



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER APLICACIONES DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA EN ENTORNOS DOMÉSTICOS AISLADOS

Autor: Alejandro Nevado Castuera

Director: Antonio Arenas Alonso

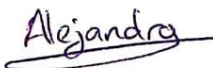
Co-Director: Aurelio García Cerrada

Madrid

Julio de 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
"Aplicaciones de generación termoeléctrica en entornos domésticos aislados"
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

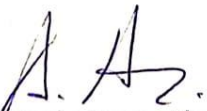


Fdo.: Alejandro Nevado Castuera

Fecha: 15/07/24

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Antonio Arenas Alonso

Fecha: 15/07/24



Fdo.: Aurelio García Cerrada

Fecha: 15/07/2024

Agradecimientos

Quiero agradecer los directores de este TFM, Antonio Arenas Alonso y Aurelio García Cerrada, por todo el tiempo que han dedicado a ayudarme y a resolver mis dudas. Han estado presente a lo largo de todo el trabajo, me han explicado y guiado en todos los experimentos que hemos hecho en el laboratorio y han demostrado una genuina implicación en el proyecto. También quiero agradecer a Carlos Ruiz Diez, por su colaboración con los toma de datos de los hornos; al profesor Luis Manuel Mochón, por prestarnos su cámara termográfica; y a los responsables de los laboratorios de electrónica, fluidos y fabricación por la colaboración y el apoyo en la construcción de los prototipos.

Agradecer también a toda mi familia, especialmente a mi madre, a mi padre y a mi hermano, por estar presentes y por ayudarme con todo lo que he necesitado.

Por último, agradecer también a mis compañeros de la universidad y de las prácticas, por acompañarme durante estos años de máster y trabajo.

APLICACIONES DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA EN ENTORNOS DOMÉSTICOS AISLADOS

Autor: Nevado Castuera, Alejandro.

Director: Arenas Alonso, Antonio.

Co-Director: García Cerrada, Aurelio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se ha estudiado la generación termoeléctrica, su rango de aplicaciones, sus actuales usos en la industria y equipos que estén en desarrollo. Se han estudiado experimentalmente diversos montajes que emplean generadores termoeléctricos. Se ha diseñado un prototipo funcional para los hornos que se utilizan para cocinar en zonas aisladas de la red eléctrica.

Palabras clave: Generadores termoeléctricos, células Peltier, células Seebeck.

1. Introducción

Existen zonas poco desarrolladas en el mundo que tienen dificultades para acceder a la red eléctrica convencional debido a la escasez de recursos y tecnologías. Las tecnologías que emplean fuentes renovables son una vía hacia la generación de electricidad sostenible. Sin embargo, el elevado coste de estas energías renovables provoca que, en zonas como en África del sur, el carbón continúe siendo el recurso más demandado [1]. La generación termoeléctrica y los generadores termoeléctricos surgen como otra alternativa para generar electricidad a partir del calor residual sin la necesidad de una turbina, sustituta de la tecnología fotovoltaica en aquellas situaciones donde no hay luz solar o restricciones de tiempo. Esta tecnología presenta un alto potencial y todavía se encuentra en su etapa de desarrollo, con margen para nuevos prototipos de ser desarrollados y ser lanzados al mercado.

2. Definición del proyecto

Este proyecto se desarrolla con la idea de alcanzar varios objetivos. Por un lado, se ha estudiado la tecnología de la generación termoeléctrica, sus componentes principales y sus aplicaciones en la industria, dado que ya existen equipos que aprovechan el efecto termoeléctrico [2]. Se han estudiado los proyectos o prototipos existentes, e incluso equipos comerciales a pequeña escala, para entender su funcionamiento y deducir los principales desafíos a superar por esta tecnología para competir al mismo nivel que otras energías renovables [3]. Se ha llevado a cabo un estudio y la caracterización experimental de las células Peltier y Seebeck, que reciben sus nombres de los efectos termoeléctricos utilizados para refrigeración o generación de calor respectivamente, que son conceptualmente iguales pero con ciertas diferencias en su construcción y componentes; protagonistas de cualquier generador termoeléctrico. En función de la diferencia de temperatura que haya entre sus caras, estas células producen una diferencia de potencial entre sus terminales.

Por otro lado, se ha querido diseñar un prototipo de generación termoeléctrica aspirando a que pueda ser utilizado en entornos domésticos aislados como una fuente de electricidad adicional, capaz de iluminar entornos o cargar las baterías de los dispositivos móviles. Se ha planteado una metodología de estudio de diversos equipos que emplean generadores termoeléctricos, un método para caracterizar las células

termoeléctricas y un modelo matemático para determinar la distribución de temperaturas a lo largo de la pata de uno de estos equipos. Se ha estudiado por qué esta pata es capaz de proteger los componentes electrónicos de las altas temperaturas de las fuentes de calor. Por último, se ha estudiado la viabilidad de comercialización del prototipo en el mercado.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La metodología planteada comienza con un estudio previo de la tecnología y sus campos de aplicación mediante bibliografías. Con esto se consiguen entender las principales dificultades a las que se enfrentan los sistemas termoeléctricos.

Para hacer una adecuada selección de componentes y diseño de prototipo final, se construyen y caracterizan diversos equipos que utilizan células Seebeck o Peltier y distintos módulos de refrigeración. Véanse dos ejemplos en la Figura 1:

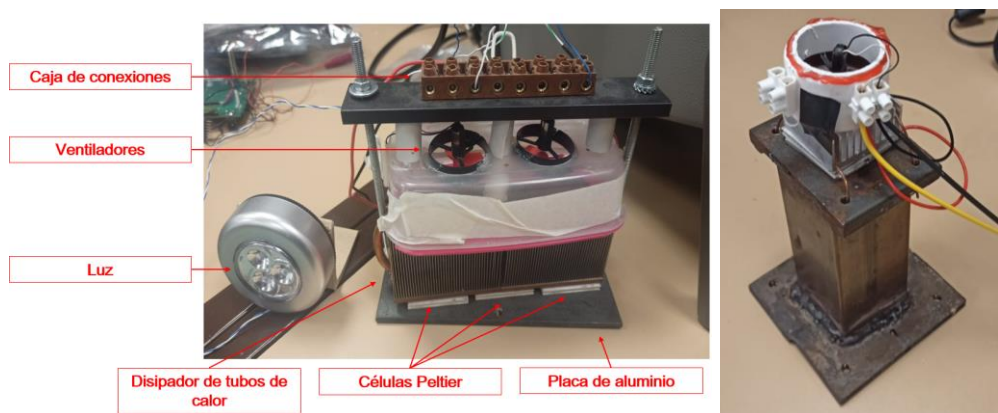


Figura 1 – A la izquierda, equipo con 3 células Peltier y un enfriador de tubos de calor. A la derecha, equipo con 1 célula Seebeck y un disipador de aletas.

Adicionalmente, se ha preparado un modelo matemático de transmisión de calor desde las fuentes de calor a las células y se ha realizado una caracterización empírica de las células termoeléctricas. Esto permite poder predecir la potencia eléctrica obtenida con una célula para un modelo de pata determinado y una temperatura concreta en su base.

4. Resultados

Con los resultados de los estudios experimentales se han seleccionado componentes de reducido coste y se ha propuesto un diseño modular para un prototipo que emplea 4 células termoeléctricas y una pata de 20 cm de altura. Se han escogido disipadores de aletas y ventiladores de dron para constituir el módulo de refrigeración. El equipo resultante ha sido capaz de alimentar una batería de litio, consiguiendo alcanzar diferencias de potencial entre los 0,5 y 5 V. Sin embargo, se genera una corriente muy reducida en el rango de mA, que limita la potencia eléctrica total que se puede extraer.

Además, mediante el uso de una cámara termográfica y termómetros de termopares se ha demostrado la validez del modelo matemático. Se han obtenido prestaciones para las células termoeléctricas inferiores a las declaradas por el fabricante, y se han justificado los posibles campos de mejora de la metodología empleada.

También se ha estudiado la posibilidad de lanzar este prototipo como producto al mercado, analizando la competencia existente y el público objetivo entre otros. En la Figura 2 puede verse el prototipo final y algunas de sus prestaciones.

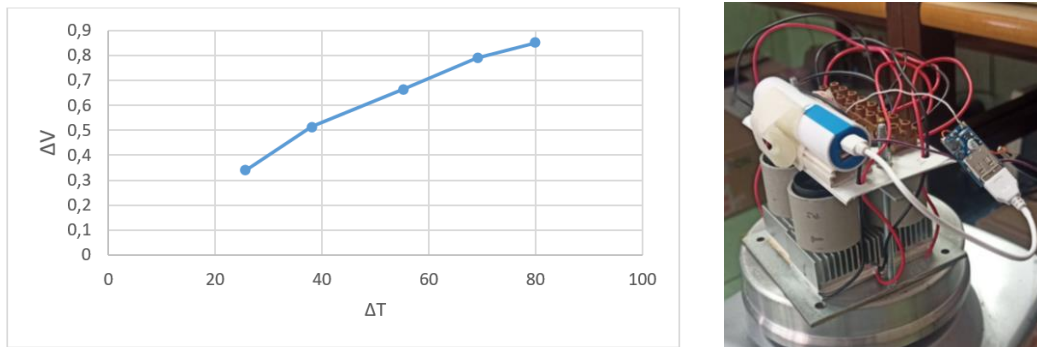


Figura 2 – Tensión suministrada por el prototipo en función de la diferencia de temperatura entre el foco frío y el caliente.

5. Conclusiones

Tras desarrollar el marco teórico y estudiar la bibliografía, se ha expuesto el potencial de las tecnologías de generación termoeléctrica y su amplio abanico de posibles aplicaciones. Los análisis experimentales han demostrado que diseñar un correcto módulo de refrigeración es fundamental para obtener diferencias de temperaturas significativas. También se ha demostrado la efectividad de las patas para proteger los componentes de elevadas temperaturas y la diferencia entre la efectividad teórica y empírica de las células termoeléctricas.

El modelo matemático y la caracterización de las células sirven como base de diseño para cualquier prototipo. El prototipo desarrollado cumple con las expectativas en cuanto a tensión se refiere, alcanzando los umbrales mínimos de los convertidores amplificadores comerciales con salida USB, pero su potencia eléctrica queda limitada debido a la reducida corriente eléctrica que el generador termoeléctrico es capaz de suministrar.

6. Referencias

- [1] S. Owusu-Mante, «Climate Policy Lab - South Africa's 2019 IRP Renewable Energy Targets,» 13 5 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.climatepolicylab.org/communityvoices/2020/5/13/south-africas-2019-irp-renewable-energy-targets>. [Último acceso: 14 11 2023].
- [2] Green Car Congress, «BMW provides an update on waste heat recovery projects; Turbosteamer and the Thermoelectric Generator,» Thermoelectrcis, Waste Heat Recovery, 30 8 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [3] Thermonamic, «Biomass Stove with a 10 Watts Thermoelectric Power Generator,» [En línea]. Disponible en: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=875. [Último acceso: 21 11 2023].

THERMOELECTRIC GENERATION APPLICATIONS IN ISOLATED DOMESTIC ENVIRONMENTS

Author: Nevado Castuera, Alejandro.

Supervisor: Arenas Alonso, Antonio.

Co-Supervisor: García Cerrada, Aurelio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project studied thermoelectric generation, its range of applications, its current uses in the industry and the equipment that is under development. Various setups that use thermoelectric generators have been studied experimentally. A functional prototype has been designed for ovens used for cooking in isolated domestic environments.

Key words: thermoelectric generation, Peltier cells, Seebeck cells.

1. Introduction

There are underdeveloped areas around the globe that have difficulties accessing the conventional electrical grid due to the lack of resources and technology. Technologies that use renewable sources are a path towards sustainable electricity generation. However, the high cost of these renewable energies means that, in areas such as southern Africa, coal continues to be the most demanded resource [1]. Thermoelectric generation and thermoelectric generators emerge as an additional alternative to generate electricity from waste heat without the need for a turbines, a substitute for photovoltaic technology in those situations where there is no sunlight or time restrictions. This technology shows great potential and is still in its development stage, with room for new prototypes to be developed and launched on the market.

2. Project definition

This project is developed aiming to achieve several objectives. On one hand, the technology of thermoelectric generation, its main components and its applications in the industry have been studied, considering that there already exist equipment that takes advantage of the thermoelectric effect [2] Existing projects or prototypes, and even small-scale commercial equipment, have been studied to understand their operation and deduce the main challenges to be overcome by this technology so as to be able to compete at the same level as other renewable energies [3]. A study and experimental characterization of Peltier and Seebeck cells, which receive their names from the thermoelectric effects used for cooling or heat generation respectively that are conceptually the same but with certain difference in their construction and components; the protagonists of any thermoelectric generator, has been carried out. Depending on the temperature difference between their ceramic faces, these cells produce a potential difference between their terminals.

On the other hand, it was desired to design a thermoelectric generation prototype with the hope that it could be used in isolated domestic environments as an additional source of electricity capable of illuminating environments or charging the batteries of mobile devices. A methodology has been proposed to study various equipment that utilizes thermoelectric generators, a method to characterize thermoelectric cells and a mathematical model to determine the temperature distribution along the leg of one of these equipment. It has been studied why this leg is capable of protecting electronic

components from the high temperatures of heat sources. Finally, the feasibility of commercializing the prototype on the market has been briefly studied.

3. Methodology description

The proposed methodology begins with a prior study of the technology and its fields of application through bibliographies. With this, it is possible to understand the main difficulties that thermoelectric systems face.

To make an adequate selection of components and design the final prototype, various devices that worked with Seebeck or Peltier cells and different cooling modules are built and characterized. See two examples in Figure 1:

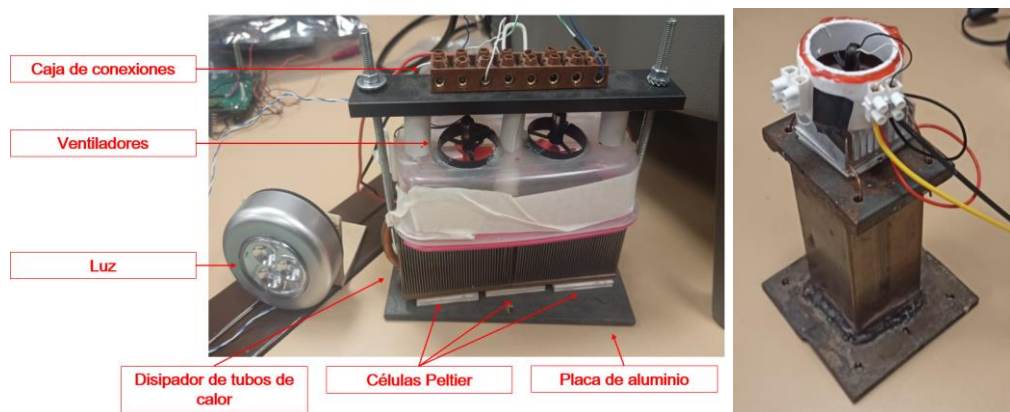


Figure 1 – On the left, device with 3 Peltier cells and a heat pipe cooler. On the right, device with 1 Seebeck cell and a fin heatsink.

