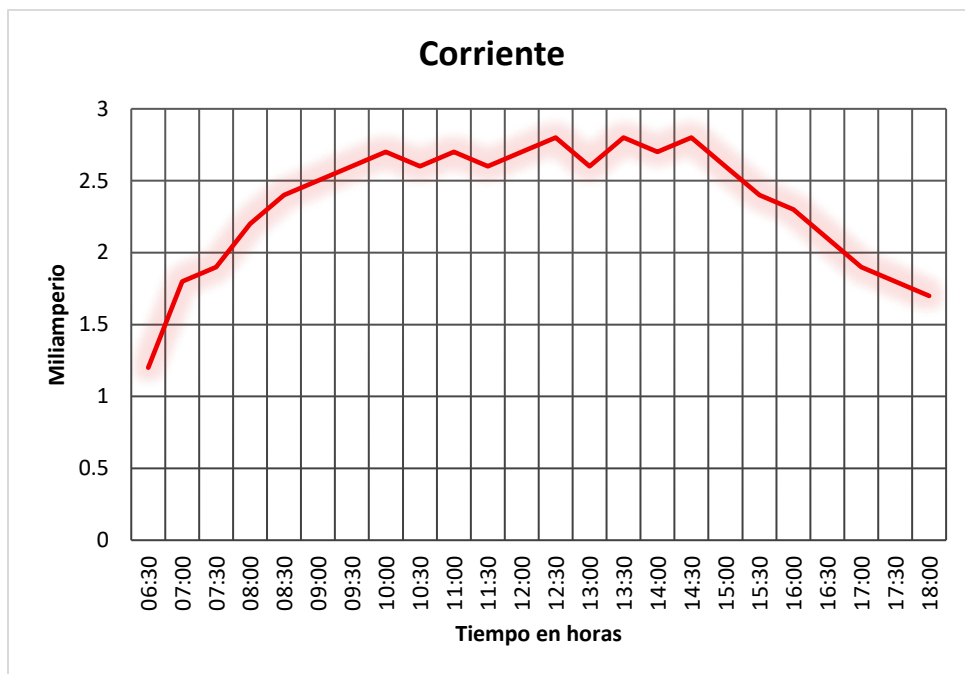


Figura. 24. Gráfica de corriente primera prueba en serie.

Tabla. 4. Prueba 2 en serie.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1.1	1.1
7:00	1.2	1.2
7:30	1.3	1.3
8:00	1.9	1.8
8:30	2	1.9
9:00	2.5	2.5
9:30	2.8	2.8
10:00	3.2	3.2
10:30	3.2	3.2
11:00	3.2	3.2
11:30	3.4	3.3
12:00	3.5	3.5
12:30	3.3	3.3
13:00	3.2	3.1
13:30	2.7	2.7
14:00	2.6	2.6
14:30	2.5	2.5
15:00	2.3	2.2
15:30	2.1	2
16:00	2	2
16:30	1.8	1.8

17:00	1.6	1.6
17:30	1.4	1.4
18:00	1.2	1.2

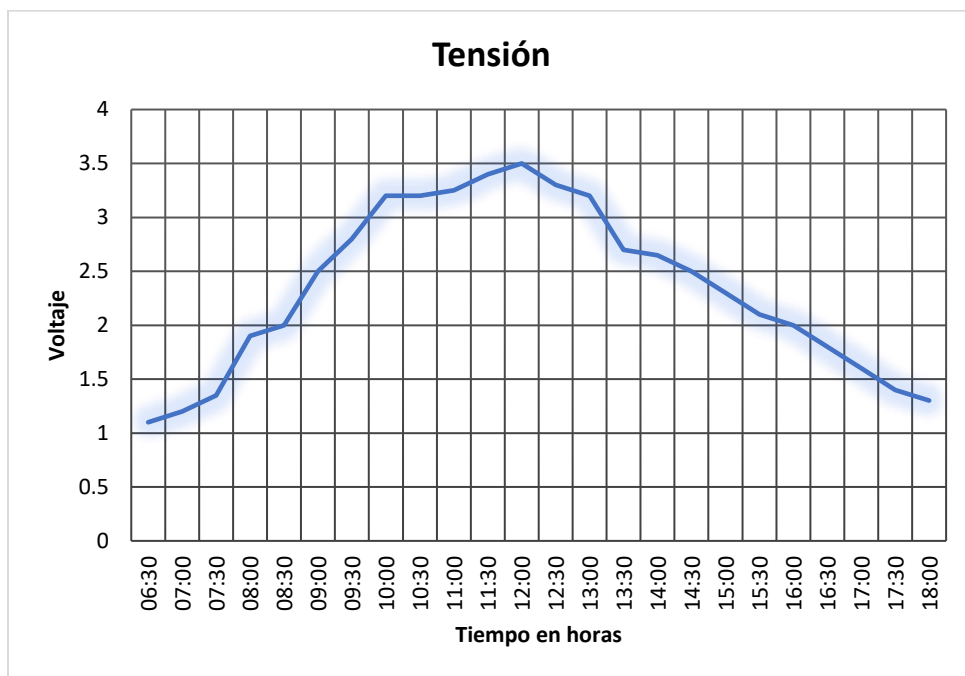


Figura. 25. Gráfica de tensión segunda prueba en serie.

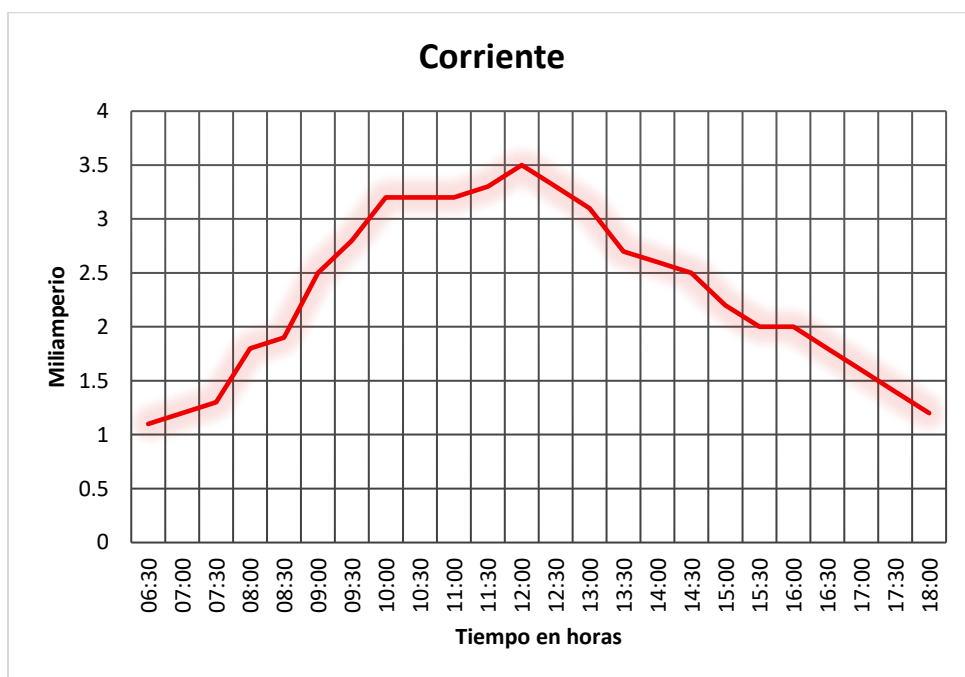


Figura. 26. Gráfica de corriente segunda prueba en serie.

Tabla. 5. Prueba 3 en serie.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1	1
7:00	1.7	1.6
7:30	1.9	1.8
8:00	2.2	2.2
8:30	2.5	2.5
9:00	2.7	2.6
9:30	2.8	2.7
10:00	3	2.9
10:30	3	2.9
11:00	3	2.9
11:30	3.1	3.1
12:00	3.1	3.1
12:30	3.1	3.1
13:00	3	2.9
13:30	2.7	2.6
14:00	2.5	2.5
14:30	2.4	2.4
15:00	2.3	2.3
15:30	2.2	2.1
16:00	2.1	2.1
16:30	2	1.9
17:00	1.9	1.9
17:30	1.8	1.8
18:00	1.6	1.5

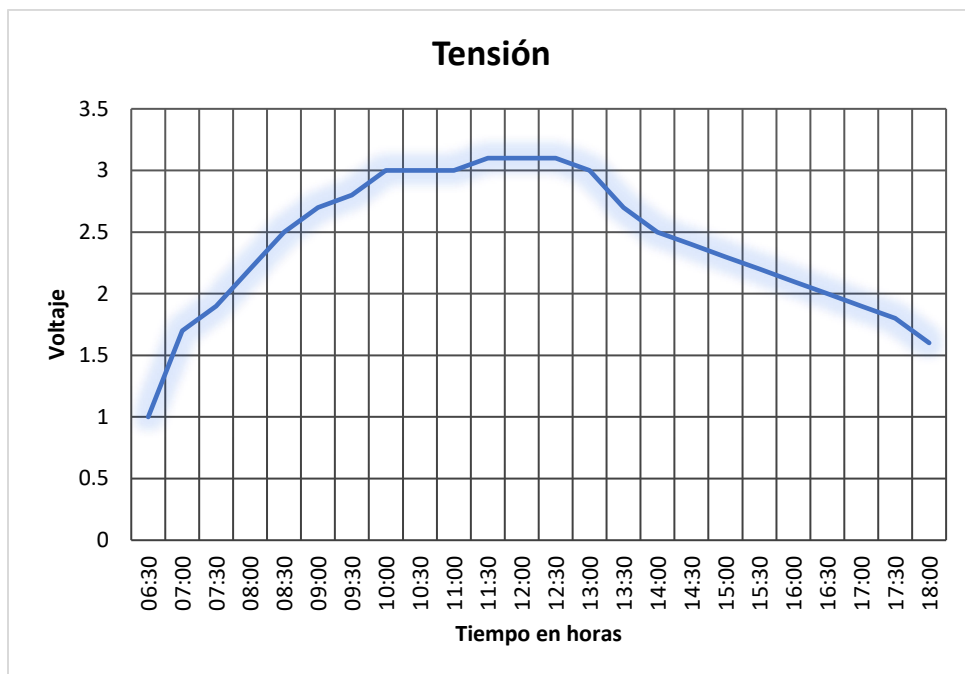


Figura. 27. Gráfica de tensión tercera prueba en serie.

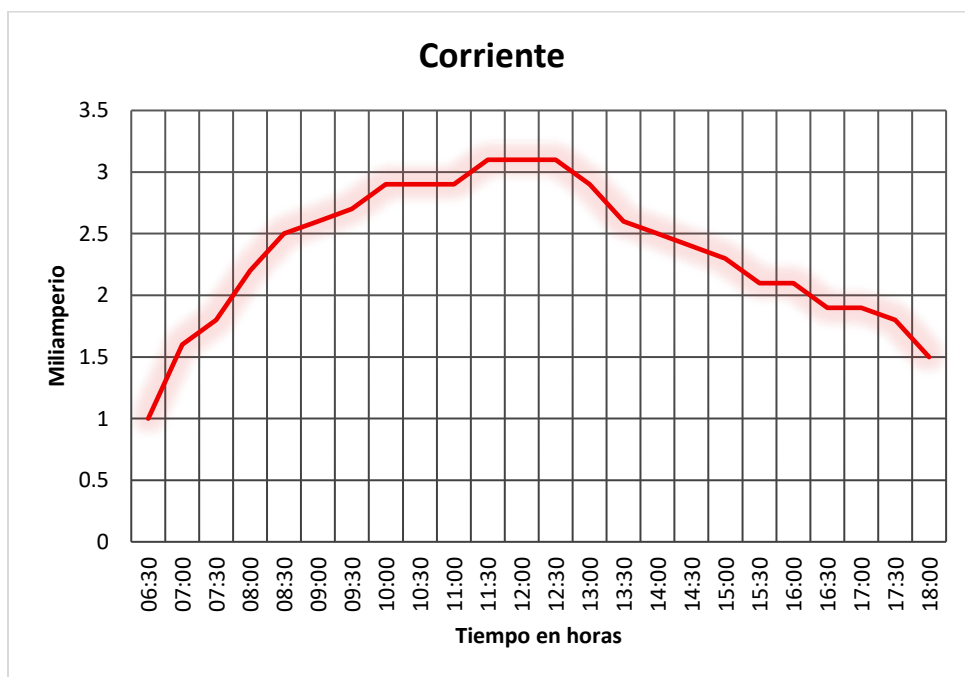


Figura. 28. Gráfica de corriente tercera prueba en serie.

De acuerdo con la observación experimental y el análisis realizado, en la configuración en serie cada celda contribuyó directamente a la suma de tensión. Además, no se apreciaron pérdidas significativas derivadas de desajustes térmicos entre celdas, lo que permitió alcanzar mayores valores de tensión y corriente.

4.4. Resultados en configuración paralelo

Se realizaron tres pruebas con la conexión de 10 celdas en paralelo (5x2), también aplicando movimiento cada media hora.

A continuación, se muestran las tablas 6,7 y 8 donde se pueden observar los valores obtenidos de tensión y corriente y en las Figuras 29 a 34 las gráficas obtenidas de las tres pruebas, las cuales representan el comportamiento general del sistema bajo esta configuración.

Tabla. 6. Prueba 1 en paralelo.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.5	0.5
7:00	0.6	0.6
7:30	1.2	1.2
8:00	1.4	1.4
8:30	1.6	1.6
9:00	1.6	1.6
9:30	1.7	1.7
10:00	1.5	1.5
10:30	1.8	1.9
11:00	1.9	1.9
11:30	1.9	1.9
12:00	1.7	1.7
12:30	1.8	1.9
13:00	1.5	1.5
13:30	1.7	1.8
14:00	1.6	1.7
14:30	1.3	1.4
15:00	1.1	1.2
15:30	1.2	1.2
16:00	1.3	1.3
16:30	1	1
17:00	1	1
17:30	0.8	0.8
18:00	0.5	0.5

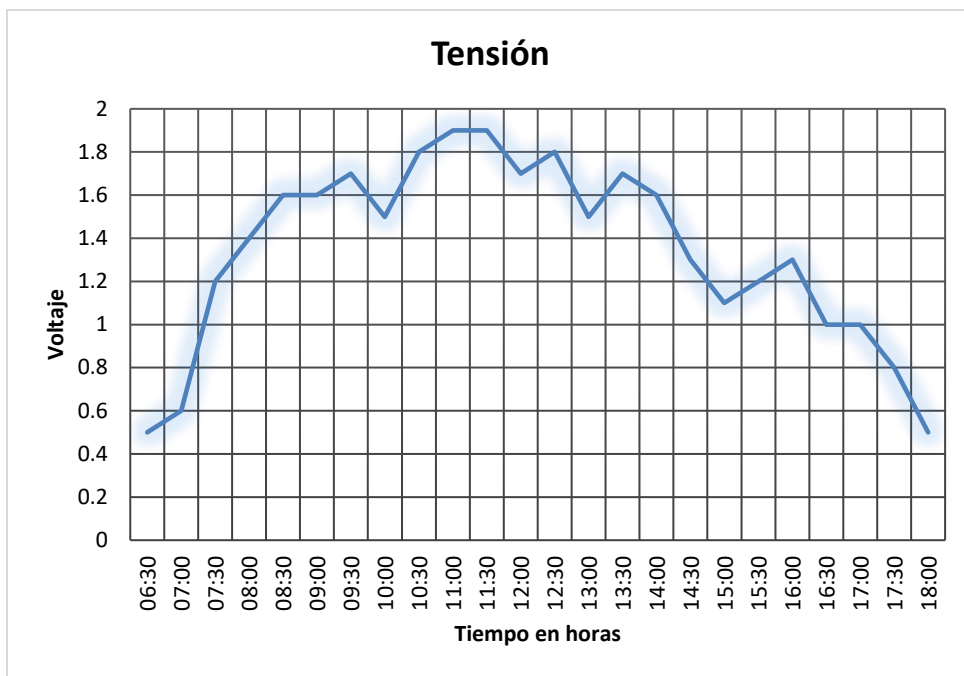


Figura. 29. Gráfica de tensión primera prueba en paralelo 5x2.

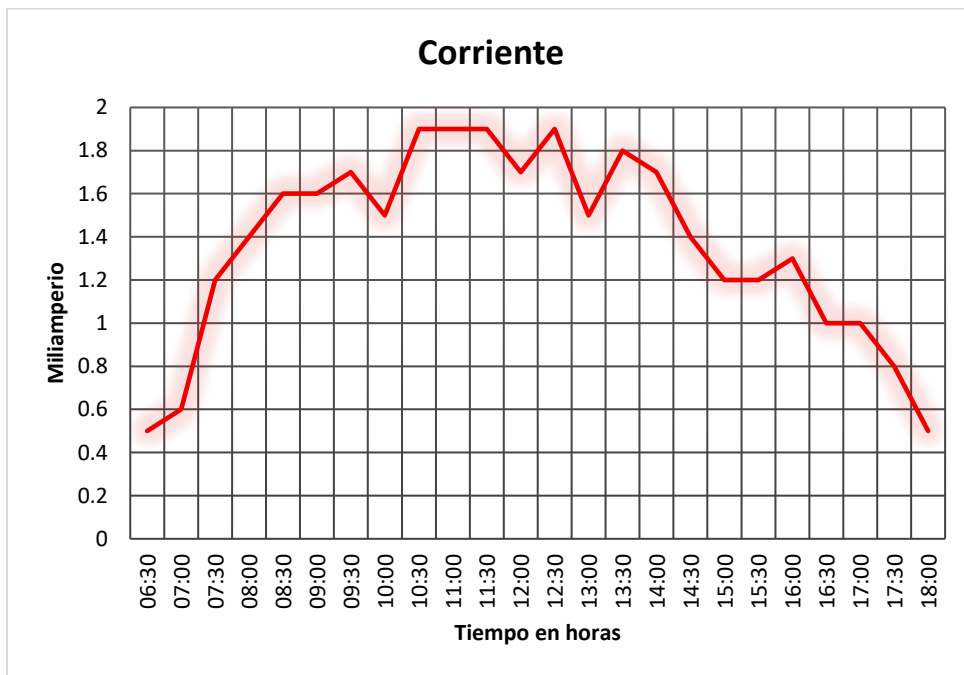


Figura. 30. Gráfica de corriente primera prueba en paralelo 5x2.

Tabla. 7. Prueba 2 en paralelo.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.3	0.3
7:00	0.8	0.8
7:30	1	1
8:00	1	1
8:30	1	1
9:00	1.3	1.3
9:30	1.3	1.3
10:00	1.5	1.5
10:30	1.5	1.5
11:00	1.6	1.5
11:30	1.6	1.6
12:00	1.8	1.8
12:30	1.7	1.7
13:00	1.7	1.6
13:30	1.5	1.5
14:00	1.4	1.4
14:30	1.4	1.3
15:00	1.2	1.1
15:30	1.1	1.1
16:00	1	1
16:30	1	1
17:00	1	1
17:30	0.8	0.8
18:00	0.5	0.5

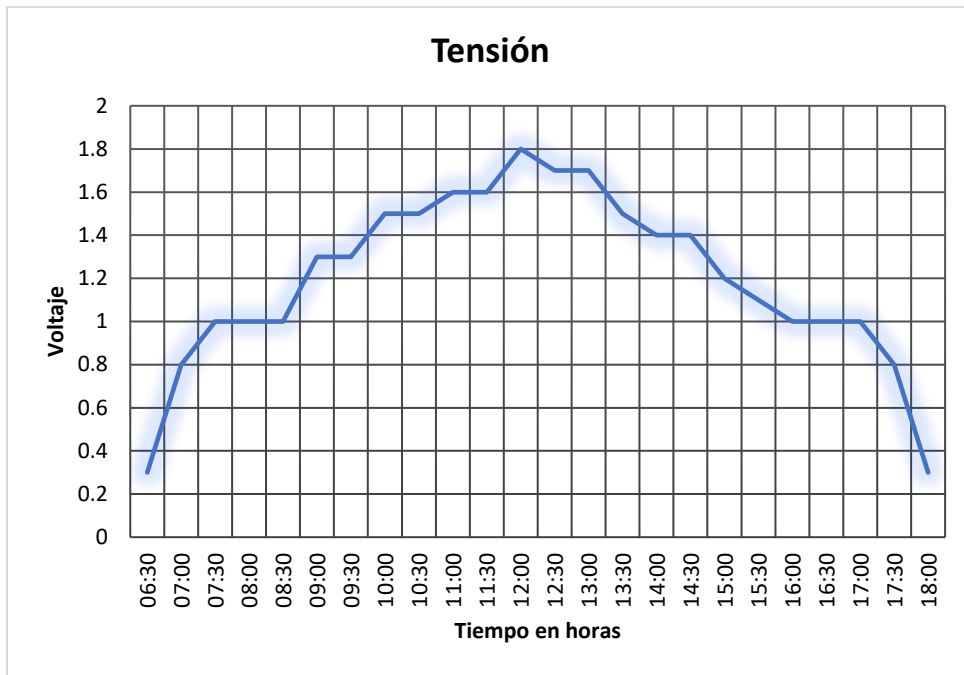


Figura. 31. Gráfica de tensión segunda prueba en paralelo 5x2.

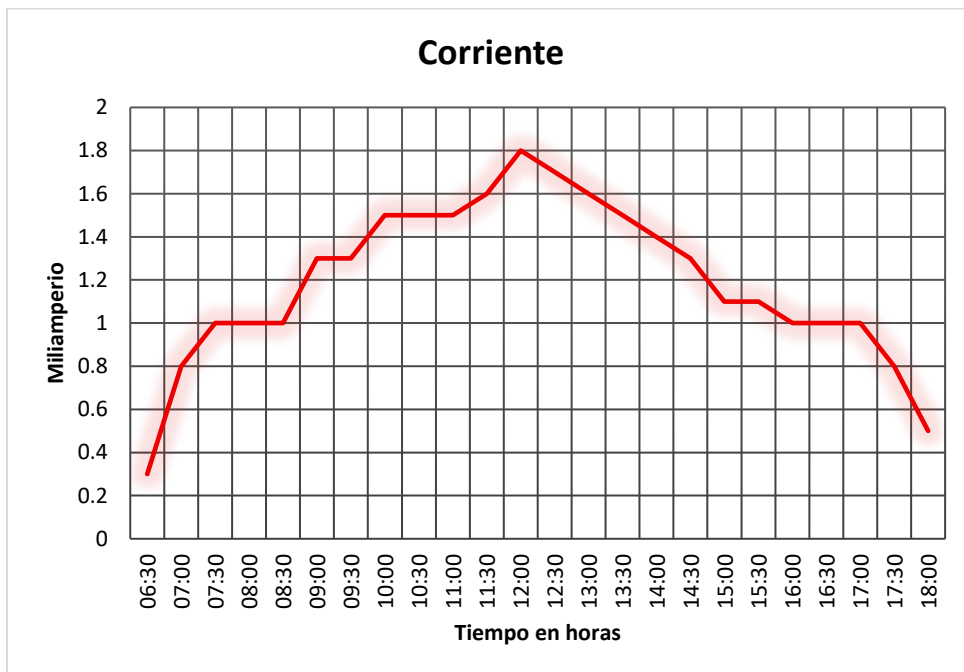


Figura. 32. Gráfica de corriente segunda prueba en paralelo 5x2.

Tabla. 8. Prueba 3 en paralelo.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.4	0.4
7:00	0.7	0.7
7:30	1	1
8:00	1.2	1.2
8:30	1.7	1.7
9:00	1.7	1.7
9:30	1.5	1.5
10:00	1.9	1.9
10:30	1.9	1.9
11:00	1.9	1.8
11:30	1.8	1.8
12:00	1.9	1.9
12:30	1.9	1.9
13:00	1.7	1.6
13:30	1.7	1.7
14:00	1.4	1.4
14:30	1.3	1.2
15:00	1.2	1.2
15:30	1.2	1.2
16:00	1.1	1.1
16:30	1	1
17:00	1	1
17:30	0.8	0.8
18:00	0.4	0.4

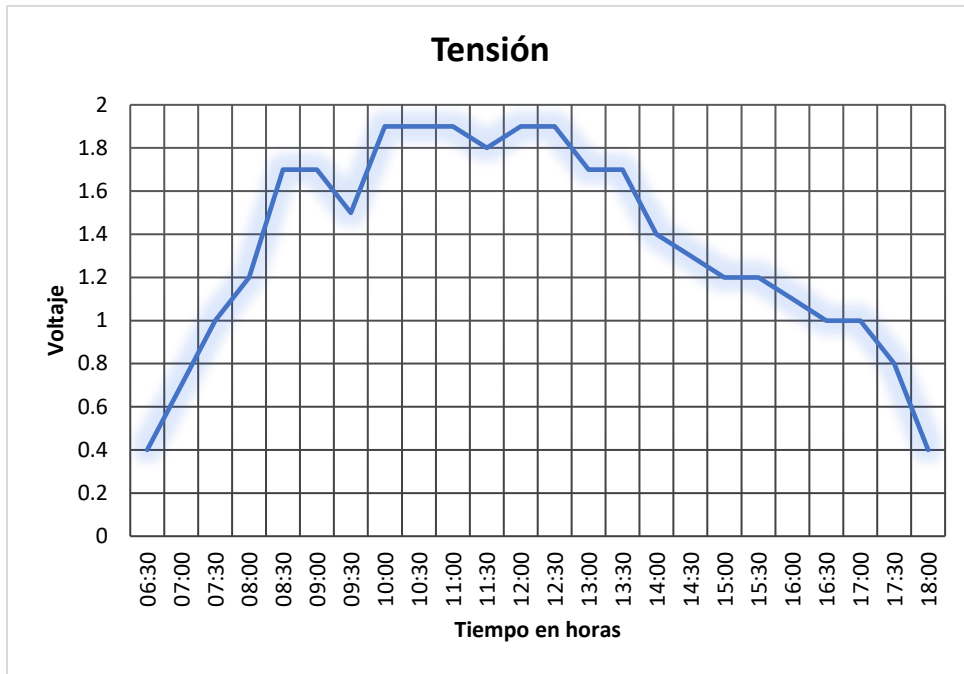


Figura. 33. Gráfica de tensión tercera prueba en paralelo 5x2.

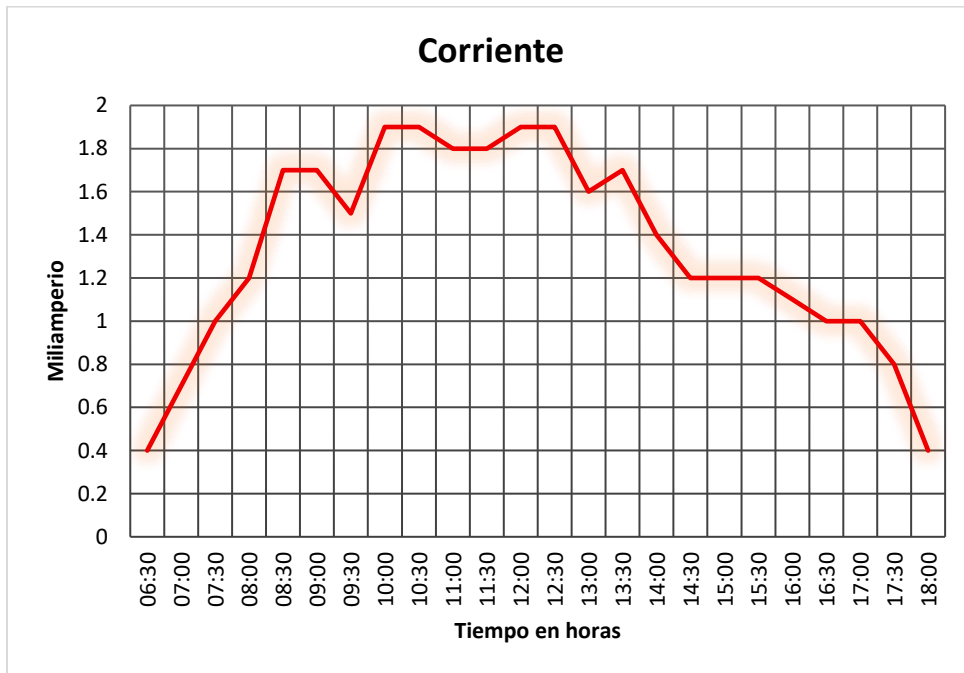


Figura. 34. Gráfica de corriente tercera prueba en paralelo 5x2.

Bajo condiciones ideales, se esperaría que la conexión en paralelo entregara una mayor corriente; sin embargo, los resultados obtenidos indicaron lo contrario.

La placa de cobre del prototipo contribuyó a mejorar la transferencia térmica hacia las celdas, pero no logró distribuir la temperatura de manera completamente uniforme y ciertas zonas se calentaron más que otras.

Esta diferencia térmica alteró el funcionamiento de cada celda, haciendo que en la configuración en paralelo algunas de ellas se opusieran parcialmente al flujo eléctrico en lugar de sumarse a él, lo que redujo la corriente total y generó pérdidas en forma de calor.

En consecuencia, el rendimiento de la configuración en paralelo fue inferior, mientras que la configuración en serie se mostró más estable y eficiente bajo las mismas condiciones experimentales.

4.5. Prueba sin movimiento

Con el fin de comparar el efecto del seguimiento solar, se realizó una prueba con las 10 celdas conectadas en serie, manteniendo el prototipo fijo durante el mismo horario de medición. A continuación, se muestra en la tabla 9 los valores obtenidos de tensión y corriente y en la Figura 35 la gráfica obtenida en dicha prueba la cual representa el comportamiento general del sistema bajo esta configuración.

Tabla. 9. Prueba en serie sin movimiento.

Hora	Tensión (mV)	Corriente (mA)
6:30	0	0
7:00	0.2	0
7:30	1.7	0.1
8:00	9.1	0.8
8:30	11.7	1.1
9:00	15.4	1.5
9:30	20.5	2
10:00	26.3	2.5
10:30	39.4	3.7
11:00	33	3
11:30	30	2.8
12:00	40.3	3.7
12:30	354	33.7
13:00	182	18.2
13:30	179.9	17.9
14:00	162.4	16
14:30	28	2.8
15:00	22	2.2
15:30	17	1.7

16:00	12	1.2
16:30	11	1
17:00	1.8	0.1
17:30	0.1	0
18:00	0.5	0

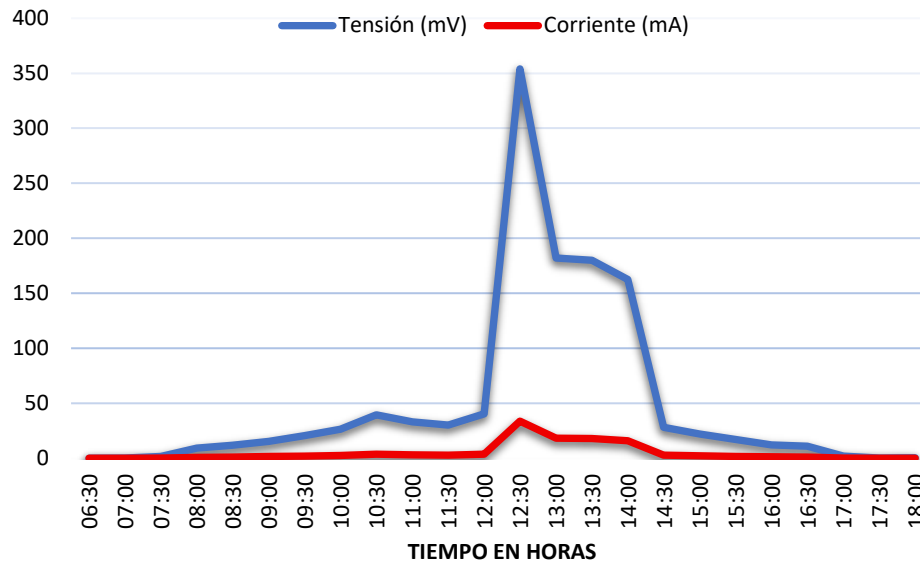


Figura. 35. Gráfica tensión y corriente de prueba en serie sin movimiento.

Los resultados mostraron una disminución notable tanto en la tensión como en la corriente generada, en comparación con las pruebas donde se implementó el movimiento para el seguimiento solar.

Esto evidencia que mantener la estructura fija limita la captación de radiación, mientras que el movimiento de seguimiento permite conservar un ángulo de incidencia más adecuado y obtener un mejor desempeño energético.

4.6. Discusión general de resultados de las pruebas

Los resultados de las pruebas permiten concluir lo siguiente:

- 1.- La configuración en serie ofrece un mejor aprovechamiento energético, reflejado en mayores valores de tensión y corriente promedio.
- 2.- La distribución no uniforme de la temperatura afectó más a la configuración en paralelo y limitó la corriente de algunas celdas generando pérdidas internas, lo que redujo el desempeño general.
- 3.- El seguimiento solar es un factor determinante para optimizar la captación de energía térmica y en consecuencia la generación termoeléctrica.

Capítulo 5

Comparación en simulación de la parte experimental

Capítulo 5: Comparación en simulación de la parte experimental.

Se presentan las simulaciones realizadas en MATLAB Simulink con el propósito de comparar los resultados de energía obtenidos experimentalmente con los generados en el entorno de simulación, validando el comportamiento del prototipo e identificando coincidencias y discrepancias entre la operación práctica y la teórica.

Como se puede observar en las Figuras 36 y 37, se seleccionó la configuración en serie como referencia, ya que permite obtener una mayor tensión y corriente de salida resultando ser más adecuada para su integración con el convertidor Boost, así como para el posterior almacenamiento de energía en un condensador y la alimentación de la carga.

Para ello se desarrollaron distintos escenarios de simulación: tres pruebas con el arreglo de diez celdas Peltier en serie centradas en el análisis de la tensión de salida; tres pruebas con el mismo arreglo en serie centradas en el análisis de la corriente de salida; la caracterización del convertidor Boost de manera independiente; el acoplamiento del arreglo de diez celdas Peltier en serie al convertidor; la incorporación de un condensador para evaluar el almacenamiento de energía; y, finalmente, la representación del sistema completo considerando el consumo final.