Additionally, a mathematical model of heat transmission from heat sources to cells has been prepared and an empirical characterization of the thermoelectric cells has been carried out. This allows us to predict the electrical power obtained with a cell for a specific leg model and specific temperature at its base.

4. Results

With the results of the experimental studies, low-cost components have been selected and a modular design has been proposed for a prototype that uses 4 thermoelectric cells and a 20 cm high leg. Fin heat sinks and drone fans have been chosen to constitute the cooling module. The resulting equipment has been able to power a lithium battery, achieving potential differences between 0,5 and 5 V. However, a very low current is generated in the mA range, which limits the total electrical power that can be extracted.

Furthermore, through the use of a thermal imaging camera and thermocouple thermometers, the validity of the mathematical model has been demonstrated. The efficiencies for the thermoelectric cells obtained are below the values provided by suppliers, and possible areas of improvement in the methodology used have been justified.

The possibility of launching this prototype as a product on the market has also been studied, analyzing the existing competition and the target market among others. See in Figure 2 the final prototype and some of its features.

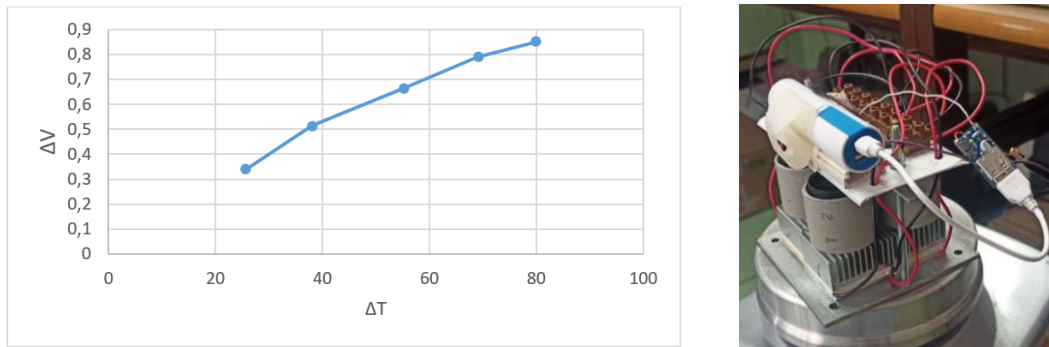


Figure 2 – Voltage supplied by the prototype depending on the temperature difference between the cold and hot bulb.

5. Conclusions

After developing the theoretical framework and studying the bibliography, the potential of thermoelectric generation technologies and their wide range of possible applications has been exposed. Experimental analyzes have shown that designing a correct cooling module is essential to obtain significant temperature differences. They have also highlighted the effectiveness of the legs to protect component from excessive temperatures and the difference between the theoretical and empirical effectiveness of thermoelectric cells.

The mathematical model and characterization of the cells serve as the design basis for any prototype. The developed prototype meets the expectations in terms of voltage, reaching the minimum thresholds of the commercial amplifier converters with USB output, but its electrical power is limited due to the reduced electrical current that the thermoelectric generator is capable of supplying.

6. References

- [1] S. Owusu-Mante, «Climate Policy Lab - South Africa's 2019 IRP Renewable Energy Targets,» 13 5 2020. [Online]. Available: <https://www.climatepolicylab.org/communityvoices/2020/5/13/south-africas-2019-irp-renewable-energy-targets>. [Last access: 14 11 2023].
- [2] Green Car Congress, «BMW provides an update on waste heat recovery projects; Turbosteamer and the Thermoelectric Generator,» Thermoelectrics, Waste Heat Recovery, 30 8 2011. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>. [Last access: 20 11 2023].
- [3] Thermonamic, «Biomass Stove with a 10 Watts Thermoelectric Power Generator,» [Online]. Available: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=875. [Last access: 21 11 2023].



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER APLICACIONES DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA EN ENTORNOS DOMÉSTICOS AISLADOS

Autor: Alejandro Nevado Castuera

Director: Antonio Arenas Alonso

Co-Director: Aurelio García Cerrada

Madrid

Julio de 2024

Índice de la memoria

1.	Introducción	1
1.1.	Contextualización	1
1.2.	Motivación	3
1.3.	Objetivos	4
1.4.	Estructura de este documento.....	4
2.	Marco Teórico	6
2.1.	Efectos termoeléctricos	6
2.1.1.	Efecto Seebeck	6
2.1.2.	Efecto Peltier	7
2.1.3.	Efecto Thomson.....	8
2.2.	Aplicaciones en la industria.....	9
2.2.1.	Aprovechamiento de calores residuales	9
2.2.2.	Generadores termoeléctricos radioisotópicos en el espacio.....	12
2.2.3.	Refrigeración de cámaras.....	13
2.2.4.	Termocicladores para estudios biológicos	15
2.3.	Generar electricidad a partir de fuentes renovables	18
2.4.	Biomasa	18
3.	Descripción de las Tecnologías.....	20
3.1.	Generadores termoeléctricos	20
3.1.1.	Células Seebeck	20
3.1.2.	Materiales	21
3.1.3.	¿Por qué usar generadores termoeléctricos?	22
3.2.	Prototipos termoeléctricos existentes	23
3.2.1.	Generación eléctrica a partir de energía geotérmica	23
3.2.2.	Estufas de biomasa.....	24
3.2.3.	Generador con sistema de concentración solar	25
3.2.4.	Bombas de calor termoeléctricas.....	27
3.2.5.	Generadores termoeléctricos accionados por el calor corporal.....	28
3.3.	Desafíos y oportunidades.....	30
4.	Definición y Metodología de Trabajo	31
4.1.	Fundación ingenieros ICAI	31
4.2.	Equipo y material de laboratorio	32
4.2.1.	Medidores de tensión y corriente eléctrica	33
4.2.2.	Fuentes de alimentación	34

4.2.3.	Calor y temperatura	35
4.2.4.	Materiales de los equipos contruidos	37
4.2.5.	Ventiladores	39
4.3.	Estudio experimental	41
4.3.1.	Primer equipo.....	42
4.3.2.	Calentador de estufa	46
4.3.3.	Equipo con vela	52
4.3.4.	Equipo simple	57
4.3.5.	Configuración final	63
4.3.5.1.	Caracterización células Peltier	66
4.3.5.2.	Caracterización células Seebeck.....	68
4.3.5.3.	Conclusiones.....	70
5.	Modelo Desarrollado.....	72
5.1.	Cálculos de transmisión de calor en la pata.....	72
5.1.1.	Convección natural, coeficiente global de transmisión h	76
5.2.	Análisis con cámara termográfica para distintas patas.....	77
5.3.	Cálculos aplicados	82
5.4.	Validez de las hipótesis	83
5.5.	Resultados prototipo final.....	84
6.	Evaluación de costes	87
6.1.	Presupuesto del trabajo completo.....	87
6.2.	Presupuesto para un equipo en el mercado	88
7.	Plan de negocio	89
7.1.	Análisis de mercado	89
7.1.1.	Mercado objetivo	89
7.1.2.	Competencia	89
7.1.3.	Estado del mercado.....	89
7.2.	Modelo de negocio	90
7.2.1.	Propuesta de valor	90
7.2.2.	Estrategias de entrada al mercado	90
7.2.3.	Precios	90
7.2.4.	Marketing.....	91
7.2.5.	Barreras y riesgos	91
7.2.6.	Mitigación de riesgos	91
8.	Conclusiones y Trabajos Futuros.....	93
8.1.	Conclusiones.....	93

8.1.1.	Estudio de la tecnología	93
8.1.2.	Experimentación	93
8.2.	Trabajo futuro	95
9.	Objetivos de Desarrollo Sostenible	96
10.	Bibliografía	97
ANEXO A: Hoja de características – Célula Peltier		104
ANEXO B: Hoja de características – Célula Seebeck 30x30 mm.....		105
ANEXO C: Hoja de características – Célula Seebeck 40x40 mm.....		107

Índice de figuras

Figura 1: Línea de tiempo de la generación de energía antes del siglo XX [3].....	1
Figura 2: Historia de los cambios en las fuentes de energía a lo largo de la historia. [6]	2
Figura 3: Fuentes de energía en África del Sur en 2018 y previstas para 2030 [7].....	3
Figura 4: Termopar ejemplificando el efecto Seebeck [12]	7
Figura 5: Desperdicio de energía térmica generada en motores de BMW en 2011 [19].	10
Figura 6: (a) unidad ubicada en el colector, (b) unidad ubicada en el sistema de recirculación [18].	10
Figura 7: Potencia eléctrica obtenida mediante la generación termoeléctrica a lo largo de los años [19].....	11
Figura 8: Generador Termoeléctrico Radioisotópico Multi-misión (MMRTG) [21].	12
Figura 9: Componentes de un RTG [23].	12
Figura 10: Esfera de combustible de Pu-238 encapsulada y protegida	13
Figura 11: Componentes de un sistema de refrigeración tradicional para cámaras [25].....	14
Figura 12: TC1 DNA, Termociclador comercial de bloques metálicos [26].	16
Figura 13: Bloques de células Peltier utilizados en los termocicladores [26].	16
Figura 14: Ejemplificación de las mejoras obtenidas mediante los avances de los bloques Peltier [26].	17
Figura 15: Biopaneles de Greenfluidcs [33].	19
Figura 16: Movimiento de electrones en un generador termoeléctrico [34].	20
Figura 17: (a) Termopares en el interior de una célula abierta en el laboratorio, (b) cubiertas cerámicas albergando los termopares.....	21
Figura 18: Generador termoeléctrico ubicado en el Parque Nacional de Timanfaya [38].	23
Figura 19: Modelos de estufas de biomasa que requieren 350 gramos de combustible [39] [40].	25
Figura 20: Modelo de estufa de biomasa que requiere 250 gramos de combustible [41].....	25
Figura 21: Montaje final del prototipo [42].	26
Figura 22: Esquema de las etapas de la bomba de calor [43].....	28
Figura 23: Generador termoeléctrico accionado por el calor corporal [37].	29
Figura 24: Hornillo utilizado en Chad, África Central.	31
Figura 25: Rango de temperaturas de trabajo del hornillo.....	32
Figura 26: Espacio de trabajo con varios montajes de equipos y los materiales principales	32
Figura 27: A la izquierda, multímetro de hasta 600 V y 10 A de RS PRO [48]. A la derecha, multímetro de hasta 600 V y 20 A de Kaise instrumentación [47].	33
Figura 28: Osciloscopio portátil digital de Rohde & Schwarz [49].	33
Figura 29: Fuente de alimentación de corriente continua.....	34
Figura 30: Autotransformador monofásico variable de Galiana Industrial [50].	34
Figura 31: Placa calefactora digital de Ovan [51].....	35
Figura 32: A la izquierda, termómetro de termopares de Velleman de 2 medidas [52]. A la derecha, termómetro de Spacnana de 1 medida [53].	35
Figura 33: Resistencias variables calefactoras de RS Pro [54].....	36
Figura 34: De izquierda a derecha: célula Seebeck 30x30 mm [56], célula Seebeck 40x40 mm [57] y célula Peltier 40x40 mm [58].	37
Figura 35: Batería de litio a 3,6 V de Reguero Baterías [59].	38
Figura 36: Módulo convertidor elevador de Miravia [60].....	38
Figura 37: A la izquierda, ventilador industrial de 5 V. A la derecha, ventilador de dron: DC 12V, 0,05 A, 40x40x10mm [61].	39

Figura 38: Tensión (V) y consumo (mA) del ventilador pequeño.....	39
Figura 39: Tensión (V) y consumo (mA) del ventilador grande.....	40
Figura 40: Estudio de velocidad del ventilador grande.....	40
Figura 41: Primer equipo estudiado.....	42
Figura 42: Circuito eléctrico del primer equipo. V1, V2 y V3 representan las células y M los motores de los ventiladores.....	43
Figura 43: Medidas iniciales con el primer equipo. Diferencia de potencial obtenida para una diferencia de temperatura determinada.	44
Figura 44: Relación entre la diferencia de temperaturas y la diferencia de potencial obtenida en el primer equipo. Los valores numéricos en cada punto representan el valor en el eje de ordenadas para un valor determinado en el eje de abscisas.....	44
Figura 45: Esquema de componentes básicos para un prototipo.....	45
Figura 46: Disipador de calor con aletas [63].....	46
Figura 47: Calentador de estufa con pata	47
Figura 48: Pata del calentador con lámina de elemento conductor.....	47
Figura 49: Componentes del calentador para estufa.....	48
Figura 50: Relación entre diferencia de potencial y diferencia de temperatura obtenidas en el calentador para estufa en su método de trabajo habitual. La línea continua representa la medida experimental y la línea de punto la aproximación por una recta.	49
Figura 51: Relación entre la diferencia de temperaturas y la diferencia de potencial obtenida en el calentador para estufa sin utilizar el ventilador.....	50
Figura 52: Relación entre la diferencia de temperatura y la potencia obtenida en el calentador para estufa sin utilizar el ventilador.....	51
Figura 53: Relación entre la temperatura en la cara caliente de la célula y la base calefactora.....	51
Figura 54: Componentes del equipo con vela.....	52
Figura 55: Resistencia variable	53
Figura 56: Vista lateral de la resistencia variable.....	53
Figura 57: Circuito eléctrico para el equipo con vela	53
Figura 58: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 10,5 °C en el equipo con vela.	54
Figura 59: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 31,4 °C en el equipo con vela.	54
Figura 60: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 41,5 °C en el equipo con vela.	55
Figura 61: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 53,7 °C en el equipo con vela.	55
Figura 62: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 65,1 °C en el equipo con vela.	56
Figura 63: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 84 °C en el equipo con vela.	56
Figura 64: Componentes del equipo simple	57
Figura 65: Circuito eléctrico del equipo simple.....	58
Figura 66: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 8,7 °C en el equipo simple	58
Figura 67: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 22 °C en el equipo simple	59
Figura 68: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 32,2 °C en el equipo simple.....	59

Figura 69: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 41,2 °C en el equipo simple.....	60
Figura 70: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 45,8 °C en el equipo simple.....	60
Figura 71: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 57,5 °C en el equipo simple.....	61
Figura 72: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 62,7 °C en el equipo simple.....	61
Figura 73: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 71,5 °C en el equipo simple.....	62
Figura 74: Esquema en sección de la configuración.....	63
Figura 75: Esquema del montaje empleado para asegurar una transmisión de calor hacia arriba.....	64
Figura 76: Transmisión de calor en la configuración final.....	65
Figura 77: Configuración final	65
Figura 78: Pata rectangular considerada como aleta.....	72
Figura 79: Sección de la pata.....	73
Figura 80: Correlaciones para el número de Nusselt de Yunus A. Cengel [67].....	76
Figura 81: Propiedades del aire a 1 atm de Yunus A.Cengel [67].	77
Figura 82: Pata del equipo final.....	77
Figura 83: Fotografías para la pata final a 100 °C en la base.	78
Figura 84: Fotografías para la pata final a 150 °C en la base.	78
Figura 85: Pata alargada.....	79
Figura 86: Fotografías para la pata alargada a 150 °C en la base.	79
Figura 87: Fotografías para el montaje sobre la pata alargada a 100 °C en la base.....	80
Figura 88: Resultados para el montaje sobre la pata alargada a 100 °C en la base.	80
Figura 89: Fotografías para el montaje sobre la pata alargada a 150 °C en la base.....	80
Figura 90: Resultados para el montaje sobre la pata alargada a 150 °C en la base.	81
Figura 91: Prototipo final	84
Figura 92: Fotografías para el prototipo final a 150 °C en la base.....	84
Figura 93: Configuración con las 4 células en paralelo.	85
Figura 94: Configuración con las 4 células en serie.....	85
Figura 95: Tensión obtenida en la configuración en paralelo	85
Figura 96: Corriente obtenida en la configuración en paralelo	86
Figura 97: Objetivos de desarrollo sostenible competentes [73].	96