De esta manera, las simulaciones permiten identificar cómo cada etapa influye en el comportamiento del prototipo termoeléctrico y verificar si su desempeño es adecuado para las condiciones de operación planteadas.

5.1. Simulaciones de tensión y corriente en serie

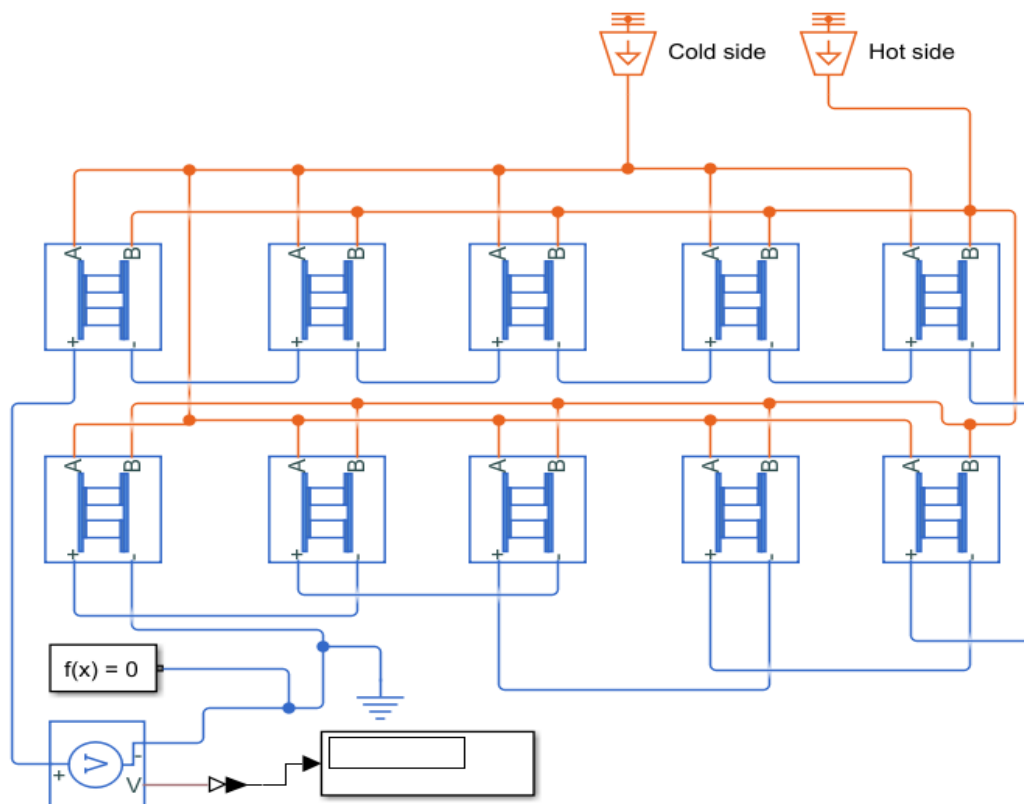


Figura. 36. Simulación de tensión en serie.

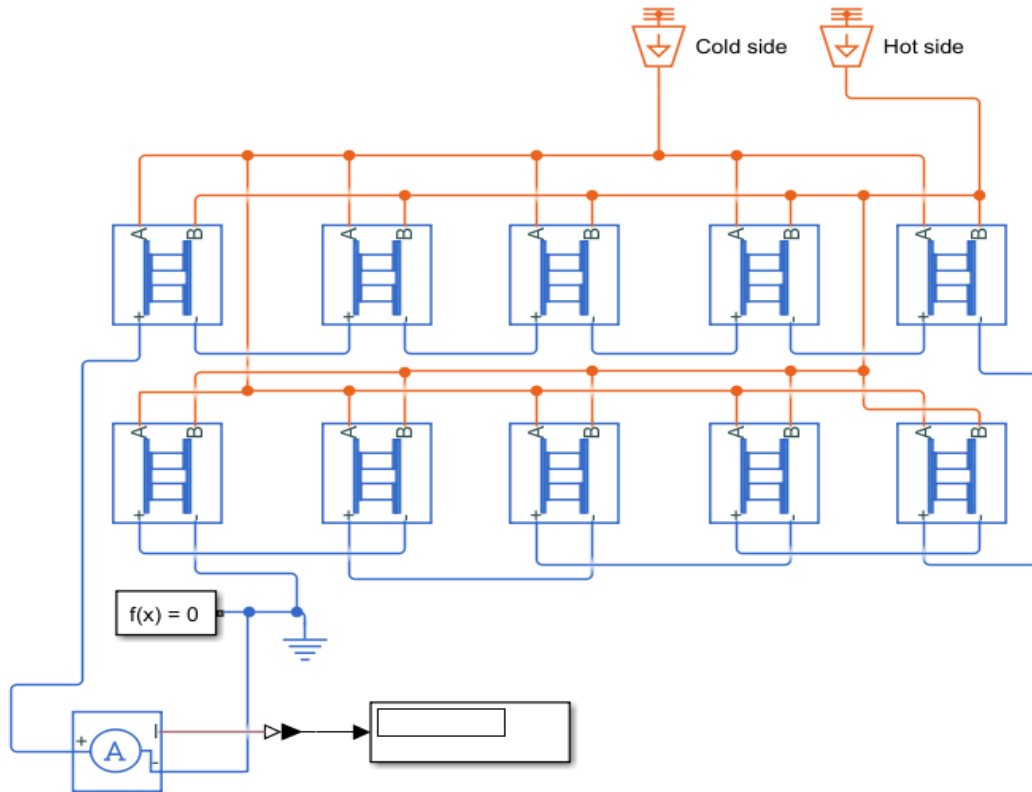


Figura. 37. Simulación de corriente en serie.

5.2. Cálculo de parámetros de celdas Peltier

Cabe señalar que para la simulación se emplearon parámetros representativos de cada celda Peltier modelo TEC1-12706, obtenidos a partir de la hoja de datos del fabricante que se puede observar en la Figura 38 y complementados con valores reportados en la literatura.

Entre dichos parámetros se consideraron la resistencia interna, la conductancia térmica y el coeficiente Seebeck, lo que permitió modelar el comportamiento de las celdas de manera más precisa dentro del entorno de simulación.



Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric
Cooler

TEC1-12706

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



Figura. 38. Hoja de datos de celda Peltier modelo TEC1-12706 [56].

La resistencia interna de cada celda se calculó al dividir los valores máximos de tensión y corriente reportados en la hoja de datos.

Ecuación de resistencia interna:

$$\frac{16.4V}{6.4A} = 2.56\Omega$$

Este valor, junto con el rango especificado por el fabricante (1.98 a 2.3 Ω), permitió adoptar un valor promedio de 2.2 Ω por celda para la simulación como se observa en la Figura 39.

Al estar en serie, la resistencia equivalente del arreglo aumenta proporcionalmente, de modo que con 10 celdas se obtiene un valor acumulado cercano a 22 Ω . Esto implica que la corriente máxima disponible prácticamente no se incrementa ya que, aunque la tensión total aumenta al sumar las celdas, la resistencia también lo hace, limitando la corriente a valores similares a los de una sola celda.

La conductancia térmica (W/K) de cada celda se calculó al dividir la capacidad máxima de refrigeración (Q_{max}) y la diferencia de temperatura máxima (ΔT_{max}).

Ecuación de conductancia térmica:

$$\frac{57W}{75^{\circ}K} = 0.76W/K$$

Donde el valor obtenido fue utilizado por cada celda en la simulación como se observa en la Figura 40.

Al conectar varias celdas en serie, térmica y eléctricamente, sus conductancias también se suman, por lo que en el caso de 10 celdas se alcanza un valor equivalente de 7.6 W/K lo que se traduce en cuánta energía térmica se pierde sin transformarse en energía eléctrica, reflejando la mayor facilidad de transferencia de calor a través del conjunto.

En cuanto al coeficiente de Seebeck, no aparece explícito en la hoja de datos. Por ello, se adoptó el valor de 0.031 V/K como se observa en la Figura 39, reportado en la literatura para módulos termoelectricos fabricados de Bi_2Te_3 [57,58].

Para el arreglo de 10 celdas en serie, el coeficiente Seebeck total se incrementa proporcionalmente hasta 0.31 V/K lo que se traduce en cuantos volts genera la celda en circuito abierto por cada grado de diferencia de temperatura entre las caras.

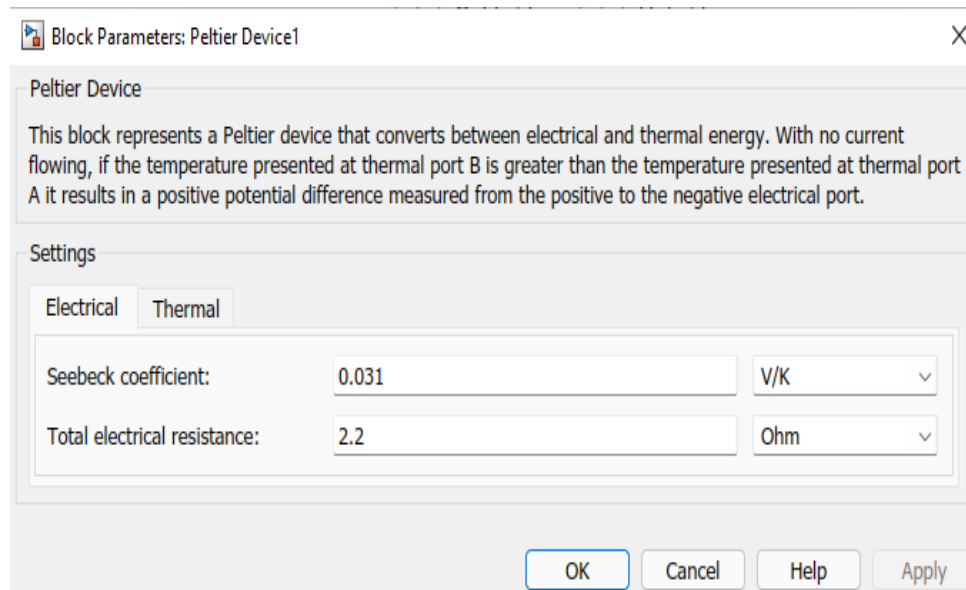


Figura. 39. Coeficiente Seebeck y resistencia eléctrica por cada celda Peltier en simulación.

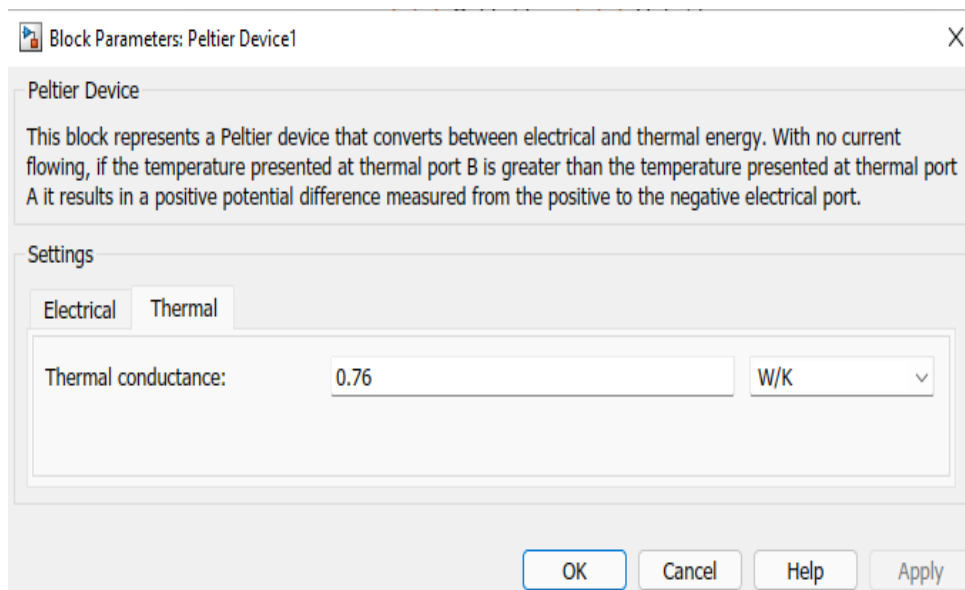


Figura. 40. Conductancia térmica por cada celda Peltier en simulación.

5.3. Comparación en simulación de las pruebas experimentales

Para cada una de las tres pruebas realizadas con el arreglo en serie, se desarrolló el mismo proceso de análisis. En primer lugar, se identificaron los valores máximos y mínimos de tensión y corriente y se organizaron en una tabla por prueba.

Con el valor máximo, se determinaron los gradientes de temperatura presentes en las caras caliente y fría en el instante en que dicho valor fue registrado.

Estos gradientes se utilizaron para realizar la simulación correspondiente, verificando que los valores simulados de tensión y corriente coincidieran con los experimentales.

Posteriormente, se aplicó el mismo procedimiento al valor mínimo, identificando sus gradientes térmicos y ejecutando la simulación para confirmar nuevamente la concordancia entre los datos medidos y los simulados.

Tabla. 10. Prueba 1 en serie de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1.2	1.2
12:30	2.8	2.8



Figura. 41. Tensión y corriente máximas obtenida en primera prueba en serie.

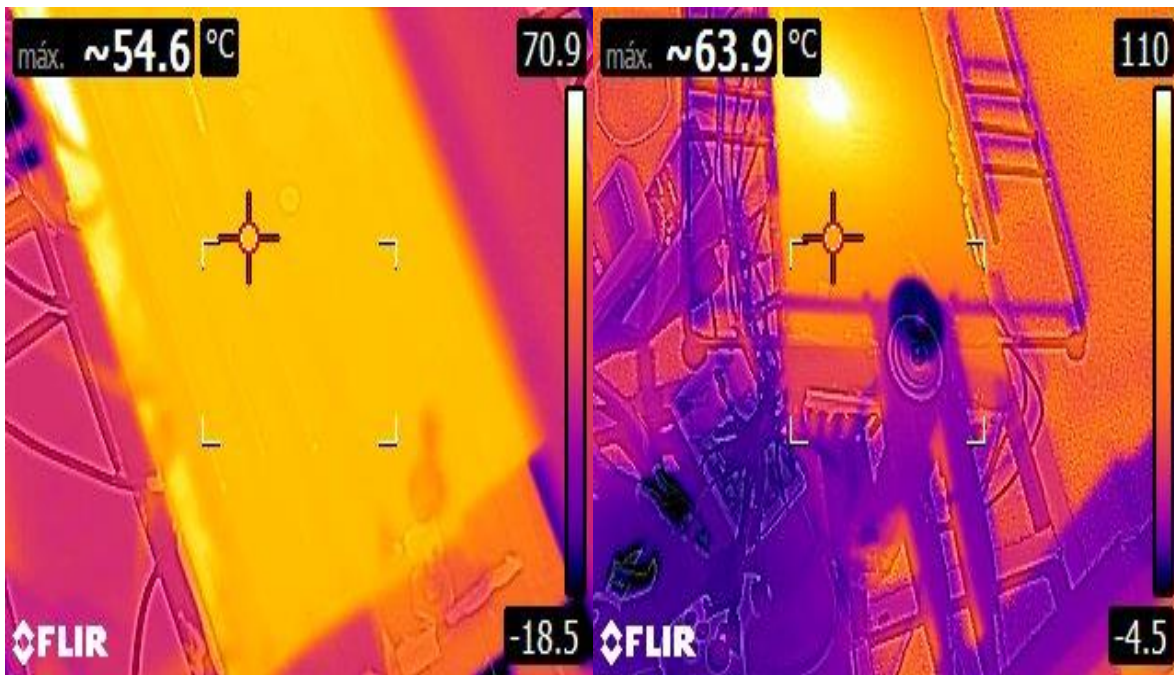


Figura. 42. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en primera prueba en serie.

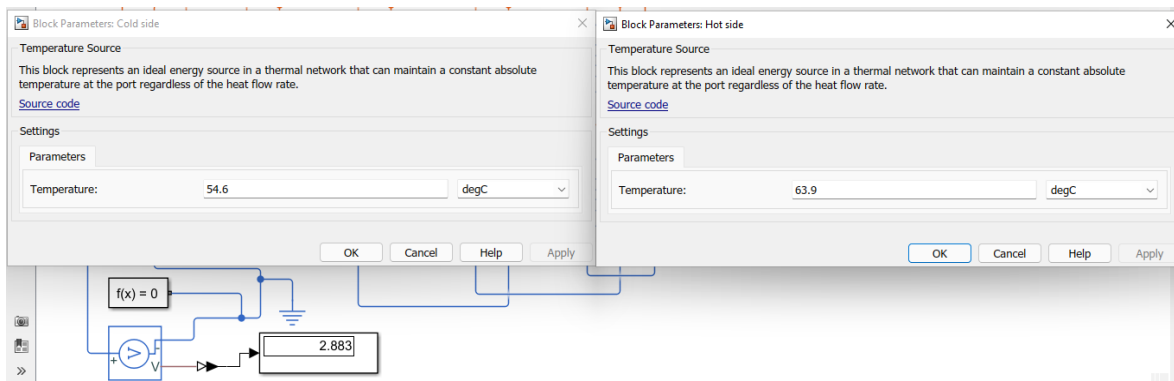


Figura. 43. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en primera prueba en serie.

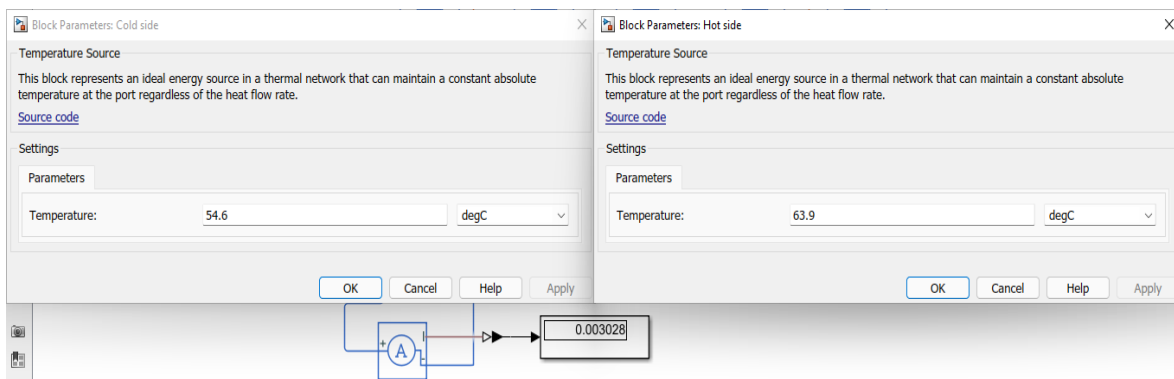


Figura. 44. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en primera prueba en serie.



Figura. 45. Tensión y corriente mínimas obtenida en primera prueba en serie.

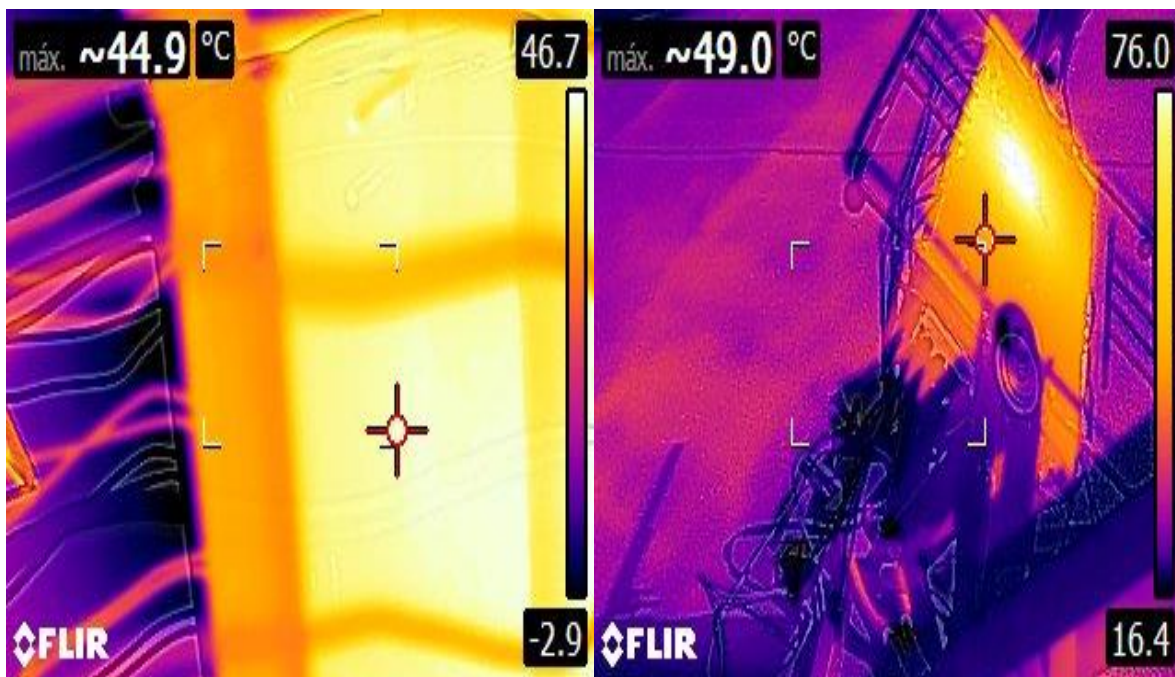


Figura. 46. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en primera prueba en serie.

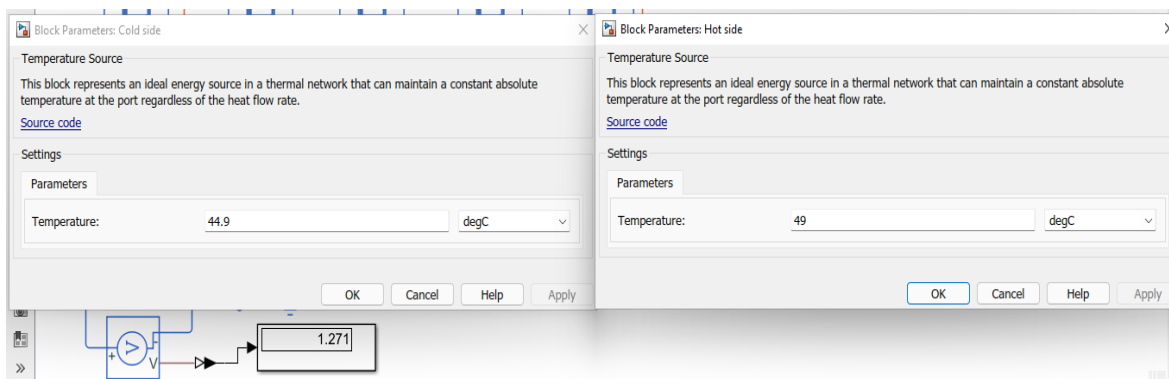


Figura. 47. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en primera prueba en serie.

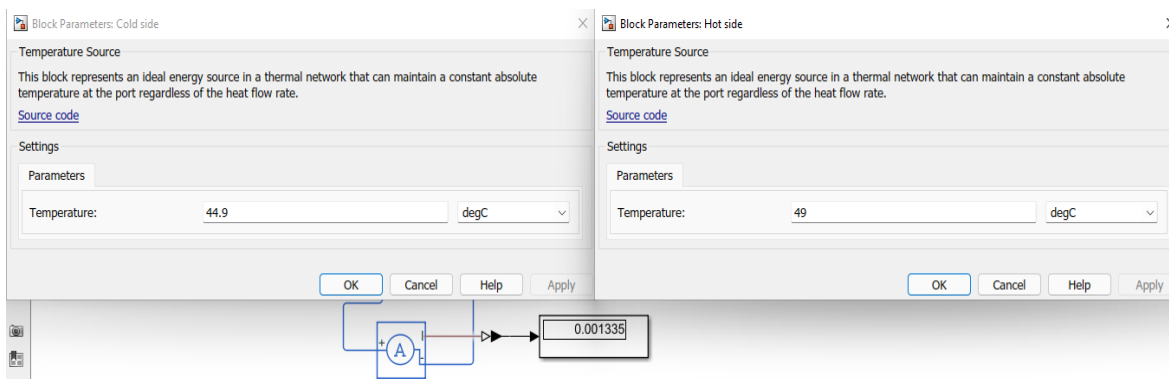


Figura. 48. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en primera prueba en serie.

Tabla. 11. Prueba 2 en serie de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1.1	1.1
12:00	3.5	3.5



Figura. 49. Tensión y corriente máximas obtenida en segunda prueba en serie.



Figura. 50. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en segunda prueba en serie.

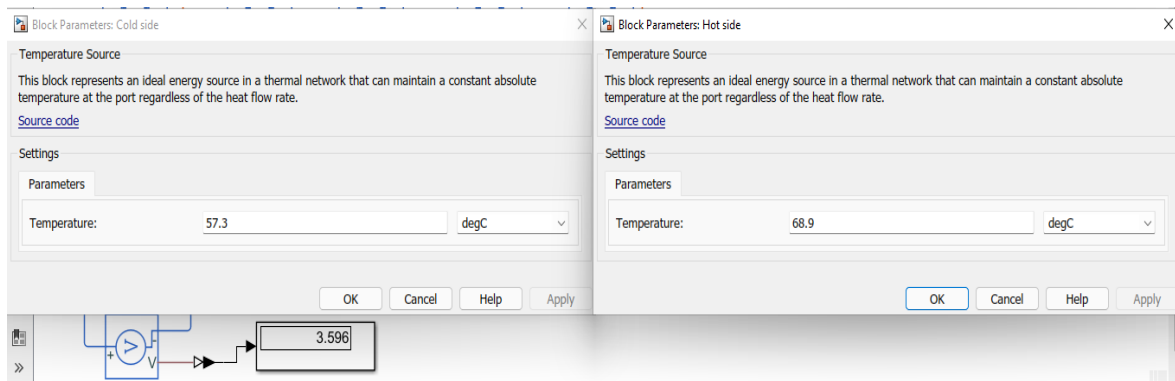


Figura. 51. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en segunda prueba en serie.

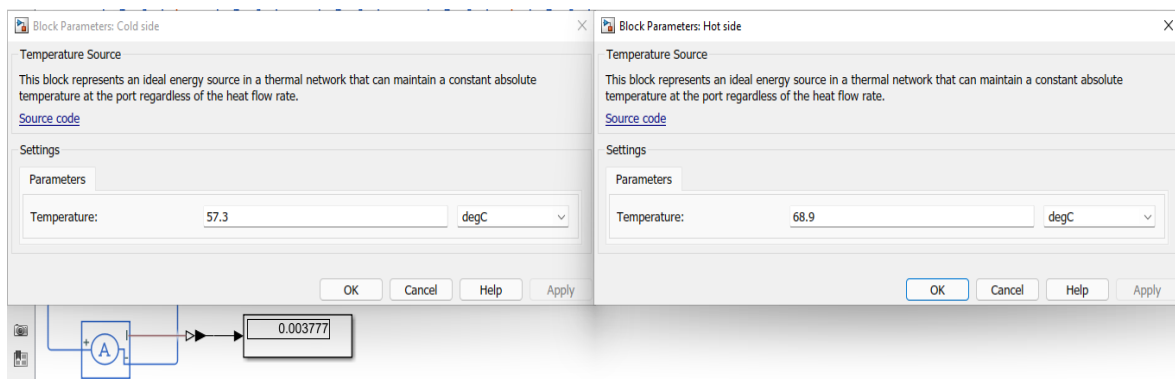


Figura. 52. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en segunda prueba en serie.



Figura. 53. Tensión y corriente mínimas obtenida en segunda prueba en serie.

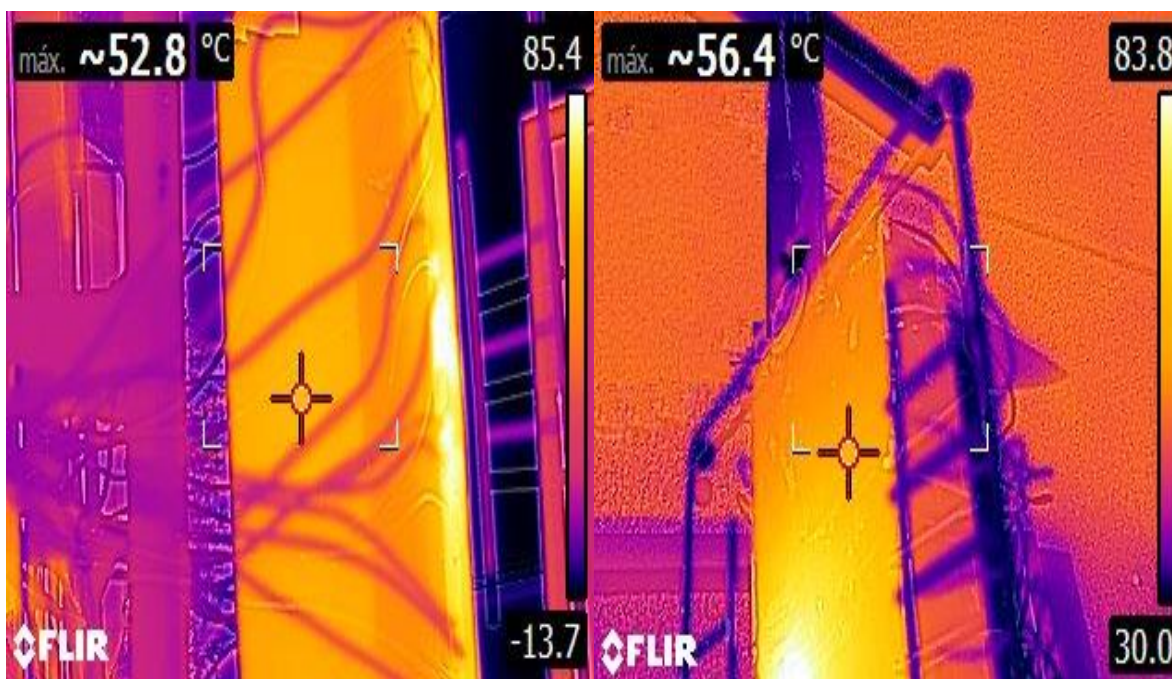


Figura. 54. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en segunda prueba en serie.

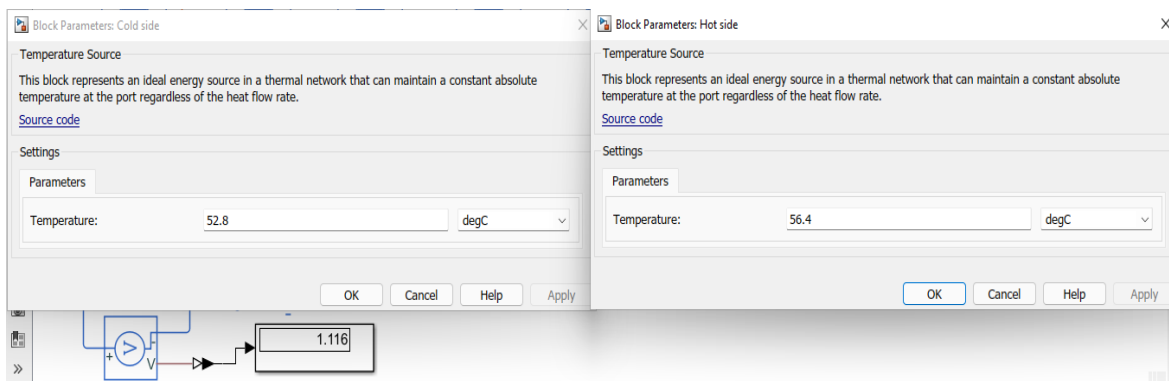


Figura. 55. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en segunda prueba en serie.

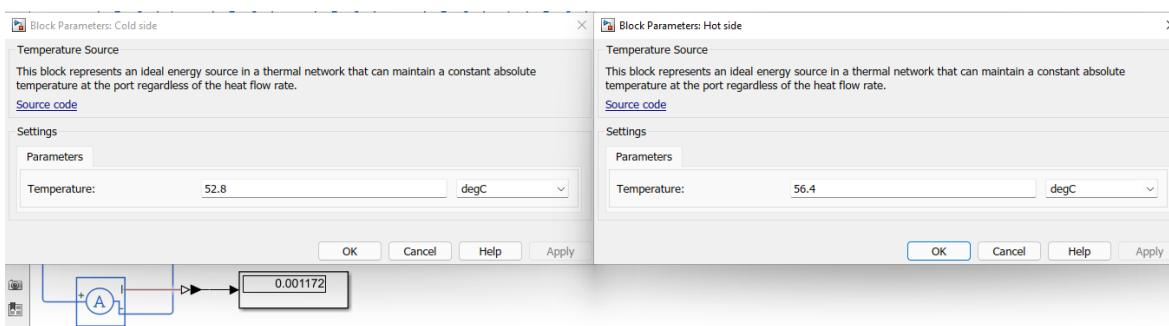


Figura. 56. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en segunda prueba en serie.

Tabla. 12. Prueba 3 en serie de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	1	1
12:00	3.1	3.1



Figura. 57. Tensión y corriente máximas obtenida en tercera prueba en serie.



Figura. 58. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores en tercera prueba en serie.