Índice de tablas

Tabla 1: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 50,8$ y $T_{base} = 103,3$	66
Tabla 2: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 74,6$ y $T_{base} = 152,2$	66
Tabla 3: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 102,7$ y $T_{base} = 205,5$	67
Tabla 4: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 130,2$ y $T_{base} = 256,1$	67
Tabla 5: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 26,5$ y $T_{base} = 72,3$	68
Tabla 6: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 39,1$ y $T_{base} = 110,8$	68
Tabla 7: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 93,6$ y $T_{base} = 157,2$	69
Tabla 8: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 127$ y $T_{base} = 207,3$	69
Tabla 9: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 161,7$ y $T_{base} = 258,8$	70
Tabla 10: Coste de todos los materiales y equipos	87
Tabla 11: Coste total de realización de este estudio	87
Tabla 12: Coste de fabricación y montaje de un equipo	88

1. Introducción

1.1. Contextualización

En la actualidad existe una fuerte dependencia de la electricidad que ha derivado al ser humano a desarrollar grandes proyectos destinados a obtener este recurso de una manera más eficiente y a mayor escala [1]. Durante los primeros años de existencia de las centrales térmicas se buscó abaratar la generación eléctrica como prioridad principal, provocando que años más adelante surgieran alternativas como fueron los ciclos combinados, que mejoraban la eficiencia del proceso entero combinando dos ciclos. Las centrales de ciclo combinado funcionaban aprovechando el calor de los gases de escape provenientes de un ciclo de Brayton que emplea la turbina de gas convencional; para utilizarlos en un ciclo de Rankine que emplea una turbina de vapor. Mejorar la eficiencia de los ciclos térmicos no fue la única alternativa para reducir costes, también surgieron nuevas tecnologías. Las centrales nucleares surgieron incluso antes que las centrales de ciclo combinado, e incluso podríamos decir que primero surgió la idea de crear centrales renovables si hablamos de ejemplos como la planta hidroeléctrica de Niagara Falls de 1895 [2]. Sin embargo, el auge real de las energías renovables no tendría lugar hasta finales del siglo XX y principios del siglo XXI, si bien su desarrollo comenzó a ser notable desde principios del siglo XX [3]. En la Figura 1 se expone la evolución de la generación de energía:

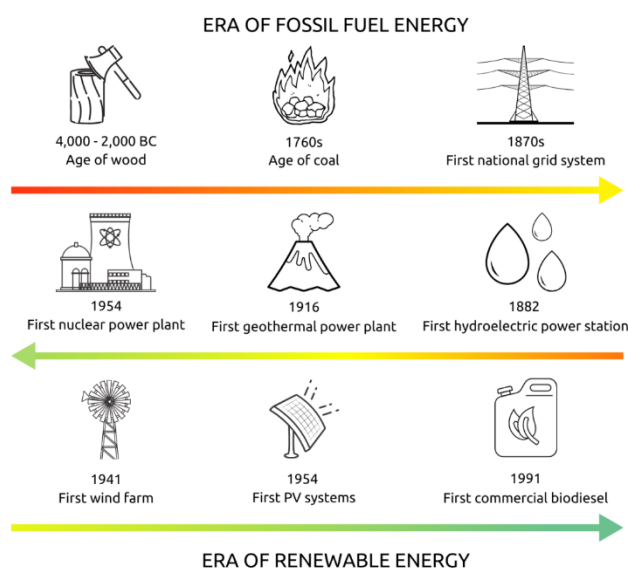


Figura 1: Línea de tiempo de la generación de energía antes del siglo XX [3]

Analizando la historia se observa como el desarrollo de la generación de energía ha sido siempre relevante, pero no lo ha sido de la misma manera la generación renovable hasta finales del siglo pasado. Podemos deducir que no se decidió priorizar por encima del coste, ni el impacto provocado por las tecnologías de generación eléctrica, ni la explotación de los recursos naturales que se empleaban, hasta finales del siglo XX. Ejemplo de esto son el Acuerdo de París [4] y la creación de los Objetivos para el Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 [5], firmados en el

2015. Esto se debe al creciente interés durante finales del siglo XX por el cuidado del medioambiente y la búsqueda de causas del cambio climático que apuntaron directamente a las centrales térmicas entre otros culpables. Este cambio en las tendencias de uso de las diferentes tecnologías de generación de energía se ha podido estudiar en países como Estados Unidos como se muestra en la Figura 2 [6].

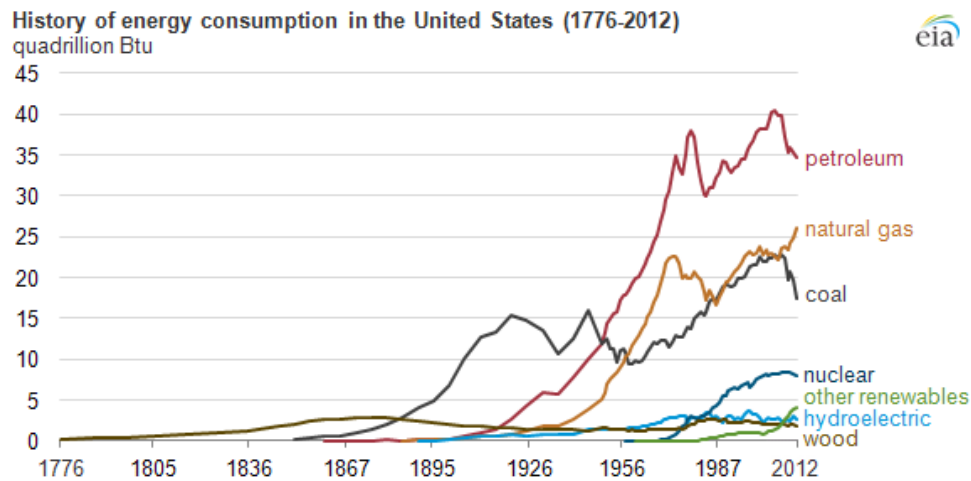
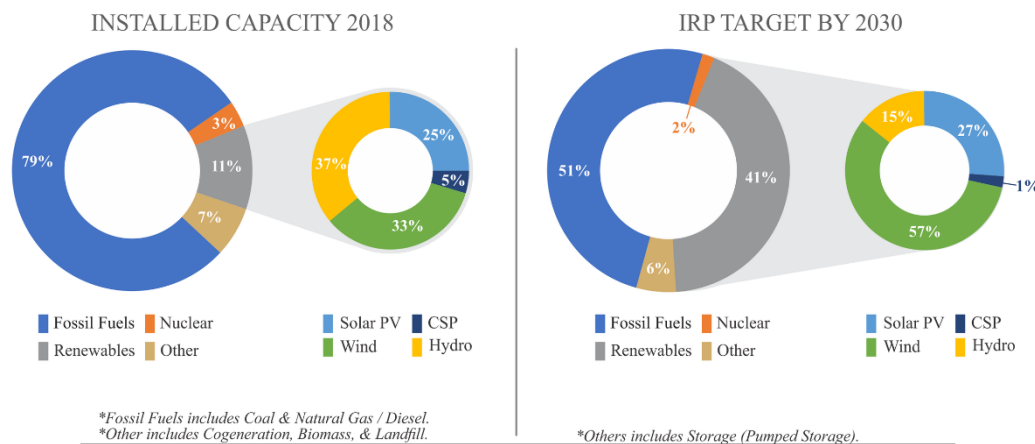


Figura 2: Historia de los cambios en las fuentes de energía a lo largo de la historia. [6]

Las energías renovables contaban con otro punto a favor que justificaba su estudio y desarrollo, y es que en zonas poco desarrolladas era extremadamente complicado adquirir acceso a la generación eléctrica debido a la escasez de recursos y tecnologías. Las fuentes renovables servían como enlace para estas zonas desconectadas de la red eléctrica convencional que proponían otro camino hacia la generación de electricidad. Entre las más destacadas se encuentran la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y las centrales hidráulicas en pequeña escala, aunque el carbón continúa siendo el recursos más demandado para la generación de energía en zonas como en el sur de África como se puede observar en la Figura 3 [1] [7]. No obstante, la generación termoeléctrica es otra opción que se debe tener en cuenta ya que, en contraste con las energías renovables anteriormente mencionadas, esta última tiene la capacidad de generar electricidad a partir del calor residual sin la necesidad de una turbina. Esta tecnología permite enfocar la generación de electricidad de una manera diferente que puede resultar de gran utilidad para comunidades rurales, refugios e incluso viviendas móviles con acceso limitado a la red eléctrica.



Data collected from IRP 2019. Graph by Seth Owusu-Mante.

Figura 3: Fuentes de energía en África del Sur en 2018 y previstas para 2030 [7]

La generación termoeléctrica se puede aplicar para solventar multitud de necesidades cotidianas como puede ser desde la recarga de baterías para dispositivos eléctricos a la iluminación o calefacción de habitáculos. Si bien esta tecnología cuenta con sus limitaciones que han provocado que no se desarrollen centrales en la misma escala en la que se han desarrollado para otras fuentes de energías renovables, se espera que en un futuro sea capaz de competir con paneles fotovoltaicos para casos domésticos aislados.

1.2. Motivación

Para el autor de este trabajo, la motivación surge en el campo de las energías y concretamente en las energías renovables tras años de estudio de ingeniería industrial y mecánica. El autor considera que las energías renovables están en desarrollo y proponen un interesante camino en el que poder desarrollar una carrera profesional, ya que son un tipo de tecnología que permite obtener electricidad minimizando el impacto medioambiental y a su vez favorecer la economía de los países y el desarrollo humano.

El interés por este campo ya se vio reflejado durante el desarrollo de su Trabajo de Fin de Grado, proyecto en el que quiso ampliar sus conocimientos sobre la energía solar y los concentradores solares caracterizando ópticamente un concentrador parabólico compuesto (CPC). El objetivo no fue solo entender su funcionamiento sino intentar ampliar su campo de trabajo, mejorar su eficiencia e incluso mejorar su diseño así como el de otros equipos de concentración solar de los que disponía la universidad. Este objetivo ha sido fuente de inspiración a la hora de elegir un Trabajo de Fin de Máster relacionado y es por ello que el TFM presenta ciertas similitudes con el TFG.

En este Trabajo de Fin de Máster se ha pretendido profundizar en un campo distinto a la concentración solar, que es la generación termoeléctrica y sus aplicaciones. Se ha aspirado a conocer las diferentes tecnologías que se encuentran en uso en la actualidad que emplean la

generación termoeléctrica, entender los conceptos en los que se basa su funcionamiento y poder desarrollar un prototipo funcional para entornos domésticos aislados con la ayuda de los directores.

Idealmente se pretende poder proporcionar a las zonas aisladas de la red eléctrica convencional de un equipo capaz de aprovechar los efectos termoeléctricos para suministrar una fuente fiable de energía eléctrica.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es poder construir un prototipo funcional en el laboratorio de la universidad que emplee la generación termoeléctrica para cubrir una necesidad básica o cotidiana en entornos domésticos aislados. Los diferentes frentes que se deberán afrontar para llevar a cabo este proyecto se describen a continuación:

- Estudio riguroso de las tecnologías que emplean la generación termoeléctrica y sus aplicaciones en la actualidad.
- Desarrollo teórico de una propuesta de prototipo.
- Construcción de un prototipo funcional en el laboratorio.
- Análisis de los resultados y comparación con otras tecnologías que se encuentren en uso.

Cabe mencionar que, independientemente de la utilidad final del prototipo que se llegue a construir, es importante estudiar y entender el efecto termoeléctrico, sus funcionalidades y posibles usos, tanto de manera teórica como empírica.

1.4. Estructura de este documento

La primera sección de este documento es una introducción al mismo, con una breve contextualización de la situación energética actual y una introducción a los desafíos de la generación eléctrica en zonas poco desarrolladas que puedan aprovechar la generación termoeléctrica.

En la segunda sección se desarrolla un marco teórico en el que se analizan los atributos de las tecnologías de generación termoeléctrica que se encuentran en el mercado, así como sus resultados y puntos de mejora que servirán de guía y foco de inspiración para el diseño del prototipo de este trabajo.

En la tercera sección se explican en detalle las tecnologías que se van utilizar, tanto como referencia, como directamente aplicadas en el desarrollo de este proyecto y el prototipo, siendo las células Seebeck las protagonistas y analizando sus posibles usos.

En la cuarta sección se explica la metodología de trabajo empleada para concebir la idea de un prototipo funcional y su futura construcción en el laboratorio. Se desarrollan los distintos montajes que se prepararon para realizar diversos estudios.

En la quinta sección se exponen el prototipo final y sus características. Se explican los cálculos y las consideraciones necesarias para poder deducir los parámetros del prototipo así como un breve estudio con una cámara termográfica del equipo y sus patas. Se estudia también si el prototipo alcanza los objetivos establecidos y si el proyecto alcanza los objetivos planteados al inicio.

En la sexta sección se expone la evaluación de costes relacionada con este proyecto así como del prototipo final como si se pretendiese comercializar.

En la séptima sección se hace un breve análisis del mercado en el que el prototipo podría competir y sus posibilidades de éxito.

La octava sección narra las conclusiones finales alcanzadas en este proyecto y se proponen trabajos futuros en relación con el proyecto y el tema en cuestión, la generación termoeléctrica.

En la novena sección se explica la relación de este proyecto con los objetivos de desarrollo sostenible.

En la décima sección se recogen los artículos y otras fuentes de información utilizadas para efectuar este proyecto.

2. Marco Teórico

2.1. Efectos termoelectricos

Se denomina efecto termoelectrico a aquel que relaciona un gradiente de temperatura con la generaci3n de un voltaje el6ctrico o viceversa. Este efecto se puede observar desde los dos puntos de vista. Por un lado, si ponemos en contacto dos elementos met6licos, conductores o semiconductores, en dos puntos cuyas temperaturas sean lo suficientemente diferentes, se generar6 una diferencia de potencial. Por otro lado, si forzamos la circulaci3n de una corriente el6ctrica a trav6s de estos dos metales, observaremos como en esta articulaci3n se produce una diferencia de temperatura [8].

Com6nmente se ha aprovechado este efecto para la generaci3n de electricidad o para enfriar o calentar elementos, concretamente aprovechando que se puede controlar la direcci3n del calentamiento o enfriamiento mediante el sentido de la corriente inducida, o lo que es lo mismo, el signo de la diferencia de potencial [8]. Los efectos Seebeck, Peltier y Thomson cubren los rangos de aplicaci3n del efecto termoelectrico, identific6ndose cada uno por separado.