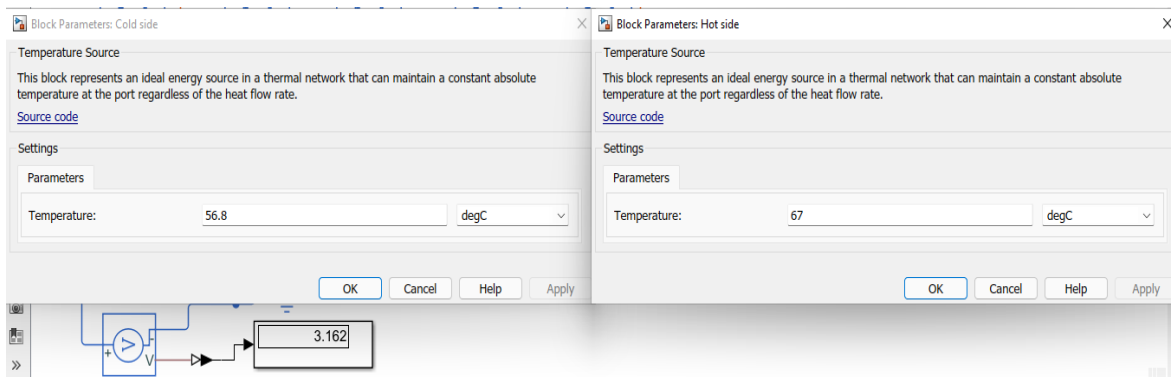


Figura. 59. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en tercera prueba en serie.

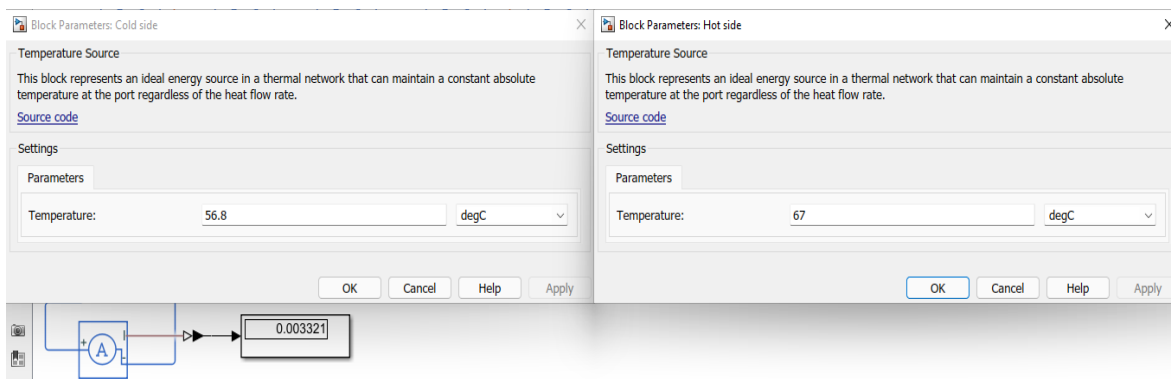


Figura. 60. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en tercera prueba en serie.



Figura. 61. Tensión y corriente mínimas obtenida en tercera prueba en serie.



Figura. 62. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores en tercera prueba en serie.

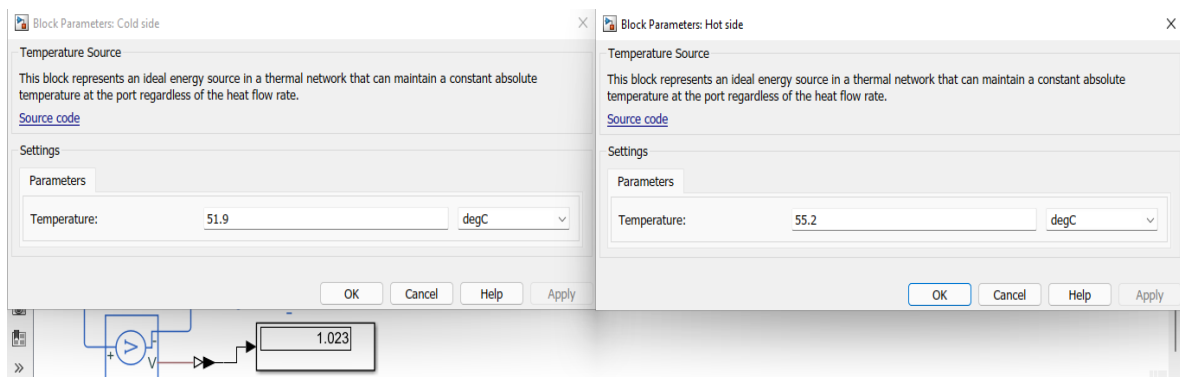


Figura. 63. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en tercera prueba en serie.

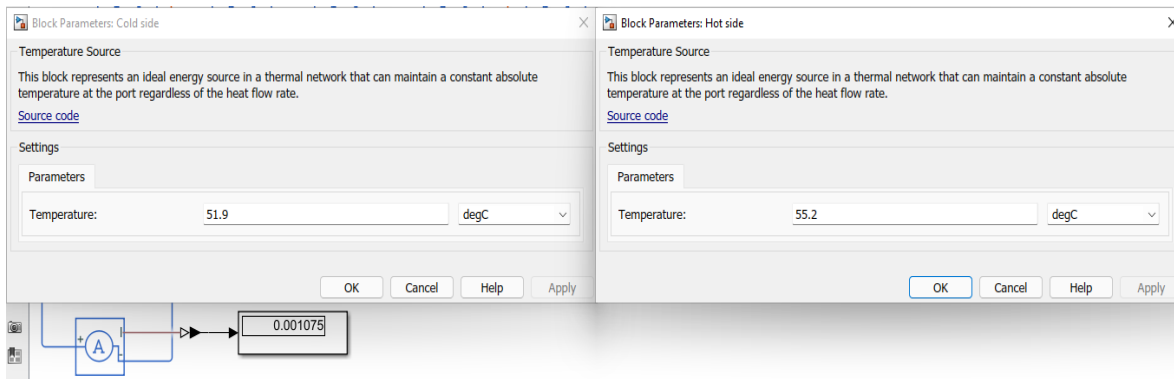


Figura. 64. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en tercera prueba en serie.

Como se puede observar, las simulaciones mostraron una buena concordancia con los valores medidos, lo que confirma que los parámetros adoptados (R , K y α) representan adecuadamente el comportamiento termoeléctrico de la celda Peltier modelo TEC1-12706 bajo las condiciones evaluadas.

Así, la simulación y la validación experimental coinciden en que, aunque la configuración en serie permite incrementar la tensión de salida, la corriente permanece limitada por la resistencia interna total, describiendo de manera precisa el desempeño real del prototipo.

5.4. Simulaciones del convertidor Boost adecuado a las celdas

El diseño del convertidor se realizó considerando las condiciones de operación del arreglo en serie de celdas Peltier, estableciendo una tensión de entrada de 3.5 V y una tensión de salida deseada de 5 V, con una frecuencia de conmutación de 50 kHz.

Además, se eligió un rizo de corriente del 21% y un rizo de voltaje del 5%, valores que se mantienen dentro de los rangos aceptables para garantizar un funcionamiento adecuado del convertidor como se observa en las Figuras 65 y 66.

Bajo estos parámetros, se realizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación de ciclo de trabajo:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 0.3$$

Ecuación de inductor:

$$L = \frac{V_{in}(D)}{I_r(f)} = 40 \text{ mH}$$

Ecuación de condensador:

$$C = \frac{V_{out}(D)}{R(Vr)(f)} = 0.0588 \mu\text{F}$$

Ecuación de resistencia:

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} = 2040.8 \Omega$$

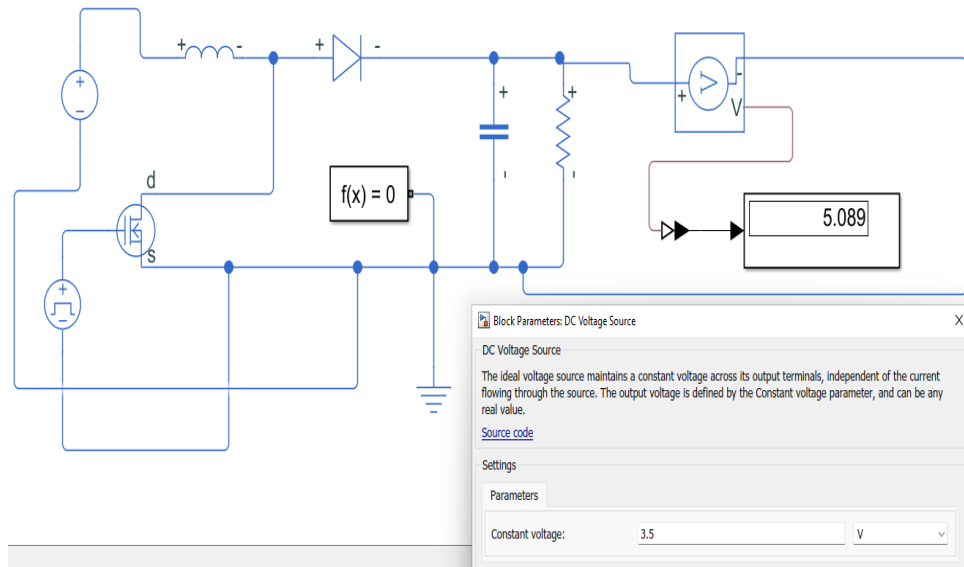


Figura. 65. Simulación del convertidor Boost de manera independiente.

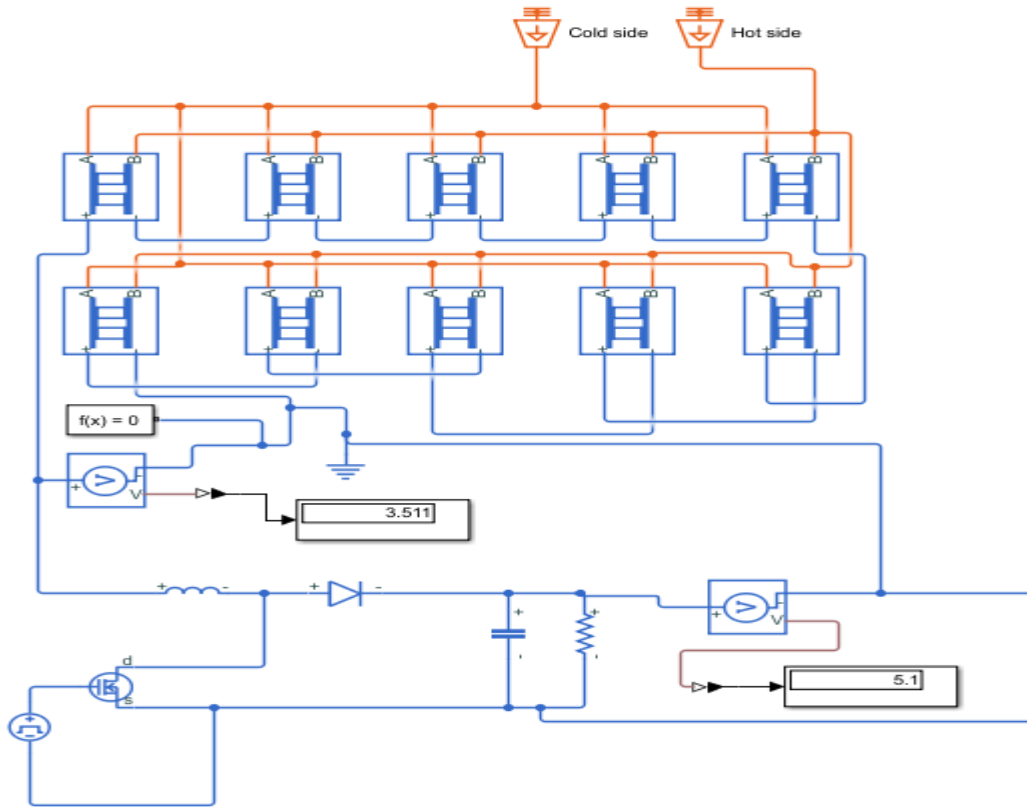


Figura. 66. Simulación de las 10 celdas en serie acopladas al convertidor Boost.

5.5. Simulación del capacitor de almacenamiento

A partir de la potencia disponible de la salida del convertidor Boost, se incorporó un condensador de almacenamiento (C_b), cuyo valor se seleccionó considerando lo siguiente:

Ecuación de condensador de almacenamiento:

$$C_b = \frac{I(\Delta t)}{\Delta V} = 10000 \mu F$$

La corriente requerida por la lámpara elegida es de 0.2 A y una caída de tensión máxima permitida (ΔV) de 0.5V, así como un tiempo de simulación (Δt) de 0.025 segundos.

Su función principal es actuar como un elemento de almacenamiento temporal de energía, suavizando las variaciones instantáneas y entregando una tensión más uniforme a la resistencia de salida como se puede observar en la Figura 67.

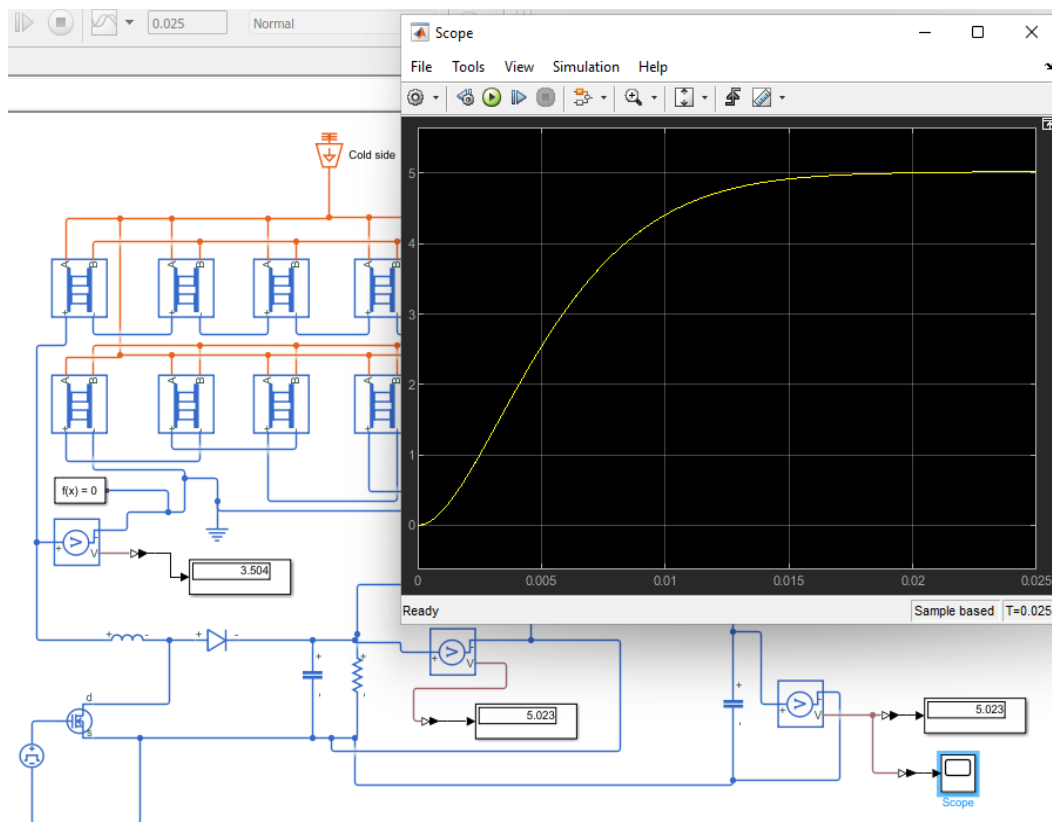


Figura. 67. Simulación con condensador.

Los resultados de la simulación muestran que el convertidor Boost eleva correctamente la tensión generada por el arreglo de celdas Peltier, alcanzando los 5 V requeridos.

Esta tensión se transfiere al condensador, permitiendo el almacenamiento de energía y garantizando un suministro más estable hacia la carga confirmando el aprovechamiento de la energía termoeléctrica para aplicaciones de baja potencia.

5.6. Simulación de resistencia representando la carga y consumo final

Para evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones reales de operación, se integró en la simulación una resistencia equivalente a la lámpara que se pretende alimentar.

Dicho dispositivo corresponde a una lámpara LED de escritorio con un nivel de iluminación adecuado para lectura confortable, lo cual resulta fundamental para evitar fatiga visual; esto implica contar con un flujo luminoso suficiente (lúmenes) que genere un contraste claro sobre el texto, una temperatura de color intermedia que favorezca la concentración y un diseño apropiado de dispersión y dirección de la luz, que reduzca el deslumbramiento y evite sombras marcadas sobre la superficie de lectura [59-61].

Al integrar la resistencia en el circuito, se analizó el flujo de energía proveniente del convertidor Boost y del condensador de almacenamiento, verificando que la tensión suministrada se mantuviera dentro del rango operativo esperado.

Los resultados evidencian una adecuada transferencia de energía desde el arreglo termoeléctrico hasta el consumo final como se puede observar en la Figura 68.

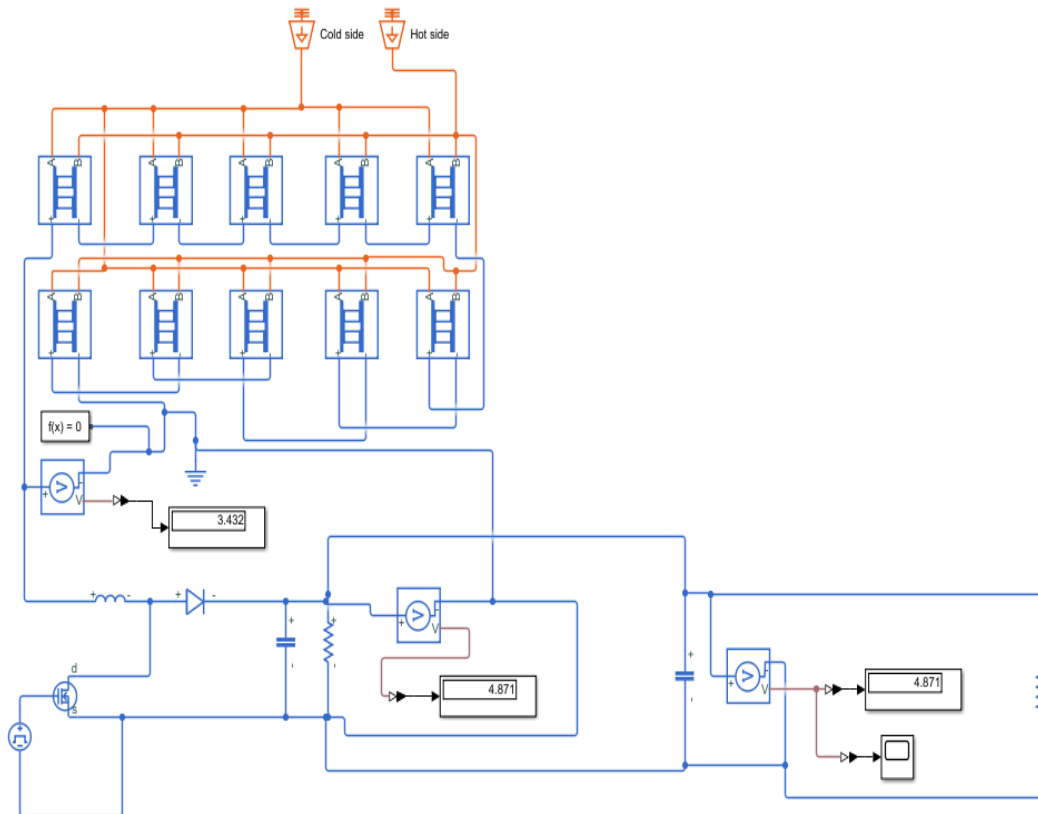


Figura. 68. Simulación del sistema completo representando el consumo final.

Capítulo 6

Conclusión

Capítulo 6: Conclusión.

6.1. Conclusiones generales

El presente trabajo confirmó la viabilidad de generar energía eléctrica a partir del efecto Seebeck mediante el uso de celdas Peltier sometidas a gradientes térmicos inducidos por fuentes pasivas. Para establecer dicho gradiente, se empleó un lente Fresnel como concentrador solar en la cara caliente y un disipador de aluminio como elemento de enfriamiento pasivo en la cara fría. Esta configuración permitió observar experimentalmente el comportamiento termoeléctrico del sistema sin la intervención de elementos electrónicos adicionales, preservando así su naturaleza sustentable y de baja complejidad energética.

Durante las pruebas experimentales se identificaron condiciones térmicas no ideales que influyeron directamente en el desempeño termoeléctrico del prototipo. En particular, la distribución de temperatura en las caras calientes presentó una marcada no uniformidad, asociada tanto a la geometría del punto focal generado por el lente Fresnel como a la propagación diferida de calor en la lámina metálica de protección. Como resultado, las celdas no fueron sometidas a un flujo térmico homogéneo, lo que derivó en diferencias significativas en la tensión y corriente individual generada por cada una.

De manera complementaria, la disipación pasiva en la cara fría también mostró variaciones locales. Estas irregularidades limitaron la efectividad del disipador y redujeron el gradiente térmico disponible en varias de las celdas.

La combinación de estos dos factores (no uniformidad térmica en la cara caliente y disipación no homogénea en la cara fría) condicionó de forma directa la magnitud de la potencia termoeléctrica generada.

Los resultados obtenidos en las instalaciones del TECNM CENIDET indican que, bajo estas condiciones térmicas no uniformes y con enfriamiento exclusivamente pasivo, la configuración en serie presenta un desempeño superior frente a la conexión en paralelo. El arreglo en serie alcanzó valores máximos de 3.5 V y 3.5 mA, mientras que el arreglo en paralelo únicamente obtuvo 1.9 V y 1.9 mA.

La superioridad del arreglo en serie fue gracias a que cada celda aporta su tensión individual, de modo que las diferencias locales en el gradiente térmico no se propagan al resto del sistema. En contraste, la conexión en paralelo queda condicionada por la celda con menor capacidad de generación, lo que limita el rendimiento global del conjunto cuando la distribución térmica no es homogénea.

En conjunto, los resultados experimentales demuestran que, para sistemas de conversión termoeléctrica basados en fuentes pasivas de calor y disipación limitada, la configuración en serie constituye la alternativa más robusta y eficiente.

Su menor sensibilidad a la no uniformidad térmica la convierte en una opción particularmente adecuada para prototipos de concentración solar de baja intensidad y para escenarios donde no es posible garantizar un control térmico preciso sobre cada celda del arreglo.

Asimismo, el modelo simulado en MATLAB/Simulink mostró una buena correspondencia con los resultados experimentales, reproduciendo de forma casi exacta el comportamiento de tensión y corriente en la configuración en serie, lo que valida el modelo propuesto y permite su uso como herramienta de predicción y optimización de arreglos termoelectricos en trabajos futuros.

En términos generales, el sistema propuesto presenta ventajas como bajo costo, fácil implementación y generación de energía limpia sin necesidad de fuentes eléctricas externas, por lo que se considera viable para aplicaciones experimentales, educativas o como base para prototipos de captación energética renovable de baja potencia.

6.2. Aportaciones del trabajo

El desarrollo de esta investigación aporta evidencia experimental y de simulación respecto al comportamiento termoelectrico de sistemas basados en celdas Peltier operando bajo gradientes térmicos generados únicamente por fuentes pasivas.

Entre las principales contribuciones se destacan:

1.- Validación de la generación termoelectrica con medios pasivos, utilizando como fuente de calor concentrado un lente Fresnel y como fuente de enfriamiento un disipador de aluminio sin apoyo de mecanismos activos.

Esto demuestra que es posible obtener energía eléctrica sin consumo energético adicional y con un costo reducido de implementación.

2.- Caracterización comparativa de configuraciones serie y paralelo en condiciones reales de operación, determinando experimentalmente que, con este prototipo con distribución térmica no homogénea y disipación limitada, la configuración en serie presenta un mejor desempeño,

Esta conclusión aporta lineamientos de selección de configuración para diseños prácticos de baja potencia.

3.- Identificación del impacto de la uniformidad térmica en la generación termoelectrica, mostrando que las variaciones en la distribución de calor sobre la superficie de los módulos afectan de manera crítica el comportamiento del arreglo, en especial cuando se trabaja en paralelo.

Este hallazgo enfatiza la importancia del diseño térmico previo antes de optimizar únicamente la conexión eléctrica.

4.- Validación de un modelo de simulación con correspondencia experimental, el cual reproduce el comportamiento observado en tensión y corriente en configuración en serie bajo escenarios reales de irradiancia solar.

Este modelado permite utilizar simulación como herramienta predictiva para el dimensionamiento de arreglos termoelectricos antes de su construcción física, reduciendo tiempo y costos de prueba.

5.- Fundamento para aplicaciones futuras de bajo consumo energético, especialmente en sistemas autónomos, sensores autosustentables, iluminación de baja potencia y plataformas educativas para el estudio práctico de generación termoelectrica con recursos pasivos.

Con estas aportaciones, el trabajo no solo demuestra la factibilidad de generación termoelectrica con recursos solares pasivos, sino que establece criterios prácticos para mejorar el diseño, caracterización y aprovechamiento de este tipo de sistemas en el ámbito académico y tecnológico.

6.3. Limitaciones del sistema

La baja potencia obtenida en el sistema no se debió únicamente al empleo de fuentes pasivas de calentamiento y enfriamiento, sino a la combinación de diversos factores inherentes al propio principio termoelectrico y a las condiciones experimentales del prototipo. En primer lugar, las celdas Peltier presentan una capacidad limitada de conversión cuando operan como generadores, dado que su eficiencia intrínseca disminuye significativamente bajo diferencias de temperatura moderadas.

Adicionalmente, el uso de un disipador compacto restringió la capacidad de mantener la cara fría a temperaturas suficientemente bajas; no obstante, este aspecto no constituyó el único elemento crítico. La distribución térmica en la cara caliente tampoco fue uniforme, debido a la geometría del punto focal generado por el lente Fresnel y a la propagación no homogénea del calor a través de la lámina metálica protectora. A ello se suman las pérdidas de gradiente térmico provocadas por la conducción interna del material cerámico de las celdas y por la acumulación progresiva de radiación solar durante el ensayo, lo que redujo la diferencia de temperatura efectiva disponible para la generación eléctrica.

Otro factor determinante fue la dependencia directa del recurso solar. La variabilidad en la radiación (influenciada por las condiciones climáticas, la nubosidad y el horario de medición) afectó la estabilidad y repetibilidad del sistema, limitando su desempeño en ausencia de mecanismos auxiliares que permitan controlar o estabilizar el flujo térmico.

Finalmente, la no implementación física del convertidor Boost impidió evaluar experimentalmente el almacenamiento de energía y la alimentación real de una carga, quedando esta etapa validada únicamente mediante simulaciones.

En conjunto, estas limitaciones (tanto intrínsecas del dispositivo termoelectrico como derivadas del entorno experimental) muestran que la baja potencia generada no puede atribuirse a un único factor. Por el contrario, es consecuencia de la interacción entre la baja eficiencia termoelectrica del material, la distribución térmica no homogénea, la disipación pasiva limitada y la naturaleza variable del recurso solar.

6.4. Trabajos futuros

Se proponen las siguientes líneas de investigación para ampliar el alcance del presente trabajo:

- 1.- Diseño de sistemas termoelectricos híbridos que combinen concentradores solares con dispositivos de refrigeración activa para aumentar el gradiente térmico.
- 2.- Estudio del comportamiento termoelectrico con diferentes modelos de celdas Peltier y materiales de disipación.
- 3.- Implementación física de un convertidor DC-DC Boost eficiente para alimentar una carga real (como iluminación LED).
- 4.- Optimización de algoritmos de seguimiento solar con bajo consumo energético, considerando el peso total del sistema.
- 5.- Análisis de viabilidad para aplicaciones en zonas rurales, dispositivos autónomos o sensores autosustentables.

6.5. Recomendaciones para mejorar el desempeño

Con base en la experiencia experimental y el modelado desarrollado, se sugieren las siguientes mejoras para optimizar la potencia generada:

- 1.- Utilizar disipadores con mayor área de contacto o incorporar disipación activa mediante ventiladores de bajo consumo.
- 2.- Implementar un sistema real de almacenamiento y acondicionamiento de energía, compuesto por un convertidor Boost y batería o condensador real.
- 3.- Integrar sensores de temperatura y un sistema de control de protección contra puntos calientes en el área de concentración solar.
- 4.- Reutilizar el calor residual mediante estructuras térmicas que incrementen la transferencia hacia las celdas sin incrementar el área concentrada.

6.6. Cierre del capítulo

En conjunto, este estudio demuestra que es viable aprovechar la energía termoeléctrica mediante recursos pasivos de calentamiento y enfriamiento.

Los resultados confirman que una adecuada selección de la configuración del arreglo, junto con un modelado y diseño térmico apropiados, permite obtener niveles útiles de generación eléctrica para aplicaciones de baja potencia.

Este trabajo establece así un punto de partida sólido para futuras optimizaciones y para el desarrollo de sistemas termoeléctricos más eficientes y robustos en aplicaciones reales.

Bibliografía

Bibliografía.

- [1] J. A. V. Ramírez, W. F. A. Cardona, and J. B. Buchelli, "Generation of Self-Sustainable Electrical Energy for the Unidad Central Del Valle Del Cauca, by the Use of Peltier Cells," *International Journal of Renewable Energy Sources*, vol. 3, 2018.
- [2] M. Faheem, M. Abu Bakr, M. Ali, M. A. Majeed, Z. M. Haider, and M. O. Khan, "Evaluation of Efficiency Enhancement in Photovoltaic Panels via Integrated Thermoelectric Cooling and Power Generation," *Energies*, vol. 17, no. 11, p. 2590, 2024.
- [3] R. Aridi, J. Faraj, S. Ali, T. Lemenand, and M. Khaled, "Thermoelectric power generators: state-of-the-art, heat recovery method, and challenges," *Electricity*, vol. 2, no. 3, pp. 359-386, 2021.
- [4] A. Skala and Z. Waradzyn, "Investigation and determination of efficiency of the waste heat recovery system using peltier modules," in *2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS)*, 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [5] M. R. Gomaa and H. Rezk, "Passive cooling system for enhancement the energy conversion efficiency of thermo-electric generator," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 687-692, 2020.
- [6] C. S. Makola, P. F. Le Roux, and J. A. Jordaan, "Comparative analysis of lithium-ion and lead-acid as electrical energy storage systems in a grid-tied microgrid application," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, p. 3137, 2023.
- [7] R. Iyer and A. Ghosh, "Investigation of Integrated and Non-Integrated Thermoelectric Systems for Buildings—A Review," *Energies*, vol. 16, no. 19, p. 6979, 2023.
- [8] S. L. Y. Win, Y.-C. Chiang, T.-L. Huang, and C.-M. Lai, "Thermoelectric Generator Applications in Buildings: A Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, p. 7585, 2024.
- [9] A. Townsend and R. Gouws, "A comparative review of lead-acid, lithium-ion and ultra-capacitor technologies and their degradation mechanisms," *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4930, 2022.
- [10] K. R. Cheepati and N. Balal, "Solar Powered Thermoelectric Air Conditioning for Temperature Control in Poultry Incubators," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, p. 4832, 2024.
- [11] R. Ganapathi, T. Harinarayana, and Y. M. Shuaib, "A Review on Domestic Power Generation using Hybrid Model," *I-Manager's Journal on Power Systems Engineering*, vol. 9, no. 1, 2021.
- [12] M. Pyne and S. Yurkovich, "Data driven modeling and simulation for energy storage systems," in *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2016: IEEE, pp. 1306-1311.
- [13] B. Singh, "The effects of temperature difference and compressive force to the electrical characterization of peltier cell for artificial concentrated solar power thermoelectric application," *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, vol. 11, no. 1, pp. 15-30, 2014.
- [14] M. Ridwan, M. Gasulla, and F. Reverter, "Principle and Applications of Thermoelectric Generators: A Review," *Sensors*, vol. 25, no. 8, p. 2484, 2025.
- [15] M. Seyednezhad and H. Najafi, "Solar-powered thermoelectric-based cooling and heating system for building applications: A parametric study," *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5573, 2021.
- [16] C. R. Ramírez, G. M. Lizarazo, and E. V. Duarte, "Termoelectricidad: uso de las celdas peltier en el campo de la refrigeración y sus principales aplicaciones," *INVENTUM*, vol. 12, no. 22, pp. 9-16, 2017.
- [17] S. C. Sarria and F. R. Rebelo, "Termoelectricidad. Aplicación de las placas Peltier a la generación de energía eléctrica en plataformas flotantes."