2.1.1. Efecto Seebeck

El **efecto Seebeck** se descubri3 en 1821 cuando Thomas Seebeck, f6sico alem6n, se percat3 de que al unir los extremos expuestos de un par de cables de manera que formasen un bucle, expuestos inicialmente a temperaturas diferentes para su posterior uni3n, se generaba una diferencia de potencial [9]. Calentar uno de los elementos met6licos provocaba la excitaci3n de los electrones de valencia. Los electrones tienden a desplazarse a zonas de menor grado energ6tico, lo que se tradujo en su movimiento hacia el conductor m6s fr6o. Como resultado, surge una corriente continua a trav6s de los dos conductores hasta que se recupere de nuevo el equilibrio de temperaturas. Entre los aspectos claves que se descubrieron de este efecto cabe destacar los siguientes [9]:

- El voltaje resultante no es despreciable pero son valores muy reducidos. Se dedujeron aproximadamente unos pocos micro-voltios por cada unidad Kelvin de diferencia.
- Se requieren diferencias de temperatura elevadas para obtener un voltaje funcional.
- La uni3n de varios elementos conductores en serie tambi6n aumenta el voltaje obtenido.
- La uni3n de varios elementos conductores en paralelo resulta en un aumento del valor de la corriente el6ctrica obtenida en el circuito.

Thomas Seebeck utiliz3 cobre y bismuto como metales para su estudio, formando lo que hoy en d6a se conoce como un termopar. En la actualidad se utilizan metales como el hierro y el cobre, pero es m6s com6n el uso aleaciones consistentes principalmente de n6quel, como el Cromel/Alumel para crear termopares tipo K [10]; o aleaciones de cobre y n6quel como el Hierro/Constant6n para crear termopares tipo J [11]. El uso principal de los termopares es la

medida de la diferencia de temperatura, o bien su distribución en serie que forma una termopila, cuyo esquema se muestra en la Figura 4.

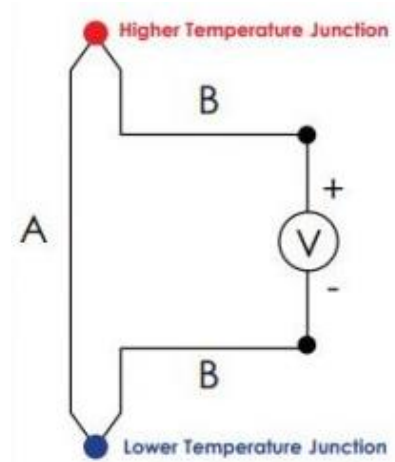


Figura 4: Termopar ejemplificando el efecto Seebeck [12]

Sin embargo, el efecto Seebeck abarca más campos de aplicación que los termopares [9]:

- Diseño de motores térmicos cuya generación de potencia se base en la termoelectricidad o generadores automotrices para vehículos.
- Aprovechamiento del calor residual emergente de centrales eléctricas.
- Análisis de propiedades degenerativas de materiales radiactivos que se ven alteradas por gradientes de temperatura.
- Aplicaciones eléctricas como interruptores.

Estudios recientes han descubierto otra propiedad relacionada con este efecto denominado Spin Seebeck Effect (SSE), en el que se estudia la influencia del magnetismo al efecto Seebeck. [9] [13]. Se ha llegado a demostrar que, mediante análisis termodinámicos que estudian el espín de los electrones-d de elementos ferromagnéticos o antiferroimanes, determinados compuestos consiguen que el espín contribuya de manera significativa al efecto Seebeck [13]. Dicha contribución proviene de la entropía generada por el espín de los electrones al transportarse que presentan considerables fluctuaciones térmicas. Esta propiedad podría dar lugar a nuevos elementos termoeléctricos magnéticos en un futuro.

2.1.2. Efecto Peltier

El **efecto Peltier** se asocia al trabajo de Jean Peltier, un relojero Francés que en 1834 observó que, con un montaje casi idéntico al que utilizó Thomas Seebeck, al hacer conducir una corriente eléctrica entre dos elementos conductores, el punto de unión entre ambos sufría un calentamiento o enfriamiento [9]. Sería más correcto decir que las extremidades de estos metales liberaban o absorbían calor, y este efecto no solo dependía del tipo de materiales que Jean Peltier utilizaba sino de la corriente que decidía aplicar.

Si bien los efectos Seebeck y Peltier son muy similares, con una configuración casi idéntica, siendo ambos reversibles y en numerosas ocasiones se identifican como el mismo efecto, se diferencian de la siguiente manera:

- Hablamos de efecto Seebeck cuando al provocar una diferencia de temperatura entre los extremos de un termopar, generamos una corriente eléctrica que fluye del foco caliente al foco frío.
- Hablamos de efecto Peltier cuando al provocar un flujo de corriente eléctrica entre dos terminales de diferentes elementos conductores, liberaremos calor en la unión si la corriente fluye del terminal negativo al positivo, o absorberemos calor si la corriente fluye del terminal positivo al negativo.

Para comparar la eficiencia de distintos materiales o termopares, se utilizan los coeficientes de Seebeck y Peltier, que vienen definidos en las siguientes ecuaciones.

Siendo A y B dos metales diferentes, V la diferencia de potencial eléctrico, T_2 la temperatura del foco caliente y T_1 la temperatura del foco frío, el coeficiente de Seebeck se define como [14]:

$$\alpha_{AB} = \frac{V}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Siendo A y B dos metales diferentes, Q la disipación o absorción de calor e I la corriente que circule entre los dos metales, el coeficiente de Peltier se define como [14]:

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad (2)$$

2.1.3. Efecto Thomson

William Thomson, físico y matemático británico que más tarde sería conocido como Lord Kelvin, descubrió en 1854 lo que actualmente se denomina como el **efecto Thomson** [15]. Este efecto tiene lugar al circular una corriente eléctrica entre los extremos de un único elemento conductor cuyas temperaturas sean diferentes. El coeficiente de Thomson describe la capacidad para absorber o disipar potencia térmica de este material.

Siendo Q la potencia térmica, T el gradiente de temperatura e I la corriente eléctrica, el coeficiente de Thomson se define como [16]:

$$\beta * I * \frac{dT}{dx} = \frac{dQ}{dx} \quad (3)$$

Estudiando las distintas ecuaciones, el físico británico dedujo lo que hoy en día se conoce como la primera relación de Thomson, que relaciona los coeficientes Seebeck y Peltier donde T es la temperatura en valor absoluto [16]:

$$\pi = T * \alpha \quad (4)$$

Esta primera relación no se cumpliría en todos los casos y depende de las propiedades del material en cuestión, debiendo tratarse siempre de procesos reversibles. La segunda relación de Thomson surge de una hipótesis del físico británico que considera que los tres efectos estudiados son en realidad uno solo y se pueden relacionar sus coeficientes de la siguiente manera [17]:

$$\frac{\beta}{T} = \frac{d^2V}{dT^2} \quad (5)$$

Esta segunda relación se modificó aplicando las ecuaciones (1) – (2) para obtener la siguiente ecuación:

$$\beta = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (6)$$

2.2. Aplicaciones en la industria

A continuación se muestran diversos ejemplos de aplicaciones de los efectos termoeléctricos en diferentes industrias, así como una breve recapitulación de las ideas clave que se pueden extraer de estos ejemplos.

2.2.1. Aprovechamiento de calores residuales

Numerosos fabricantes de vehículos, como Volkswagen o BMW, han buscado en la generación termoeléctrica una oportunidad para utilizar el gasto de calor en los motores de combustión que normalmente se desperdicia como fuente de energía [8]. Se estima que un 30% de la energía térmica generada en un proceso de combustión de un motor se pierde, y otro 30% se reutiliza en los procesos de refrigeración del motor [18]. En muchas compañías se llevan a cabo proyectos destinados a la reutilización o recuperación de esta energía térmica, como en el caso de BMW, que desarrolló proyectos como el TEG, que emplea un generador termoeléctrico, para aprovechar el elevado valor de la energía térmica desperdiciada que se muestra en la Figura 5.

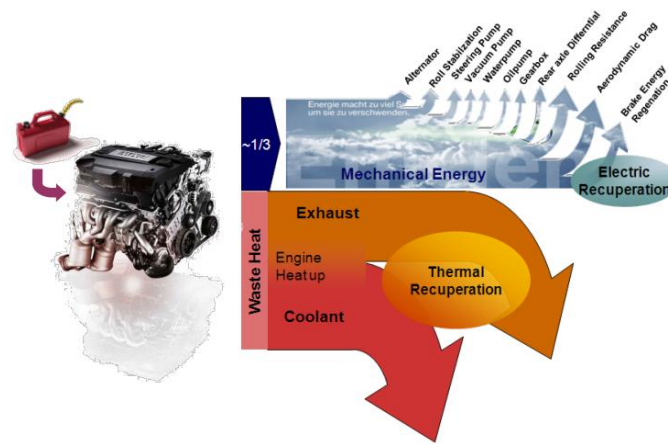


Figura 5: Desperdicio de energía térmica generada en motores de BMW en 2011 [19].
Aplicando los efectos termoeléctricos, el proyecto TEG aspiraba a utilizar los calores residuales que de otra manera se desperdiciarían para mejorar la eficiencia del motor a través del efecto Seebeck, mediante el cual se generaría un corriente eléctrica útil que se podría utilizar para recuperar potencia perdida. Se desarrollaron dos prototipos diferentes pero con el mismo objetivo, uno se ubicaría en el colector de escape y otro en el sistema de recirculación de gases de escape.



(a) (b)

Figura 6: (a) unidad ubicada en el colector, (b) unidad ubicada en el sistema de recirculación [18].

En 2008 los ingenieros de BMW optaron por introducir un generador termoeléctrico al sistema de escape y se consiguió obtener un voltaje de 200 V. En 2011, se consiguió reducir las dimensiones del TEG con una producción de 600 V y en la actualidad cada vez se obtienen valores más cercanos a los 1000 V, aunque no es gracias a este modelo [18]. En cuanto al consumo de combustible, gracias a la generación termoeléctrica se consiguió aumentar la conversión de 0,4 litros por 100 km a potencia mecánica, a 0,6 litros por 100 km por conversión a potencia eléctrica [19]. En la Figura 7 se muestra la evolución del proyecto TEG a lo largo de los años:

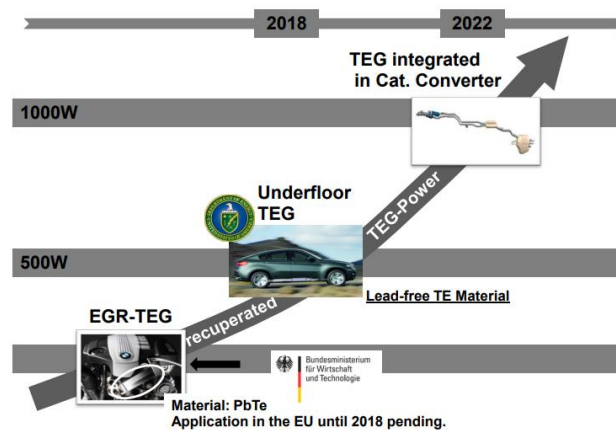


Figura 7: Potencia eléctrica obtenida mediante la generación termoeléctrica a lo largo de los años [19].

Para los modelos que se fabricaron se diseñaron unidades que requerían una gran cantidad de agua y un intercambiador de calor para mantener uno de los extremos del generador termoeléctrico a una temperatura lo suficientemente reducida y obtener el gradiente de temperatura requerido. Este problema con la refrigeración será recurrente en los diseños que emplean la generación termoeléctrica, debido a que no se puede elevar la temperatura por encima de un límite sin dañar el resto de componentes de la unidad. En el caso de estas unidades de BMW, se requería además una válvula de derivación, lo que aumentaba los costes ya que era un módulo aparte.

Con el objetivo de superar estos obstáculos, BMW optó por introducir el TEG en el sistema de recirculación de los gases de escape, en el radiador en la parte baja del coche. De esta manera ya se incluía una válvula de derivación, la del propio sistema de recirculación, pero lo más importante es que se aprovechaba el agua fría del sistema de refrigeración, que forma parte del propio sistema de recirculación. Además, se obtenía valor añadido proveniente de una mayor reducción en las emisiones de CO₂ y ahorro de combustible. El inconveniente de implementar esta alternativa es que la conversión a potencia eléctrica se vería reducida dado que existen más límites a la hora de manipular el gradiente de temperatura en el generador termoeléctrico, puesto que se utiliza el agua del sistema de refrigeración [19]. Sin embargo, dadas las modificaciones en el diseño del sistema de recirculación de los gases de escape de sus vehículos, se descubrió que este sistema sería capaz de obtener los valores más elevados de conversión a energía eléctrica, alcanzando los 1000 V.

Este sistema se hizo popular porque, a diferencia de los sistemas de regeneración energética que obtienen la energía mediante las fuerzas de frenado, el TEG alcanza sus valores más elevados de conversión energética en las etapas de aceleración del coche. Como conclusión, se llegó a desarrollar un sistema capaz de aprovechar los calores residuales para generar energía eléctrica más atractivo para el usuario, que además redujo las emisiones producidas en la conducción y el consumo de combustible.

2.2.2. Generadores termoelectricos radioisotopicos en el espacio

Los generadores termoelectricos radioisotopicos, denominados en inglés como RTGs, fueron diseñados por la NASA a modo de alternativa sobre los paneles solares para aquellos viajes al espacio en los que la producción energética fotovoltaica no fuese adecuada. Para algunas misiones que tuvieron lugar entre 1970 y 1980, se desarrolló un equipo denominado GPHS-RTG, un generador que actuaría como fuente de calor para uso general de donde deriva su nombre en inglés. Posteriores estudios sobre los materiales más adecuados para la generación termoelectrica demostraron que este modelo estaba obsoleto y se desarrolló a principios del siglo XXI el modelo MMRTG, generador multi-misión, utilizado en la actualidad y que se muestra en la Figura 8 [20]. Sin embargo, la mayoría de proyectos que emplearon esta tecnología utilizaron los GPHS-RTG.



Figura 8: Generador Termoeléctrico Radioisotópico Multi-misión (MMRTG) [21].

El motivo principal por el que se optó por utilizar estos modelos en lugar de paneles fotovoltaicos no fue solo su reducido volumen y peso, sino una mayor generación de energía. A diferencia de la generación fotovoltaica, los RTGs aprovechaban el calor generado por la radiación que emitía el plutonio-238. Esta desintegración ocurre de manera natural en el combustible que se utilizaba para las misiones, provocando una radiación emitida que se traducía en una elevada temperatura en el combustible. Para aprovechar los efectos termoelectricos, se emplearía como foco caliente el combustible del vehículo, y como foco frío el espacio exterior. Se colocaron termopares en las superficies de los vehículos capaces de generar una corriente eléctrica mediante el efecto Seebeck como se observa en la figura 9 [22].

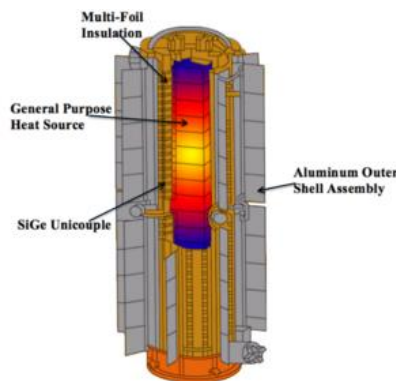


Figura 9: Componentes de un RTG [23].

Una de los componentes más interesantes de estos RTGs es su GPHS, el módulo encargado de la generación de calor. En este trabajo no se considerará el uso de fuentes de calor radioactivas, pero muestra como el abanico de campos de aplicación de la generación termoeléctrica es muy amplio. Los GPHS encapsulan el combustible en esferificaciones cerámicas de plutonio-238, que emiten calor de manera continua por radiación. Estas esferas se encuentran protegidas por numerosas capas de materiales como iridio o carbono capaces de soportar la radiación [22]. Cabe destacar que estos módulos suelen tener dimensiones de 10x5 cm, con un peso que no alcanza los 2 kg, y son capaces de producir entre 200 y 300 W de potencia [24].



Figura 10: Esfera de combustible de Pu-238 encapsulada y protegida

Un ejemplo de sonda espacial en la que se utilizaron los RTGs fue la sonda Huygens, en la aeronave Cassini. Para esta misión se utilizaron 3 GPHS-RTGs, cuyo propósito fue el de suministrar energía eléctrica a la mayoría de la instrumentación científica utilizada para la investigación en la nave. Para asegurar una temperatura lo suficientemente elevada en el foco caliente del sistema de generación termoeléctrica, se utilizaron además unidades calentadoras de radioisótopos (RHU). Estas se localizaban en la nave de manera que suministraban una potencia térmica de en torno a 1 V mediante procesos de combustión de pastillas de PuO_2 [22]. 82 se utilizaron para la aeronave y 35 para la sonda.

A este tipo de aplicación de tecnologías de generación termoeléctrica se les suele denominar “baterías nucleares”, pero ni los RTGs se asimilan a los reactores de centrales nucleares, ni el combustible es el mismo que se utiliza para la creación de armas, por lo que se considera una tecnología segura.

2.2.3. Refrigeración de cámaras

Debido a la pandemia del Covid-19, las cámaras térmicas experimentaron un incremento en su popularidad dada la necesidad de medir la temperatura corporal de las personas. Estas cámaras presentan una temperatura óptima de trabajo que se mantiene gracias al uso de refrigeradores. Entre los refrigeradores más utilizados destacaron los que utilizaban los efectos termoeléctricos, debido a que presentan unas características ideales de volumen y resistencia a altas temperaturas [25].

Su uso no solo se limita a cámaras térmicas. Las cámaras de seguridad de exteriores también requieren sistemas capaces de mantener la temperatura óptima de trabajo. Lo mismo ocurre con las cámaras de seguridad diseñadas para trabajar por la noche que emplean visión infrarroja, es decir, radiación y generación de calor. Adicionalmente, algunas cámaras también cuentan con detectores que requieren una mayor refrigeración para incrementar su rango de captura y rendimiento a la hora de detectar el calor en el entorno. Por consiguiente, se puede identificar un claro campo de aplicación para la generación termoelectrica.

Encontramos cámaras en el mercado del tipo CCTV o IP cuya temperatura óptima operación ronda los 50 °C y su rendimiento se ve afectado por incrementos de temperatura. Las cámaras de seguridad en exteriores se ven forzadas a soportar valores aún mayores, y las cámaras de visión infrarroja no pueden operar si se supera su temperatura óptima. Por lo tanto, la refrigeración de las cámaras y sus sensores es fundamental para su correcto funcionamiento.

Sin embargo, nos encontramos con numerosos obstáculos a la hora de intentar afrontar este problema. Las cámaras son muy sensibles al ruido relacionado con el calor, la refrigeración debe ser rápida y la tendencia a reducir cada vez más el tamaño de las cámaras y sus componentes dificulta el diseño de componentes refrigerantes. Un espacio reducido se traduce en menos flujo de aire y mayor concentración de calor, es por ello que diseños tradicionales que empleaban grandes ventiladores dejaron de ser plausibles dado su tamaño y las limitaciones respecto al caudal de aire que puede circular en el recinto.

Una de las soluciones empleadas para solventar este problema fue el uso de refrigeradores termoelectricos, capaces de alcanzar gradientes de temperaturas cercanos a los 30 °C con respecto a su foco caliente, junto con disipadores de calor pasivos y pequeños ventiladores que distribuyen el calor generado al exterior. Sin embargo, estos sistemas requerían un elevado coeficiente de rendimiento para su correcto funcionamiento. Además, para casos extremos de temperaturas demasiado elevadas, los elementos encargados de la soldadura del dispositivo refrigerante se fundirían, impidiendo su uso [25]. En la Figura 11 se expone un ejemplo:

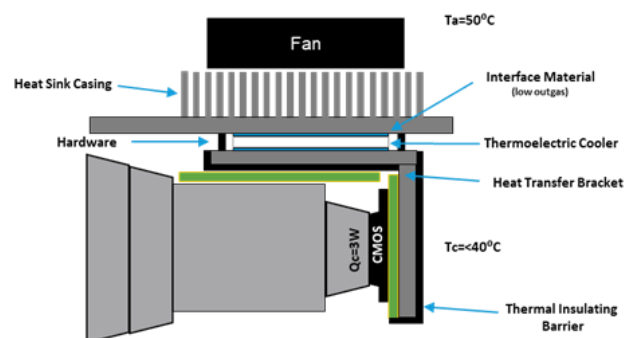


Figura 11: Componentes de un sistema de refrigeración tradicional para cámaras [25].

El sistema consta de varios componentes. Encontramos células Peltier en contacto con los disipadores de calor y/o ventiladores en un extremo, y en contacto con la superficie a enfriar por el otro. Además se requieren materiales aislantes para reducir pérdidas de calor y alcanzar un coeficiente de rendimiento elevado. Para la mayoría de cámaras, un gradiente de temperaturas de 30 °C es suficiente para permitir que los componentes alcancen temperaturas óptimas de trabajo.

El estudio de mejores materiales para los dispositivos termoelectricos a lo largo de los años resultó en un producto final más adecuado para el trabajo en altas temperaturas. Existen modelos de refrigerantes termoelectricos como los HiTemp ETX capaces de soportar temperaturas extremas de hasta 150 °C y conseguir gradientes de temperatura que alcancen hasta los 80 °C [25].

Analizando la refrigeración para cámaras se pueden obtener algunas limitaciones de los sistemas de refrigeración termoelectrica para este campo pero que se pueden aplicar a otros:

- Dichos dispositivos termoelectricos no se limitan únicamente a disipar calor, también lo generan, por lo que se requieren disipadores de calor de alto rendimiento que trabajen en conjunto.
- Se evitó utilizar intercambiadores de calor líquidos para las cámaras ya que incrementan los costes y requieren un espacio de trabajo mayor. Se debe tener en cuenta la protección de dichos intercambiadores para evitar pérdidas de líquido refrigerante.
- Para elementos completamente aislados del exterior, como cámaras expuestas a agua u otros líquidos, es imperativo el uso de disipadores de calor del tipo de placas frías o tuberías de transporte de calor, debido a la imposibilidad de conducción directa de calor por flujo de aire a través de los elementos más sensibles.
- Se debe evitar reducir la temperatura en exceso, ya que por debajo de la temperatura de rocío la condensación puede dañar los componentes. En el caso de las cámaras también se debe considerar como imperativo evitar la desgasificación, ya que afectará a las lentes.

2.2.4. Termocicladores para estudios biológicos

En el campo de la biología molecular existen unos dispositivos conocidos como termocicladores encargados de llevar a cabo una reacción denominada PCR, o reacción en cadena de la polimerasa. En esta reacción se parte de una secuencia de ácidos nucleicos de la que se requieren varias copias. Los termocicladores, o máquinas de PCR, son capaces de duplicar dicha secuencia hasta obtener millones a partir de una secuencia inicial mediante el control de la temperatura en el proceso cíclico de amplificación. Lo consiguen a través del intercambio de calor entre los elementos metálicos que los componen, normalmente bloques [26].

La tecnología necesaria para el proceso de PCR surgió en 1980, donde el proceso de amplificación del ADN se llevaba a cabo manualmente. Las secuencias de ácidos nucleicos eran sometidas a los procesos de desnaturalización de las proteínas, el recocido y su extensión varias veces. Se

sumergían las secuencias en agua a diferente temperatura en cada repetición para conseguirlo. El proceso era más costoso y llevaba más tiempo dado que en aquella época no era fácil obtener un enzima termoestable, la ADN polimerasa, que debía de ser repuesta en cada repetición. El primer diseño de los termocicladores aspiraba a poder combinar todo el proceso en una sola máquina, conocida como “Mr. Cycle” [27].

En 1987 se lanzaron al mercado los primeros diseños de termocicladores que permitían manipular el calentamiento de las secuencias a través de bloques metálicos, y en 1988 se utilizaron las primeras enzimas termoestables. En apenas 10 años, los termocicladores supusieron un inmenso avance para la biología molecular. En la Figura 12 se muestra un ejemplo:



Figura 12: TC1 DNA, Termociclador comercial de bloques metálicos [26].

Inicialmente, el sistema de refrigeración empleaba compresores de plomo que eran robustos, pesados y ocupaban mucho espacio. Sin embargo, las células Peltier permitieron formar bloques en los que se podía calentar además de enfriar rápidamente, en torno a los 5 °C/segundo, gracias a que se podía elegir el sentido de circulación de la corriente eléctrica. También se utilizan cubiertas precalentadas para que, al igual que en el caso de las cámaras de seguridad, se eviten los fenómenos de condensación o desgasificación. Fenómenos que en el pasado se evitaban utilizando aceite mineral en procesos más laboriosos y que resultaban en pérdidas de la muestra de trabajo [26]. En la Figura 13 se muestran los bloques de células Peltier:

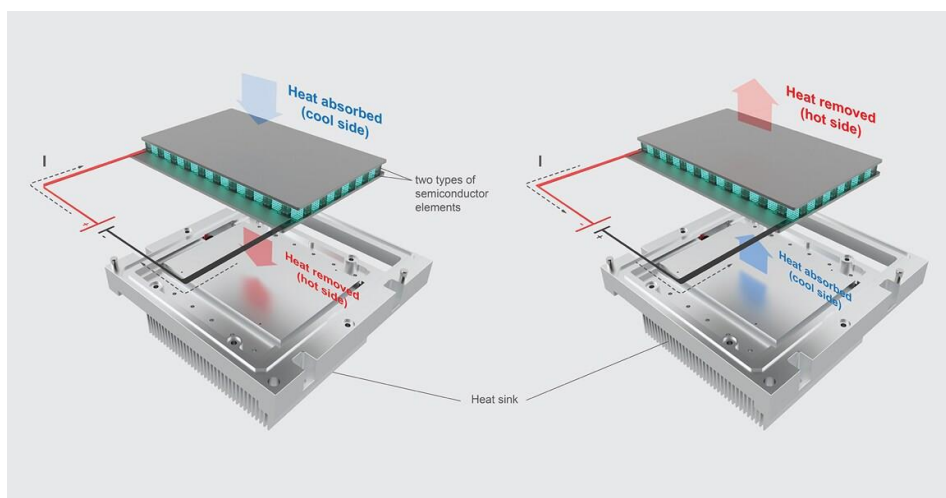


Figura 13: Bloques de células Peltier utilizados en los termocicladores [26].

La elección de utilizar bloques de células Peltier no fue arbitraria. Los bloques fueron diseñados para ser intercambiables desde un principio, ya que se tenía en mente la automatización de todo el proceso de PCR. Adicionalmente, para mejorar las etapas de recocido, la modularidad de los bloques permitió que se optimizase el proceso mediante el uso de varios bloques separados en lugar de uno único que ocuparían el mismo volumen, lo que provee al sistema de una mayor precisión a la hora de controlar la temperatura del sistema y que se traduce en ciclos de menor duración.

Las mejoras en los bloques Peltier han marcado la evolución de estas máquinas de PCR. Los avances en los estudios de los materiales que componen estos bloques han conseguido reducir la duración de los ciclos desde las 2 horas a aproximadamente 40 minutos en la actualidad así como unos mejores rendimientos de calentamiento. No se debe de olvidar que, al igual que con toda máquina, el desarrollo de mejores sistemas de programación y protocolos para PCR también han apoyado la mejora de rendimiento de los termocicladores [26].

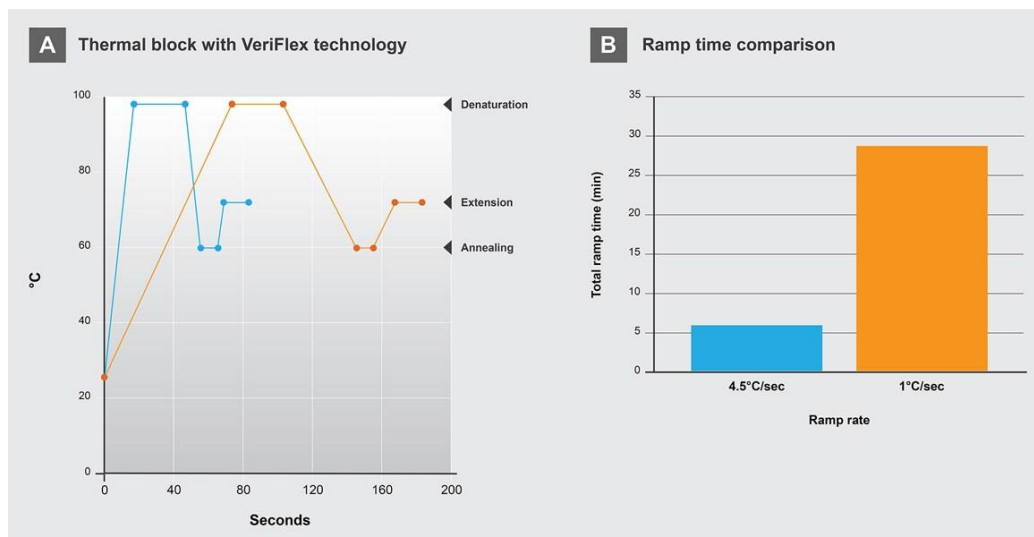


Figura 14: Ejemplificación de las mejoras obtenidas mediante los avances de los bloques Peltier [26].

2.3. Generar electricidad a partir de fuentes renovables

Con los conflictos mundiales que han sucedido en las últimas décadas, como la guerra en Ucrania o las nevadas por la borrasca Filomena; la volatilidad de los precios de la energía y la preocupación de la población por un suministro irregular de energía se han distinguido entre otros problemas a nivel nacional. La solución principal conocida por todos es la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes renovables que, aunque la electricidad generada por energías renovables sea más difícil de almacenar y distribuir que los combustibles fósiles, suponen una fuente fiable de suministro capaz de reducir los costes y el impacto que tenemos sobre el cambio climático [28].

La generación termoeléctrica también busca aprovechar estas fuentes renovables. En la Universidad de Valencia se ha investigado la incineración de madera, proceso típico de la industria papelera y se ha descubierto un uso para uno de sus subproductos, la lignina. A partir de este compuesto y una reestructuración molecular se pueden desarrollar hidrogeles con unas características ideales para la generación termoeléctrica, tales como elevados valores de conductividad térmica e iónica o un alto coeficiente de Seebeck [29].