- [18] S. Lis, J. Knaga, S. Kurpaska, S. Famielec, P. Łyszczarz, and M. Machaczka, "Optimizing Energy Efficiency in a Peltier-Module-Based Cooling Microunit through Selected Control Algorithms," *Energies*, vol. 17, no. 20, p. 5031, 2024.
- [19] C. A. Sánchez Márquez, "Analysis of thermoelectric materials using a virtual instrument in Matlab [Análisis de materiales termoeléctricos mediante instrumento virtual en Matlab]," 2021.
- [20] S. A. Cuyubamba Rojas and A. S. Paredes Caparachín, "Diseño óptimo de un sistema de iluminación LED aplicando el efecto Seebeck en celdas Peltier. Distrito de Yanahuanca, Región Pasco, 2018," 2018.
- [21] J. F. Dussan Castillo and A. F. Suavita Lozada, "Diseño y simulación de una máquina generadora de energía eléctrica por medio de celdas Peltier," 2018.
- [22] R. I. Casa Casa and C. D. Crespo Acosta, "Diseño e implementación de un prototipo generador de electricidad mediante el efecto termoeléctrico con el uso de celdas peltier," Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). 2019.
- [23] J. A. Argüello Carrera and B. E. Albán Dillon, "Generación de energía eléctrica a partir de celdas Peltier, aprovechando la energía térmica disipada por el escape de un motor de combustión interna, para uso secundario en un vehículo automotriz," QUITO/UIDE/2021, 2021.
- [24] D. K. Benites Garcia and A. L. Villacorta Davila, "Sistema térmico para aprovechamiento de energía residual doméstica como alternativa innovadora de obtención de energía eléctrica en Lomas de Carabayllo, Lima, 2021," 2021.
- [25] C. G. Patino Vega, "Efectos y aplicaciones termo eléctricas de las celdas Peltier."
- [26] L. W. Snyman and G. Maeko, "Design and development of a low-cost system to convert solar thermal energy into electricity for households in South Africa using solar concentrators," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 32, no. 4, pp. 102-116, 2021.
- [27] G. Singh and S. Kundu, "An efficient DC-DC boost converter for thermoelectric energy harvesting," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 118, p. 153132, 2020.
- [28] Y. Köysal, "Performance analysis on solar concentrating thermoelectric generator coupled with heat sink," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 20, pp. 313-318, 2019.
- [29] M. Guan, K. Wang, Q. Zhu, and W.-H. Liao, "A high efficiency boost converter with MPPT scheme for low voltage thermoelectric energy harvesting," *Journal of Electronic Materials*, vol. 45, pp. 5514-5520, 2016.
- [30] A. Leoni and L. Pantoli, "SPICE model identification technique of a cheap thermoelectric cell applied to DC/DC design with MPPT algorithm for low-cost, low-power energy harvesting," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, p. 3744, 2019.
- [31] J. Rimbala, J. Kyncl, J. Koller, and G. Fandi, "Utilizing Connection of Multiple Peltier Cells to Enhance the Coefficient of Performance," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4509, 2024.
- [32] S. Akhlaghi, M. Sarailoo, M. Rezaeiahari, and H. Sangrody, "Study of sufficient number of optimal tilt angle adjustment to maximize residential solar panels yield," in *2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2017: IEEE, pp. 1-5.
- [33] H. Qandil, S. Wang, and W. Zhao, "Application-based design of the Fresnel lens solar concentrator," *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 6, pp. 1-13, 2019.
- [34] W. Harris, M. Hallam, C. Madsen, and J. Simcik, "Fresnel lens characterization for solar concentration efficiency," in *High and Low Concentrator Systems for Solar Energy Applications X*, 2015, vol. 9559: SPIE, p. 955902.

- [35] L. R. Sanchez Vega, "Modeling and experimental evaluation of a small-scale fresnel solar concentrator system," *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 3, no. 1, p. 2, 2016.
- [36] T. Ilahi and M. J. Aslam, "Energy generation using reverse Peltier effect by Fresnel lens concentration," ed, 2016.
- [37] L. L. Baranowski, G. J. Snyder, and E. S. Toberer, "Concentrated solar thermoelectric generators," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 10, pp. 9055-9067, 2012.
- [38] T. Ibrahim, M. Abou Akrouh, F. Hachem, M. Ramadan, H. S. Ramadan, and M. Khaled, "Cooling Techniques for Enhanced Efficiency of Photovoltaic Panels—Comparative Analysis with Environmental and Economic Insights," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 713, 2024.
- [39] M. H. Ashry, "Augmenting the heat sink for better heat dissipation," in *2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*, 2014, vol. 1: IEEE, pp. 398-403.
- [40] A. S. Al-Ezzi and M. N. M. Ansari, "Photovoltaic solar cells: a review," *Applied System Innovation*, vol. 5, no. 4, p. 67, 2022.
- [41] L. C. Souza, D. C. Morais, L. d. S. d. C. e. Silva, F. J. M. d. Seixas, and L. D. O. Arenas, "DC-DC 3SSC-a-based boost converter: Analysis, design, and experimental validation," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6771, 2021.
- [42] M. Hawsawi, H. M. D. Habbi, E. Alhawsawi, M. Yahya, and M. A. Zohdy, "Conventional and Switched Capacitor Boost Converters for Solar PV Integration: Dynamic MPPT Enhancement and Performance Evaluation," *Designs*, vol. 7, no. 5, p. 114, 2023.
- [43] M. Adnan, "The future of energy storage: advancements and roadmaps for lithium-ion batteries," vol. 24, ed: MDPI, 2023, p. 7457.
- [44] L. Wang *et al.*, "Advances in solid-state and flexible thermoelectric coolers for battery thermal management systems," *Soft Science*, vol. 4, p. Article number: 32, 2024.
- [45] A. N. Avcı and İ. Memikoğlu, "Effects of LED lighting on visual comfort with respect to the reading task," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 974-978, 2017.
- [46] M. K. Fathima, K. Asniya, V. Krithika, V. Tech, and M. Mahalakshmi, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HYBRID POWER GENERATION USING SOLAR AND PELTIER PLATE."
- [47] M. Shilpa, M. A. Raheman, A. Aabid, M. Baig, R. Veeresha, and N. Kudva, "A systematic review of thermoelectric peltier devices: applications and limitations," *FDMP-Fluid Dynamics & Materials Processing*, vol. 19, no. 1, pp. 187-206, 2023.
- [48] İ. Karalı, A. Kabul, and M. A. Özçelik, "NUMERICAL AS INVESTIGATION OF ELECTRICITY GENERATION BY THERMOELECTRIC GENERATORS FROM PHOTOVOLTAIC PANELS COOLED BY PASSIVE COOLING METHOD USING HEAT PIPES," *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 14-27.
- [49] G. Ciarpi, M. Del Vecchio, E. Dimaggio, M. Macucci, and G. Pennelli, "Power optimization of systems for direct thermal to electrical energy conversion," *Electronics*, vol. 12, no. 10, p. 2163, 2023.
- [50] J. Mardini-Bovea, G. Torres-Díaz, M. Sabau, E. De-la-Hoz-Franco, J. Niño-Moreno, and P. J. Pacheco-Torres, "A review to refrigeration with thermoelectric energy based on the Peltier effect," *Dyna*, vol. 86, no. 208, pp. 9-18, 2019.
- [51] L. A. Nimmagadda, R. Mahmud, and S. Sinha, "Materials and devices for on-chip and off-chip peltier cooling: A review," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, no. 8, pp. 1267-1281, 2021.
- [52] C. H. A. Almeida, C. D. R. Souto, J. P. Veronese, and J. C. de Oliveira Custódio, "Characterization of thermoelectric cell for electric power generation," in *2015 IEEE*

International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015: IEEE, pp. 1358-1362.

- [53] O. F. B. Sampedro *et al.*, "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*, vol. 7, no. 6, pp. 1719-1755, 2022.
- [54] M. Rihan and M. Islam, "GENERATION OF ELECTRICITY USING PELTIER MODULE COMBINATIONS," 2023.
- [55] W. Lyskawinski and W. Szelag, "Analysis of cooling and heating system with Peltier cell," in *ITM Web of Conferences*, 2018, vol. 19: EDP Sciences, p. 01032.
- [56] Hebei IT (Shanghai) Co., Ltd., Enfriador termoeléctrico TEC1-12706 (Ficha técnica). Accedido: 24 de noviembre de 2025. Disponible en: <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>
- [57] M. A. Mansour *et al.*, "Effect of liquid saturated porous medium on heat transfer from thermoelectric generator," *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, p. 100264, 2023.
- [58] A. Yusop, R. Mohamed, A. Ayob, and A. Mohamed, "Dynamic Modeling and Simulation of a Thermoelectric-Solar Hybrid Energy System Using an Inverse Dynamic Analysis Input Shaper," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2014, no. 1, p. 376781, 2014.
- [59] R. M. Spieringhs, T. H. Phung, J. Audenaert, and P. Hanselaer, "Exploring the applicability of the unified glare rating for an outdoor non-uniform residential luminaire," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, p. 13199, 2022.
- [60] M. S. Jalali, J. R. Jones, E. Tural, and R. B. Gibbons, "Human-Centric Lighting Design: A Framework for Supporting Healthy Circadian Rhythm Grounded in Established Knowledge in Interior Spaces," *Buildings*, vol. 14, no. 4, p. 1125, 2024.
- [61] Y. Wei, S. Wang, and D. Yu, "The role of light quality in regulating early seedling development," *Plants*, vol. 12, no. 14, p. 2746, 2023.

Anexos

Anexos

Foto del prototipo de primera prueba en serie:



Figura. 69. Prototipo en operación prueba 1 en serie.

Foto de prototipo de segunda prueba en serie:



Figura. 70. Prototipo en operación prueba 2 en serie.

Foto de prototipo de tercera prueba en serie:



Figura. 71. Prototipo en operación prueba 3 en serie.

Fotos y comparación en simulación de primera prueba en paralelo:

Tabla. 13. Prueba 1 en paralelo de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.5	0.5
11:30	1.9	1.9



Figura. 72. Tensión y corriente máximas obtenida en primera prueba en paralelo.

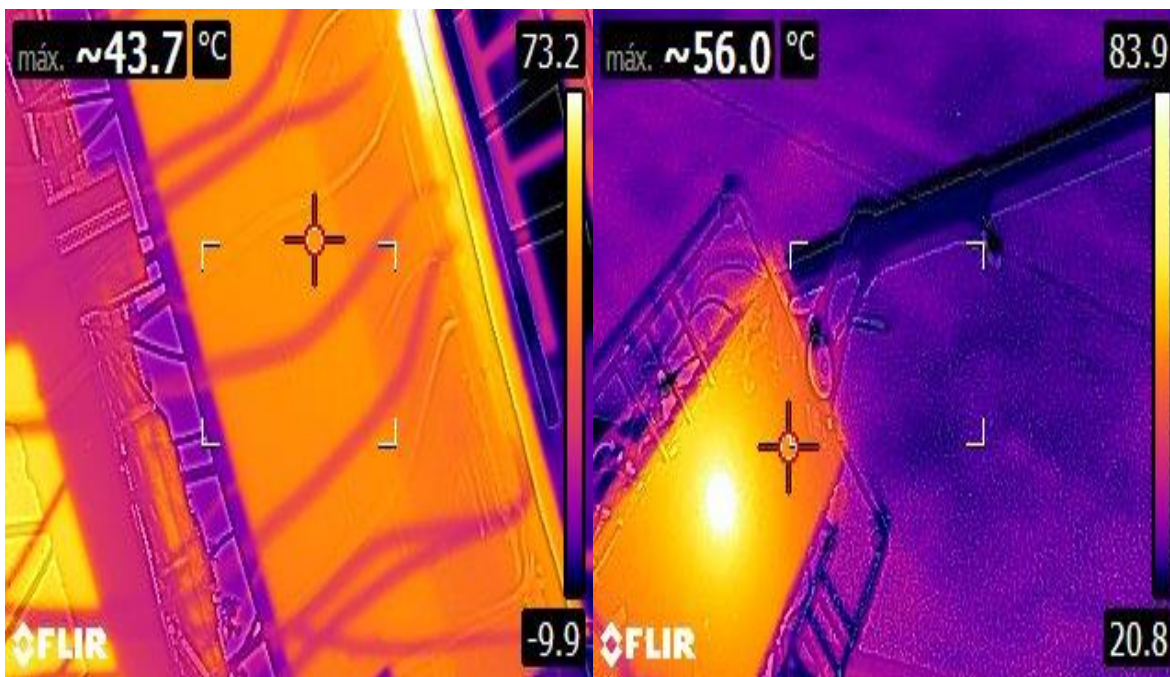


Figura. 73. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en primera prueba en paralelo.

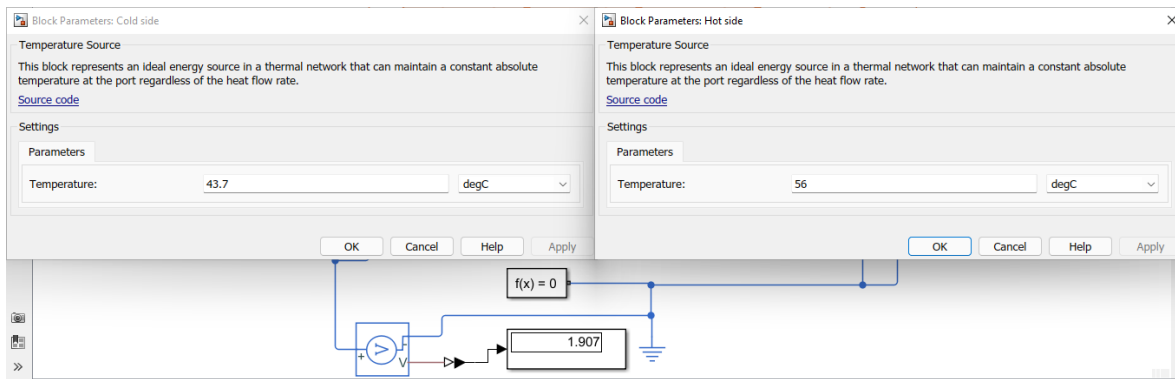


Figura. 74. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en primera prueba en paralelo.

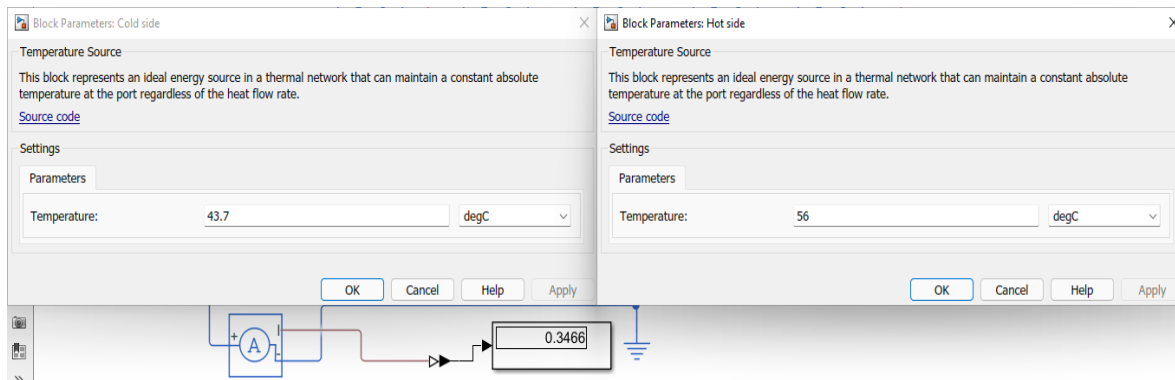


Figura. 75. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en primera prueba en paralelo.



Figura. 76. Tensión y corriente mínimas obtenida en primera prueba en paralelo.



Figura. 77. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en primera prueba en paralelo.

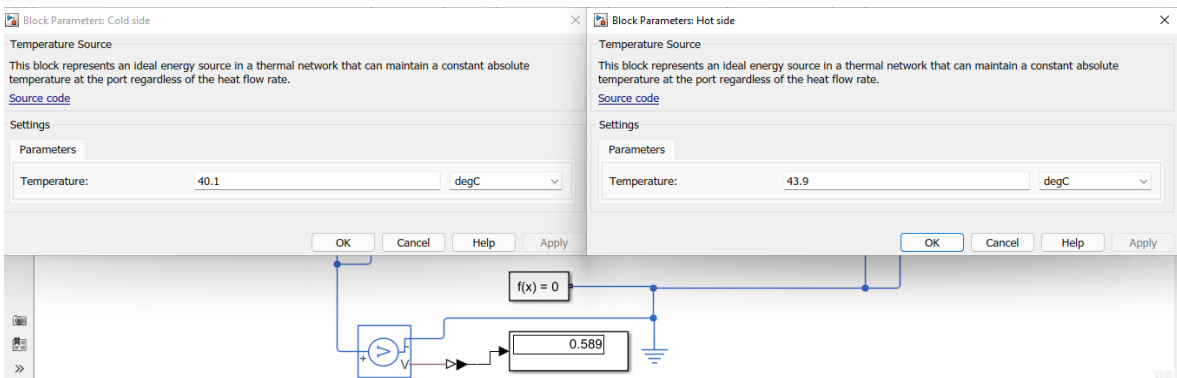


Figura. 78. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en primera prueba en paralelo

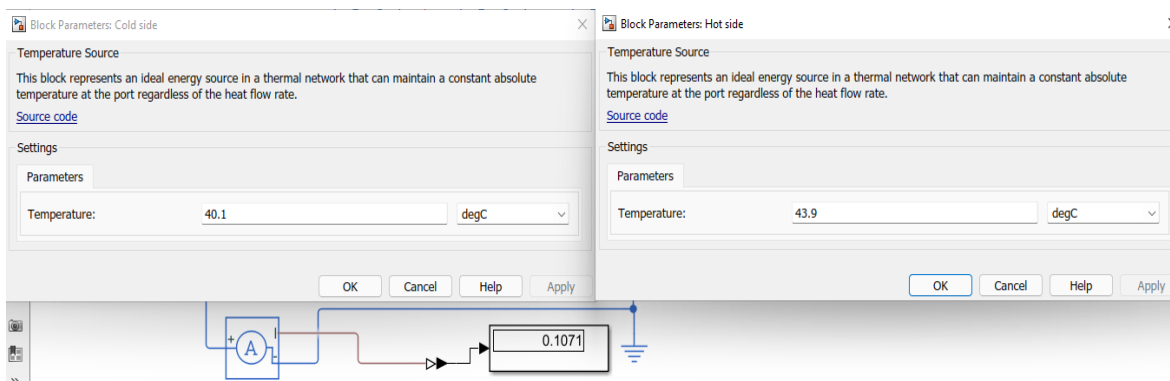


Figura. 79. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en primera prueba en paralelo.