La lignina, que anteriormente era desechada, presenta numerosos compuesto fenólicos ideales para la conducción de energía, con un alto grado de absorción de electrolitos en comparación con los materiales más típicos. En diversos artículos se discuten estos estudios y como han empleado la madera y sus residuos para construir artefactos capaces de suministrar potencia eléctrica a sensores de alarmas e incluso dispositivos móviles [30]. Esto abre la oportunidad de explotar la generación termoeléctrica a partir de desechos orgánicos u otras fuentes renovables.

2.4. Biomasa

También se está estudiando la compatibilidad entre la biomasa y la generación termoeléctrica, si bien aún no se han llevado a cabo proyectos que empleen generadores termoeléctricos directamente utilizando combustible de biomasa. Un estudio realizado por Manuel Pelegrina, estudiante de la Universitat Politècnica de Catalunya [31], demuestra la viabilidad de implantar una central termoeléctrica en una comarca en la provincia de Lérida alimentada únicamente por biomasa procedente de los bosques como combustible principal. Sin embargo, este estudio basa el funcionamiento de su central en un ciclo Rankine y no utiliza generadores termoeléctricos, pero valida la biomasa como una fuente renovable. Un trabajo que desarrolla mucho más en profundidad la validez de la biomasa como fuente renovable es el trabajo de fin de carrera de Roberto Martínez [32], que alcanza las mismas conclusiones y que, a pesar de desarrollar una central termoeléctrica mucho más en detalle, solo menciona el posible uso de generadores termoeléctricos como tecnología para aprovechar la biomasa sin entrar en detalle.

El proyecto de Arborea dirigido por Greenfluidcs se caracteriza por utilizar biopaneles capaces de generar electricidad, absorber dióxido de carbono y suministrar combustible de biomasa [33]. Dentro de estos paneles hay agua con microalgas, encargadas de hacer la fotosíntesis y crecer para crear más biomasa. Con resultado, se genera calor y más combustible que se puede recircular. Además, se está estudiando aprovechar el calor generado para generar electricidad a partir de las tecnologías termoeléctricas. Se ha planteado mejorar la eficiencia de la captación de calor mediante nanofluidos para convertirlo en electricidad mediante generadores termoeléctricos. Este tipo de paneles tan similares a los solares podrían convertirse en competencia directa ya que se utilizan de igual manera en los edificios. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de configuración para estos paneles:

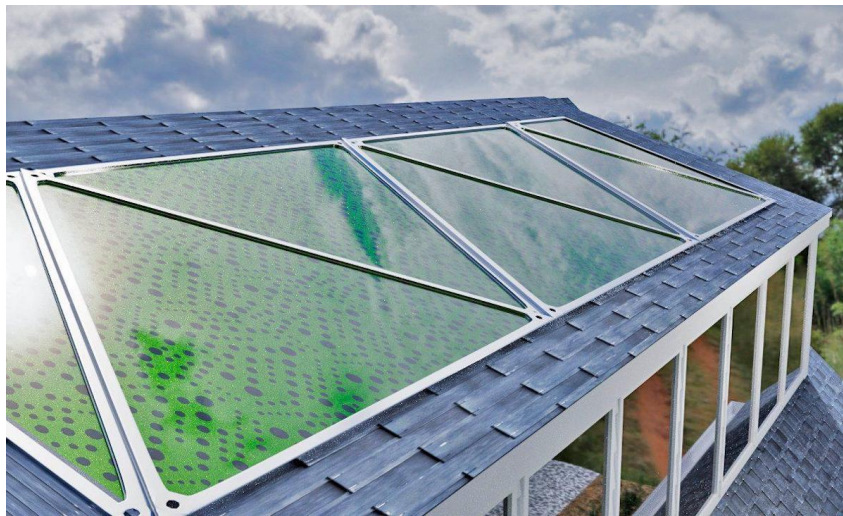


Figura 15: Biopaneles de Greenfluidcs [33].

3. Descripción de las Tecnologías

3.1. Generadores termoelectricos

3.1.1. Células Seebeck

Los generadores termoelectricos, denominados comúnmente como TEG, son dispositivos semiconductores que aprovechan el efecto Seebeck para convertir un diferencial de temperatura en una diferencia de voltaje, lo que provoca la circulación de corriente eléctrica continua. Si el funcionamiento del dispositivo utiliza el efecto Peltier, en lugar de utilizar el efecto Seebeck, entonces hablamos de refrigeradores termoelectricos o TEC. Estos dispositivos responden a efectos distintos, pero pueden verse como “inversos”. Además, los materiales que conforman muchas de sus uniones están preparados para soportar distintos rangos de temperatura. Las células Peltier suelen estar diseñadas para temperaturas no muy elevadas, mientras que las células Seebeck están preparadas para altas temperaturas, lo que resulta en unos costes más elevados. Los TEG tienen como propósito alcanzar la producción de energía eléctrica, los TEC aspiran a la gestión de temperatura en elementos o habitaciones [34].

Los TEG están constituidos por termopares, cuyo funcionamiento se basa en la unión a través de un elemento metálico de otros dos elementos semiconductores también denominados termoelementos, uno tipo p y otro tipo n, que permiten el flujo eléctrico. Los termoelementos dopados tipo n se caracterizan porque sus electrones son los portadores de carga, mientras que en los tipo p lo son los “espacios vacíos” entre ellos. Estos elementos cargados tienden a alejarse del foco caliente, a causa de su excitación, que incrementa su energía interna lo suficiente como para superar la energía de valencia y dar el salto desde una capa de valencia a otra, liberándose como resultado. Finalmente, los elementos cargados acaban acumulándose en el foco opuesto, lo que genera una diferencia de potencial, como se observa en la Figura 16.

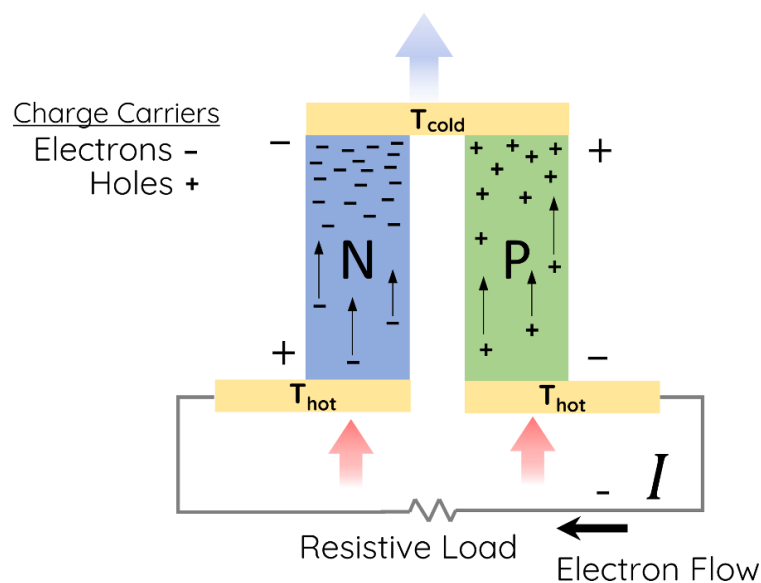


Figura 16: Movimiento de electrones en un generador termoelectrico [34].

Los elementos básicos que conforman un TEG son dos: los termopares y las cubiertas cerámicas. Las cubiertas cerámicas, que albergarán en su interior un elevado número de termopares, limitan la flexibilidad de la estructura para dotarla de rigidez, suelen ser planas y poseen un carácter dieléctrico, es decir, aíslan los componentes eléctricos actuando a modo de capacitor [34]. En la Figura 17 se muestra una célula termoeléctrica por su interior:

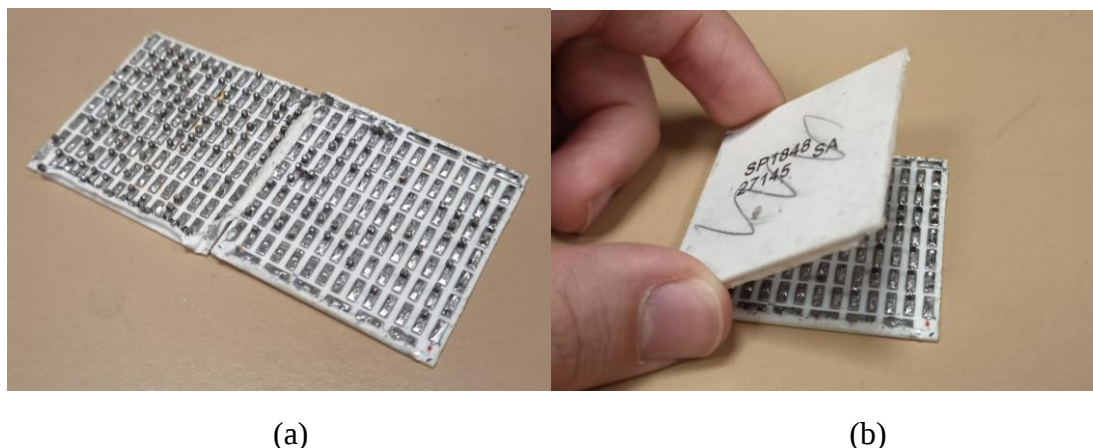


Figura 17: (a) Termopares en el interior de una célula abierta en el laboratorio, (b) cubiertas cerámicas albergando los termopares.

Estudios han estimado que con diferencias de temperatura de 250 °C se pueden llegar a alcanzar 20 W de potencia. El motivo por el que se estudian diferencias de temperatura tan elevadas es por la reducida eficiencia de estos sistemas, que no supera un 7,5 %. Se debe tener en cuenta que el foco frío recibe aproximadamente un 92,5 % del calor emitido por el foco caliente, o dicho de otra manera, de 100 W de potencia térmica empleados en el sistema, como máximo 7,5 consiguen convertirse en energía eléctrica. Es por este motivo que asegurar un enfriamiento en el foco frío es fundamental y el principal reto de los generadores termoeléctricos [35].

3.1.2. Materiales

Los materiales que se emplearan para el diseño de los generadores dependen de varios factores como son las temperaturas de trabajo, el foco al que va a estar expuesto o la disposición del diseño (horizontal, vertical o mixta) [36]. Entre los más comunes destaca el telururo de bismuto Bi_2Te_3 , utilizado por ejemplo en los sistemas de aprovechamiento de calor de los motores de BMW [18].

Si estudiamos el efecto Seebeck podemos deducir que un material termoeléctrico eficiente debe poseer un elevado coeficiente de Seebeck, pero además una reducida conductividad térmica y una elevada conductividad eléctrica. Aunque se han hecho estudios sobre varios tipos de materiales, los más usados en la industria que cumplen con estas características son los semiconductores. Los metales son buenos conductores tanto de electricidad como calor, por ello resultan en coeficientes de Seebeck reducidos e inadecuados para aplicaciones termoeléctricas. Los materiales cerámicos

presentan las propiedades opuestas, con alta resistividad eléctrica y térmica y altos coeficientes de Seebeck, y se utilizan en determinadas aplicaciones [37].

Existen diversas tecnologías y materiales base que se emplean en el proceso de fabricación:

- El silicio se utiliza para la fabricación de elementos de reducidas dimensiones. Los semiconductores de los termopares pueden estar compuestos por materiales compatibles con la fabricación estándar de dispositivos semiconductores (CMOS), como el silicio germanio policristalino *poli-SiGe*, o no compatibles como la aleación de telurio de antimonio y bismuto *Bi-Sb-Te* [36].
- El aluminio y la cerámica cocida a baja temperatura (LTCC) se utilizan ya que se pueden apilar en capas, presentan un bajo coste y alta resistencia a las diferencias de temperatura. Para capas gruesas se pueden utilizar masas de plata, paladio, aluminio, níquel o platino. Para capas finas se pueden utilizar masas de germanio o aleaciones de nitrato con aluminio *AlN* o galio *GaN*. Los materiales cerámicos presentan ciertas ventajas, como elevados coeficientes de Seebeck y reducida conductividad eléctrica y térmica, lo que permite obtener diferenciales de temperatura más amplios. Es por ello que su uso principal reside en las cubiertas o placas que cubren los termopares [36].
- Los polímeros se utilizan para elementos que requieran flexibilidad, utilizándose por ejemplo la poliimida o masas de fibras de celulosa, y pueden trabajar en una amplia gama de temperaturas.

Los telurios de bismuto dopados n o p son los más utilizados para bajas temperaturas (< 400 K) ya que presentan un compromiso válido con la eficiencia que proveen. En temperaturas más elevadas (< 700 K) se utilizan compuestos del telurio de bismuto dopado p como Tl_9BiTe_6 , y para las temperaturas extremas (> 700 K) se utilizan otros compuestos como el telurio de plomo $PbTe$ y el silicio germanio $SiGe$. Sin embargo los precios para fabricar estos materiales son muy elevados, y conforme más temperatura se quiere soportar, más costosos resultan. Este es uno de los principales impedimentos a la hora de desarrollar la tecnología termoeléctrica [36].

3.1.3. ¿Por qué usar generadores termoeléctricos?

Los generadores termoeléctricos presentan numerosas ventajas que justifican su estudio y aplicación en diversos campos y suponen un sustituto de tecnologías de conversión energética existentes en determinados casos.

Los componentes de los generadores termoeléctricos son, o están compuestos por, elementos sólidos que no requieren movimiento para su funcionamiento, reduciendo enormemente su deterioro y aumentando su vida útil. Un ejemplo de ello son las sondas espaciales, cuyos generadores siguen en funcionamiento tras casi 50 años de uso [22].

El diseño de los TEG les dota de muchas facilidades. Les permite alcanzar distintos niveles de potencia eléctrica dada su escalabilidad y se pueden llegar a desarrollar generadores de dimensiones muy reducidas. Están diseñados para poder hacer montajes con otros elementos termoelectrónicos, capaces de soportar elevadas o nulas fuerzas G y en cualquier orientación [36].

También se pueden considerar una tecnología renovable, que evita tanto la contaminación acústica como la atmosférica al no emitir gases de efecto invernadero. Esto se debe a otra de sus principales ventajas: la variedad de recursos que se pueden utilizar como combustible es muy extensa [35]. Por último, a diferencia de otras tecnologías, los generadores termoelectrónicos proponen un método de conversión directa de energía sin procesos intermedios, como ocurre en las centrales térmicas que primero requieren una conversión a energía mecánica por medio de turbinas [34].

3.2. Prototipos termoelectrónicos existentes

En la actualidad existen empresas que están desarrollando prototipos que empleen la generación termoelectrónica enfocada a zonas poco desarrolladas. Es conveniente estudiar las ideas y las metodologías de funcionamiento de estos prototipos para que puedan servir como guía.