Figura. 80. Prototipo en operación prueba 1 en paralelo.

Fotos y comparación en simulación de segunda prueba en paralelo:

Tabla. 14. Prueba 2 en paralelo de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.3	0.3
12:00	1.8	1.8



Figura. 81. Tensión y corriente máximas obtenida en segunda prueba en paralelo.



Figura. 82. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en segunda prueba en paralelo.

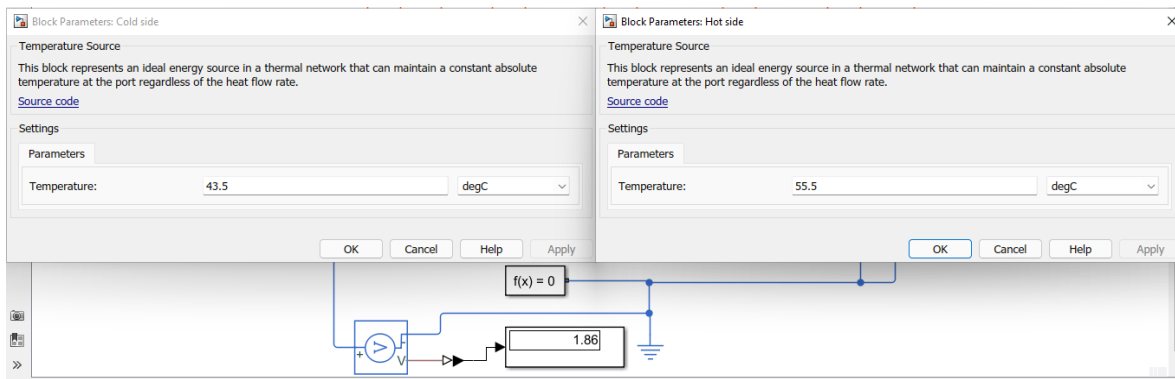


Figura. 83. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en segunda prueba en paralelo.

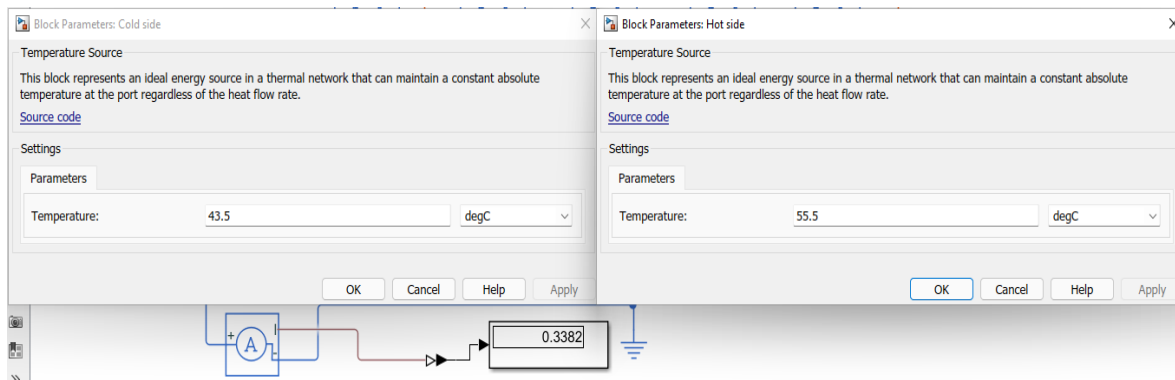


Figura. 84. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en segunda prueba en paralelo.



Figura. 85. Tensión y corriente mínimas obtenida en segunda prueba en paralelo.



Figura. 86. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en segunda prueba en paralelo.

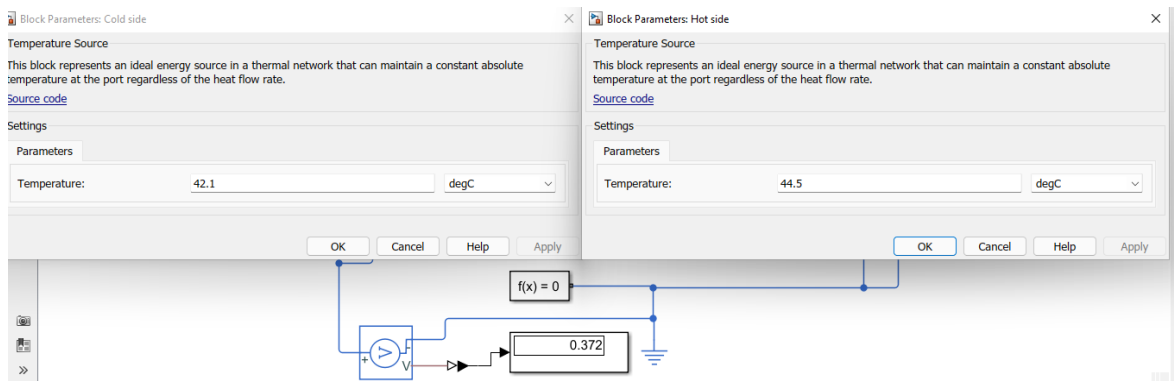


Figura. 87. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en segunda prueba en paralelo.

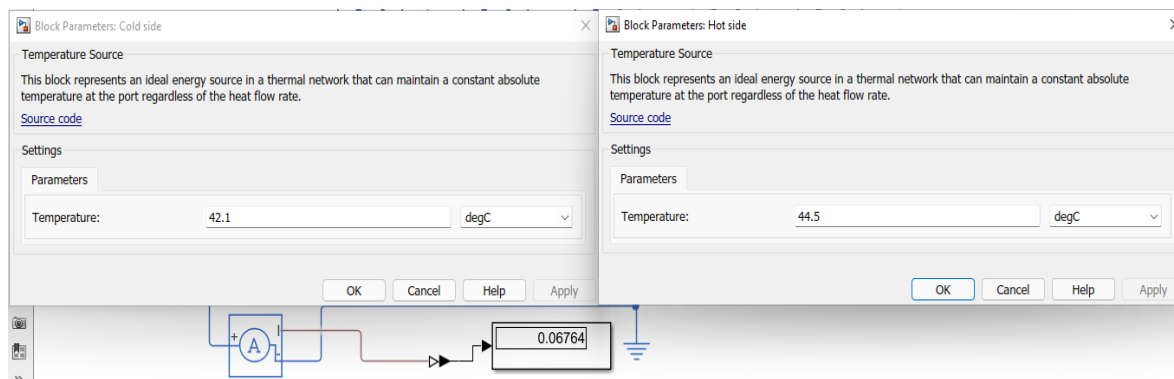


Figura. 88. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en segunda prueba en paralelo.



Figura. 89. Prototipo en operación prueba 2 en paralelo.

Fotos y comparación en simulación de tercera prueba en paralelo

Tabla. 15. Prueba 3 en paralelo de valores máximos y mínimos

Hora	Tensión (V)	Corriente (mA)
6:30	0.4	0.4
12:00	1.9	1.9



Figura. 90. Tensión y corriente máximas obtenida en tercera prueba en paralelo.

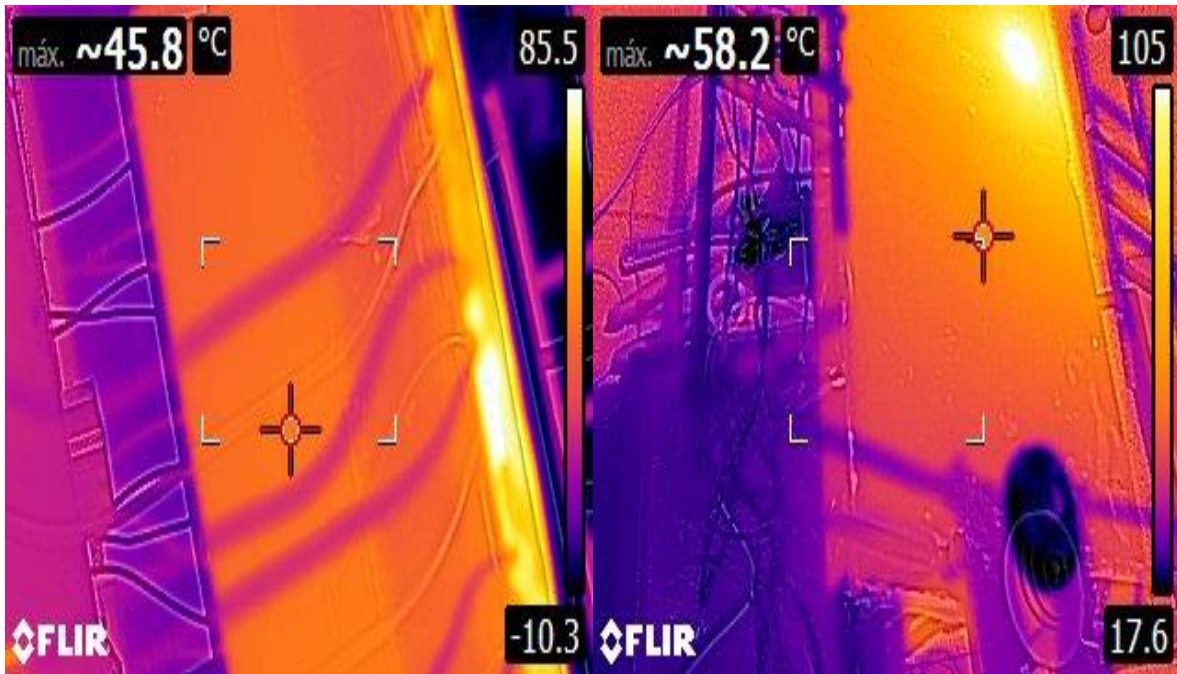


Figura. 91. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en máximos valores obtenidos en tercera prueba en paralelo.

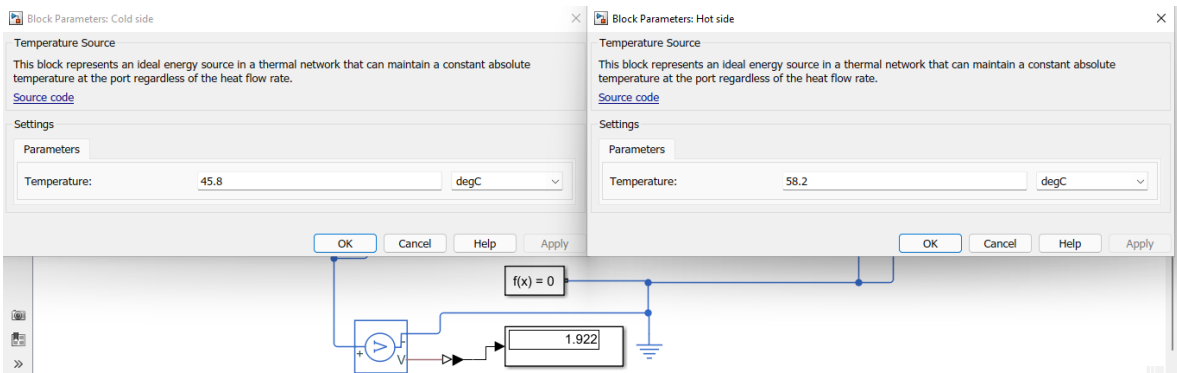


Figura. 92. comparación en simulación con máximo valor obtenido de tensión en tercera prueba en paralelo.

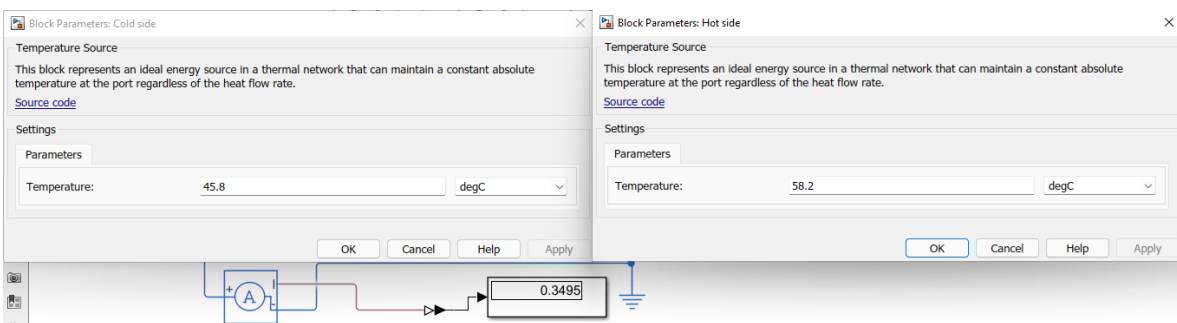


Figura. 93. Comparación en simulación con máximo valor obtenido de corriente en tercera prueba en paralelo



Figura. 94. Tensión y corriente mínimas obtenida en tercera prueba en paralelo.



Figura. 95. Temperaturas en caras caliente y fría obtenidas en mínimos valores obtenidos en tercera prueba en paralelo.

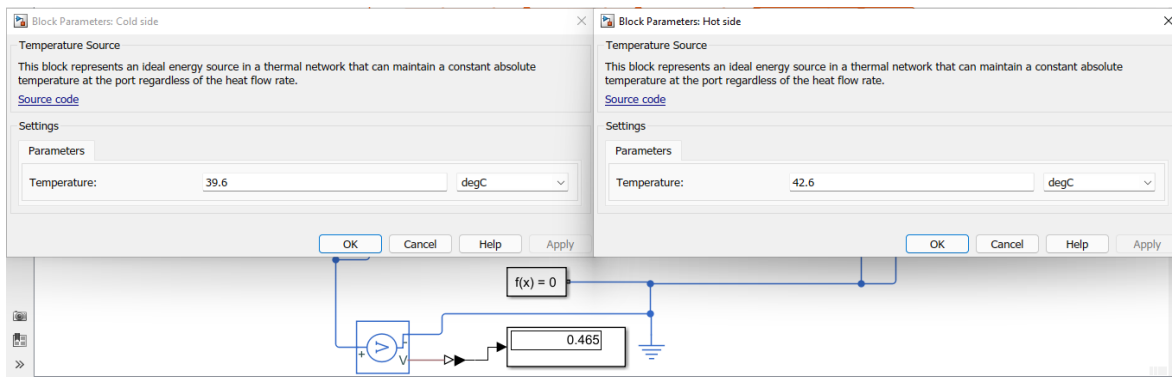


Figura. 96. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de tensión en tercera prueba en paralelo.

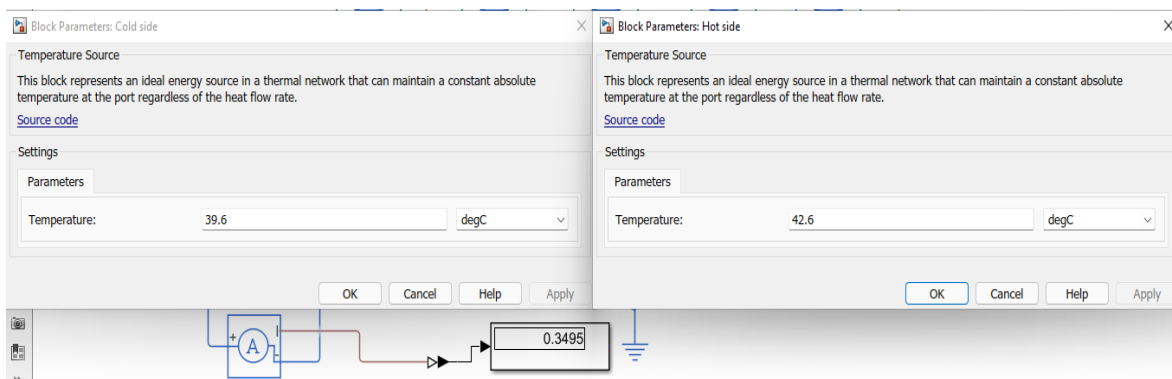


Figura. 97. Comparación en simulación con mínimo valor obtenido de corriente en tercera prueba en paralelo.



Figura. 98. Prototipo en operación prueba 3 en paralelo.

Fotos y tabla de prueba en serie sin movimiento

Tabla. 16. Prueba en serie sin movimiento de valores máximos y mínimos.

Hora	Tensión (mV)	Corriente (mA)
6:30	0	0
12:30	354	33.7



Figura. 99. Tensión y corriente mínima y máxima obtenida en prueba sin movimiento.



Figura. 100. Prototipo en operación en prueba sin movimiento.





Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

OSWALDO APARICIO RODRIGUEZ

Por su destacada participación con la Contribución: Artículo Congreso (4-6 hojas máximo),
en el área: Eficiencia Energética/Energías Renovables, con el Título:

Peltier cell for generating energy using passive sources of cold and heat

presentada en el marco del 5.º Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada
(CITCA), celebrado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico del 26 al 28 de Noviembre de 2025.

Cuomavaca, Morelos, 24 de noviembre de 2025

LORENZO O. HERNÁNDEZ
Director del CENIDET

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

MANUEL ADAM MEDINA
Coordinador General
5.º CITCA

5º CITCA
Congreso Internacional de
Tecnología y Ciencia Aplicada
del 26 al 28 de noviembre, 2025
Cuomavaca, Morelos