3.2.1. Generación eléctrica a partir de energía geotérmica

En el 2020 se instaló un prototipo en el Parque Nacional de Timanfaya. Desarrollado por investigadores de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), el prototipo propuso la conversión en energía eléctrica de la energía térmica volcánica de la zona. El dispositivo consistiría en varios intercambiadores de calor con cambio de fase que recibirían el flujo de calor geotérmico generado por el carácter volcánico del terreno. El calor sería distribuido a los dispositivos termoelectrónicos del prototipo que, aplicando el efecto Seebeck, estarían formados por elementos metálicos semiconductores unidos a través de los cuales circularía la corriente eléctrica que surge del gradiente de temperatura [38]. Véase el prototipo instalado en la Figura 18:



Figura 18: Generador termoelectrónico ubicado en el Parque Nacional de Timanfaya [38]. El prototipo fue diseñado para no requerir mantenimiento, de manera que trabaja automáticamente sin generar ruidos ni ocupar demasiado espacio y sin contaminar el entorno. Este prototipo se

aprovecha de piscinas de lava que se encuentran sumergidas bajo la tierra, provocadas por erupciones volcánicas de años anteriores, y que, al no alcanzar la superficie, aún se encuentran a elevadas temperaturas. Sin embargo, al estar próximas a la superficie, se encuentran en un proceso continuo de refrigeración. El dispositivo se instaló encima de una de estas piscinas de lava cuya temperatura alcanzaba los 170 °C en aquel momento, a una diferencia de cota de 2 metros aproximadamente, y fue capaz de generar 35 W de potencia [38].

3.2.2. Estufas de biomasa

Los modelos TEG-BS de Thermanamic consisten en estufas de biomasa con diferentes características [39] [40] [41]. Primeramente, se emplea biomasa como combustible, ya sea madera o abono natural, para ahorrar en costes y contaminación pero también para mejorar la eficiencia de la reacción de combustión en la estufa, reduciendo la generación de humo a través de la ventilación natural. La estufa incluye un generador termoeléctrico destinado a aprovechar el calor generado por la estufa para obtener 5 W de potencia eléctrica, capaces de dar luz durante el cocinado y cargar baterías como las de los dispositivos móviles. El ventilador que incluye el prototipo estará alimentado por un generador individual y su propósito es el de mantener una temperatura reducida en el foco frío del generador termoeléctrico. Respecto a las características más técnicas:

- El generador termoeléctrico cuenta con una salida USB de corriente directa de 5 Voltios para alimentar dispositivos móviles.
- Dos de los modelos pueden generar un diferencial de temperatura en 3 litros de agua de 70 °C en 15 minutos empleando 350 gramos de biomasa [39] [40].
- Uno de los modelos es capaz de suministrar 10 W de potencia si la reacción de combustión alcanza como mínimo los 8 minutos de duración [39].
- El modelo restante también es capaz de suministrar 10 W de potencia eléctrica, pero destaca principalmente por provocar un diferencial de temperatura en 2 litros de agua de 80 °C en menos de 15 minutos empleando 250 gramos de combustible natural. Es decir, requiere menos tiempo y menos combustible que los modelos anteriores [41].
- Para usar estos modelos, se debe introducir combustible por la parte superior de la unidad de manera continuada. No se debe introducir todo el combustible de golpe ya que dificultará la reacción de combustión. Contienen una válvula de aire que controla la entrada de aire por unos agujeros que se encuentran en la parte inferior de la unidad. El ventilador con generador propio se accionará transcurridos 2 o 3 minutos, lo que quiere decir que la generación termoeléctrica no ocurrirá hasta entonces, ya que el ventilador provocará la diferencia de temperatura en los dispositivos termoeléctricos y estos generarán electricidad.

- Para obtener la corriente eléctrica suficiente para proporcionar iluminación, la reacción de combustión debe alcanzar 5 minutos mínimos de duración.
- Se alcanzan temperaturas muy elevadas durante la reacción de combustión, por lo que no se debe entrar en contacto con la superficie del equipo durante el cocinado.

Estos modelos pesan entre los 4 y 6 kg, un peso que cualquier persona puede levantar, ya que están diseñados para poder ser transportados y ninguno supera los 450 °C de temperatura en el foco caliente del generador. Su uso principal no es únicamente cocinar al aire libre, sino proporcionar una herramienta para generar electricidad mientras se cocina en aquellas zonas que no tengan fácil acceso a la red eléctrica. En las Figuras 19 y 20 se muestran los modelos:



Figura 19: Modelos de estufas de biomasa que requieren 350 gramos de combustible [39] [40].



Figura 20: Modelo de estufa de biomasa que requiere 250 gramos de combustible [41].

3.2.3. Generador con sistema de concentración solar

Una idea muy buena desarrollada por un grupo de estudiantes del Instituto Politécnico Nacional en México consistió en aprovechar las tecnologías de concentración solar, que pueden alcanzar temperaturas muy elevadas con el tiempo, junto con la generación termoeléctrica para desarrollar un equipo capaz de producir energía eléctrica [42].

Para llevar a cabo este proyecto realizaron un breve estudio sobre las tecnologías de generación termoeléctrica, en concreto de los generadores termoeléctricos que empleaban el efecto Seebeck; y los distintos tipos de concentradores solares y su capacidad para concentrar el calor en un elemento. Debido a que el objetivo era combinar ambas tecnologías, tuvieron en cuenta que las células Seebeck son de reducido tamaño mientras que los concentradores de calor son usualmente voluminosos. Consiguieron casar una idea que implicaba el uso de un concentrador de disco parabólico. Este tipo de concentrador permite aumentar la temperatura en el foco de su disco, es decir, un punto en concreto. En la realidad este punto está representado por una zona cuya amplitud depende de la disposición de los espejos del disco. En el foco del concentrador debían de construir un generador termoeléctrico.

El prototipo desarrollado era de reducida dimensión debido a las limitaciones que explican los autores del proyecto. El generador termoeléctrico utilizaba un módulo TEG, que consistía en una célula Seebeck. En aplicaciones industriales, estos módulos se cubren de material cerámico para evitar que las temperaturas límites en las caras de módulo dañen sus componentes o soldaduras, pero no fue el caso de este prototipo. En la cara caliente se colocó un receptor térmico aleteado de aluminio, pintado además de negro para aumentar la absorción de calor. En la cara fría se colocó un disipador térmico de aluminio con tubos de cobre en su interior cuya función es conducir la temperatura. A este disipador se le añadió un ventilador para facilitar el enfriamiento que sería alimentado por la propia célula Seebeck.

También fue necesario un soporte para el disco parabólico capaz de rotar 360° ya que el concentrador necesita recibir la mayor radiación directa del sol posible y para ello poder girar junto con la estrella. En la Figura 21 se muestra el montaje de este prototipo:

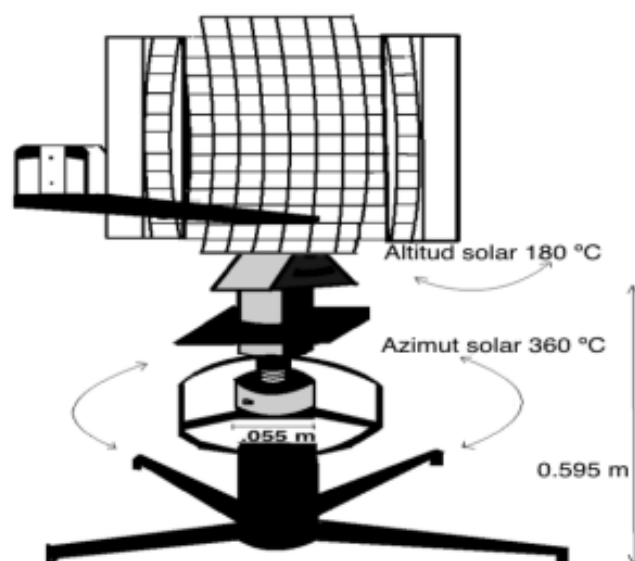


Figura 21: Montaje final del prototipo [42].

De este prototipo se pueden sacar distintos aprendizajes:

- Los elementos fundamentales de cualquier sistema de generación termoeléctrica se pueden dividir en 3: una fuente de generación de calor, un disipador de calor y el propio dispositivo termoeléctrico.
- No es necesario utilizar elementos analógicos complejos para construir un prototipo de generador termoeléctrico funcional.
- Los rangos de temperatura de este trabajo estuvieron entre 20 y 140 °C, temperaturas sencillas de obtener y que no suponen un riesgo.
- Con un gradiente máximo de aproximadamente 120 °C, se consiguieron producir 700 mA de corriente eléctrica, y 2,5 W de potencia.
- Entre las modificaciones que llevaron a cabo los estudiantes, cabe destacar el aislamiento del disipador de calor de la radiación exterior, que permitió reducir la temperatura del foco frío 10 °C aumentando considerablemente la eficiencia del sistema.
- El foco caliente transmite calor al foco frío de manera no despreciable, lo que empeora el rendimiento de la célula enormemente.
- El prototipo consiguió una conversión a energía eléctrica del 5%.

Sin embargo, el aprendizaje más relevante que se puede sacar de esta tesis es que asegurar un aislamiento de los focos de las células Seebeck es crucial para obtener un gradiente de temperatura útil. En esta tesis se consiguió incrementar la generación termoeléctrica en un 500 % tras aislar el disipador de calor junto con otras modificaciones. Aprovechar los efectos termoeléctricos en la mayor medida posible requiere ser cuidadoso con el diseño de prototipos, ya que los elementos externos deben afectar cada cara del dispositivo termoeléctrico de diferente manera [42].

3.2.4. Bombas de calor termoeléctricas

Un estudio realizado en la Universidad Pública de Navarra quiso estudiar la influencia de distintos intercambiadores de calor en bombas de calor para la generación termoeléctrica utilizada para almacenamiento de energía. Se utilizaron dos tipos de intercambiadores: de conducción (ICC) y de cambio de fase (ICCF) [43].

Las bombas de calor que se diseñaron con los intercambiadores eran multietapa. Esto quiere decir que se emplean dispositivos termoeléctricos, manteniendo una relación constante de termopares de 2, en varias etapas. Para la primera se utilizó 1 dispositivo, en la segunda se utilizaron 2 como se muestra en la Figura 22.

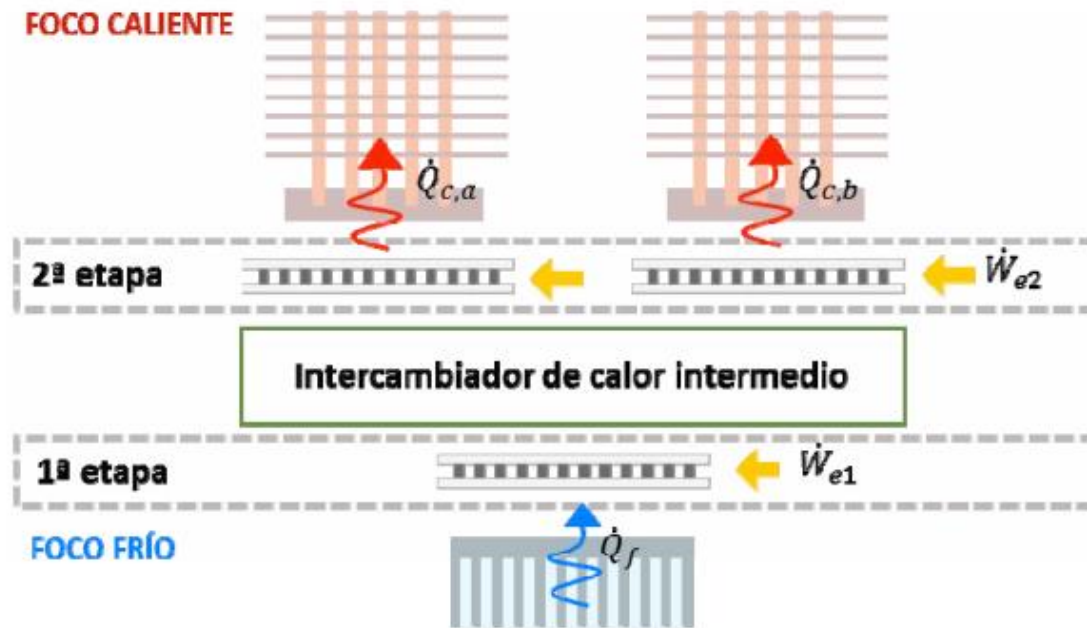


Figura 22: Esquema de las etapas de la bomba de calor [43].

Los intercambiadores de calor utilizados para la absorción y disipación de calor no fueron iguales, se utilizó un intercambiador de cambio de fase en el foco caliente y un intercambiador de aletas de aluminio en el foco frío. Estudios realizados sobre la disipación de calor aseguran que los intercambiadores deben tener una resistencia térmica lo más pequeña posible [44]. Además, los intercambiadores de cambio de fase aumentaban en un 36 % sobre los aleteados la eficiencia del transporte de calor cuando actuaban como disipadores [45], mientras que los intercambiadores aleteados presentan una menor resistencia térmica cuando reciben el calor [46]. El intercambiador intermedio fue el objeto de uso del estudio.

Este estudio no solo refleja el uso de los sistemas termoeléctricos para bombas de calor, sino que también analiza los distintos tipos de intercambiadores de calor y los sistemas de intercambio de calor en varias etapas, capaces de aumentar el COP de las bombas de calor termoeléctricas [43].

Los intercambiadores aleteados son además más baratos y fáciles de obtener. Siguiendo el ejemplo de este estudio, se utilizarán intercambiadores aleteados en el foco frío de las disposiciones. El número de intercambiadores dependerá del montaje que se quiere estudiar.

3.2.5. Generadores termoeléctricos accionados por el calor corporal

Tras estudiar las aplicaciones de la termoelectricidad en elementos cotidianos como relojes o botas, pero fundamentalmente empleando el calor generado por el cuerpo humano, en la Universidad de Zaragoza se llevó a cabo un prototipo simple de generador termoeléctrico [37].

El foco caliente de este generador termoeléctrico sería la piel humana, cuya temperatura se ve influenciada por el calor corporal que genera el ser humano. Las células termoeléctricas estarían recubiertas de PDMS; material que actúa como lubricante y que es seguro para el contacto con la

piel ya que la protege del frío, pero que sin embargo causó pérdidas en la transmisión de calor entre las caras de las células y los focos de temperatura. Como foco frío se utilizaría la temperatura ambiente.

Este trabajo dedujo que la velocidad a la que se movía el dispositivo influenciaba en la eficiencia de la conversión eléctrica, debido a que se conseguía una convección forzada en las aletas que produjeron coeficientes de convección más altos. La inclusión de aletas en el foco frío de este generador termoeléctrico sustituye un intercambiador de calor y consiguen aumentar el intercambio de calor con el aire. En la Figura 23 se exponen el equipo desarrollado y su distribución de temperaturas.

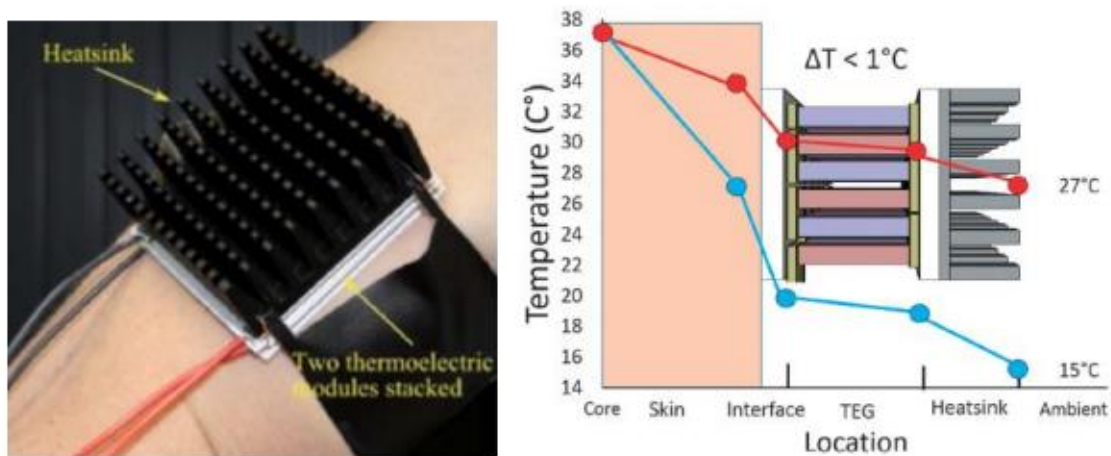


Figura 23: Generador termoeléctrico accionado por el calor corporal [37].

Uno de los retos más desafiantes de esta configuración era la generación de una diferencia de potencial significativa, ya que el salto térmico entre las caras de las células termoeléctricas era muy reducido y como máximo se podrían obtener 98 mA de corriente eléctrica. Se estudiaron diferentes casos en los que se empleaban materiales distintos con coeficientes de Seebeck más favorables, otros fluidos refrigerantes que no fueran aire o temperaturas ambientes reducidas que generasen un diferencial de temperatura mayor. Si bien en el mejor de los casos se podría llegar a alcanzar una generación de potencia de 0,84 mW, en el caso estándar se obtienen entre 10 y 15 μ W de potencia [37]. Como conclusión, en la actualidad no existe una posible aplicación para este tipo de prototipos ya que la mayoría de dispositivos eléctricos requieren un suministro de potencia eléctrica mucho mayor.

3.3. Desafíos y oportunidades

Tras estudiar la bibliografía se descubren varios desafíos a superar, pero también oportunidades que explotar.

El principal desafío reside en encontrar un método de refrigeración eficiente que asegure una diferencia de temperaturas lo suficientemente elevada entre el foco frío y el foco caliente de las células. Se ha podido observar como la transmisión de calor del foco caliente al foco frío no es despreciable, y como un buen aislamiento del montaje encargado de refrigerar el foco frío es relevante para conseguir eficiencias en la conversión energética superiores a un 1 %. Este aislamiento también es relevante para proteger los elementos electrónicos, incluyendo la propia célula.

Otro desafío reside en encontrar una fuente de calor constante y fiable. Los proyectos que han utilizado el calor residual proveniente del cuerpo humano o el obtenido por tecnologías de concentración solar han tenido que prestar especial atención a cómo sacar el máximo partido a su fuente de calor, sin lo cual no es posible obtener suficiente potencia eléctrica, así como de proteger al equipo en caso de que se trabaje en temperaturas muy elevadas. Teniendo en cuenta lo reducido de los valores de conversión energética de los generadores termoeléctricos, es muy importante estudiar el foco caliente del equipo.

Por otro lado, se ha hecho evidente el margen de mejora y desarrollo que existe en el ámbito de los generadores termoeléctricos. Su desventaja ante los paneles solares parece basarse en la falta de explotación de esta tecnología, ya que resulta muy eficiente en algunos ámbitos como en el aprovechamiento de calores residuales en vehículos o en sondas espaciales. Se han podido observar numerosos prototipos eficientes desarrollados a un bajo coste, lo que permite que sean analizados por estudiantes de cualquier universidad.

Además del reducido coste que parece tener esta tecnología, parece tener un campo de aplicación muy amplio. Los generadores termoeléctricos pueden utilizarse tanto para refrigerar como para calentar. Focalizándonos en la refrigeración, existen numerosas fuentes de calor desaprovechadas en muchas industrias, desde la cocina/hostelería hasta la fabricación industrial.

Por último, se han podido observar equipos de diversos tamaños capaces de suministrar una potencia eléctrica considerable, lo que amplía el abanico de posibles diseños o aplicaciones que pueden tener. Existe también una elevada demanda de energía eléctrica, lo que convierte a los generadores termoeléctricos de cualquier tamaño en un objeto de estudio interesante a explotar.

4. Definición y Metodología de Trabajo

4.1. Fundación ingenieros ICAI

Este proyecto se lleva a cabo junto con la colaboración de la Fundación de ingenieros por el desarrollo de ICAI. Carlos Ruiz Díez, antiguo alumno de la Universidad Pontificia de Comillas e ICAI, y miembro de la fundación, se encuentra viviendo en Chad, África central, a fecha de redacción de este proyecto. Su experiencia viviendo en un país donde no hay fácil acceso a la red eléctrica fue de gran ayuda, ya que ilustró distintos casos en donde un prototipo de generación termoeléctrica podría ser aplicable. Para poder definir un objetivo o uso concreto, en lugar de intentar crear un prototipo de aplicación industrial (que requería un mayor presupuesto y mejor equipo) aplicable para cualquier ciudad del país, se optó por estudiar los hornillos que utilizan en las cocinas de Chad. Véase un ejemplo en la Figura 24:



Figura 24: Hornillo utilizado en Chad, África Central.

Observando el hornillo, se distingue una cubierta de metal sobre la que es posible colocar un equipo. Carlos realizó una toma de medidas de temperatura sobre el hornillo, la cual representa las condiciones de trabajo finales y reales sobre las que se pretende diseñar el prototipo. Estas medidas se realizaron en la parte superior, mientras que en el lateral la temperatura es 40 °C menos, y las dimensiones del hornillo son 40 cm de diámetro y 45 cm de altura.

Si analizamos la gráfica de temperaturas que se muestra en la Figura 25, observamos como la temperatura disminuye gradualmente con el tiempo. Dado que es raro que se requieran más de 30 minutos para cualquier tipo de cocinado con este hornillo, se aspira a trabajar con una temperatura máxima en el foco caliente de 380 °C, la máxima en la gráfica. Sin embargo, el equipo que se diseñe debe contemplar la posibilidad de seguir funcionando incluso con menor temperatura. De esta manera, el prototipo se podrá utilizar durante y después del cocinado para alimentar un sistema de luces o las baterías de un teléfono, sin requerir un fuego o temperaturas exageradamente altas.

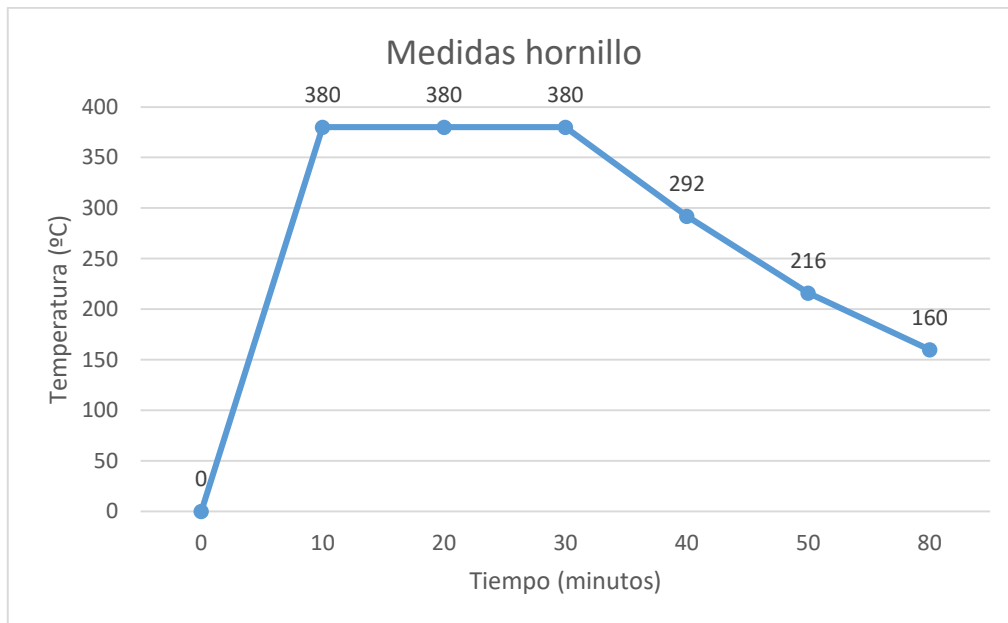


Figura 25: Rango de temperaturas de trabajo del hornillo

4.2. Equipo y material de laboratorio

Este proyecto se ha realizado en el espacio proporcionado en el aula de instrumentación electrónica de ICAI – Universidad Pontificia de Comillas que se muestra en la Figura 26. A continuación se detallan los distintos equipos y materiales empleados para realizar los distintos experimentos.



Figura 26: Espacio de trabajo con varios montajes de equipos y los materiales principales

4.2.1. Medidores de tensión y corriente eléctrica

Se utilizaron los multímetros mostrados en la Figura 27 para todos los experimentos realizados dado que siempre ha sido necesario medir la corriente continua [47] [48].



Figura 27: A la izquierda, multímetro de hasta 600 V y 10 A de RS PRO [48]. A la derecha, multímetro de hasta 600 V y 20 A de Kaise instrumentación [47].

Cuando se han utilizado resistencias variables para generar calor, y por lo tanto ha sido necesario medir la diferencia de potencial o la corriente alterna; se ha utilizado el osciloscopio digital que se muestra en la Figura 28 [49].



Figura 28: Osciloscopio portátil digital de Rohde & Schwarz [49].

4.2.2. Fuentes de alimentación

Se han empleado dos tipos de fuentes de alimentación. Para poder alimentar a los ventiladores que refrigeraron los equipos de manera aislada se ha utilizado un fuente de alimentación de corriente continua como la mostrada en la Figura 29.



Figura 29: Fuente de alimentación de corriente continua

Para poder alimentar con corriente alterna a las resistencias variables en uno de los experimentos se ha utilizado un autotransformador monofásico variable que se muestra en la Figura 30 [50].

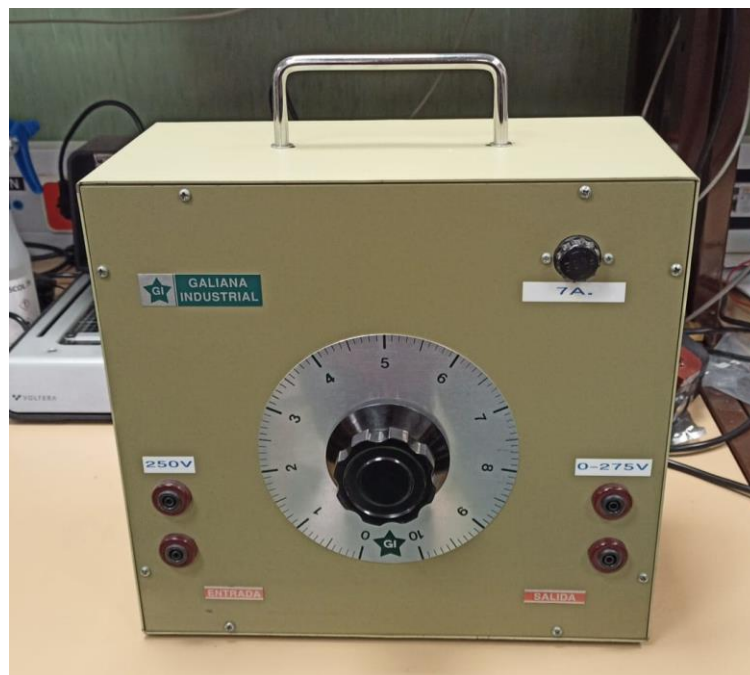


Figura 30: Autotransformador monofásico variable de Galiana Industrial [50].

Al tratarse de equipos de gama antigua que abaratan el coste de este proyecto, la selección de datos podría ser más precisa de haberse utilizado equipos más modernos.

4.2.3. Calor y temperatura

El material más utilizado en este proyecto ha sido el calentador eléctrico proporcionado por el laboratorio de Ingeniería Química de la universidad que se muestra en la Figura 31. Este equipo es realmente una placa calefactora digital capaz de alcanzar los 300 °C que permite el poder trabajar a diferentes temperaturas [51].



Figura 31: Placa calefactora digital de Ovan [51].

Para medir la temperatura en los distintos puntos de las configuraciones montadas, se han utilizado termómetros de termopares tipo K que soporten los 300 °C, si bien sus medidas nunca los alcanzan; que se muestran en la Figura 32 [52] [53].



Figura 32: A la izquierda, termómetro de termopares de Velleman de 2 medidas [52]. A la derecha, termómetro de Spacnana de 1 medida [53].

Para caracterizar las células Seebeck y Peltier y obtener su eficiencia, ha sido necesario montar una configuración que utiliza 2 resistencias variables calefactoras como la mostrada en la Figura 33. Estas resistencias necesitan una alimentación trifásica para generar calor. A continuación se muestra el modelo escogido de 40 mm de longitud, 10 mm de diámetro, alimentación de 220 V ac y potencia de 200 W [54] (también se consideró utilizar un modelo de menor potencia, de 50 W [55]).



Figura 33: Resistencias variables calefactoras de RS Pro [54].

4.2.4. Materiales de los equipos construidos

En este proyecto han sido protagonistas las células de generación termoeléctricas. Se compraron y se utilizaron las células que se muestran en la Figura 34, cuya hoja de características se incluirá en los anexos. Las dos de la izquierda son células Seebeck de distinto tamaño [56] [57], mientras que la célula de la derecha es una célula Peltier [58].

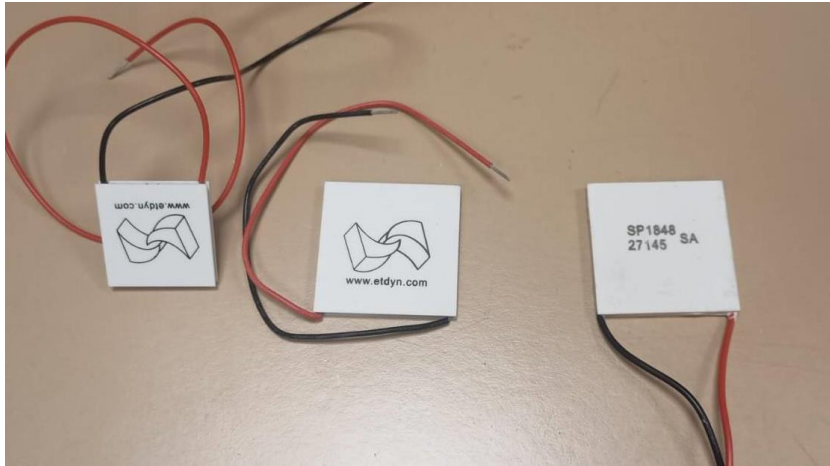


Figura 34: De izquierda a derecha: célula Seebeck 30x30 mm [56], célula Seebeck 40x40 mm [57] y célula Peltier 40x40 mm [58].

La célula Peltier tiene un rango de temperaturas de trabajo de 0 a 150 °C, siendo capaz de producir 4,8 V y 0,669 A para una diferencia de temperaturas de 100 °C [58].

Las células Seebeck pueden trabajar con temperaturas máximas de 200 °C en el lado caliente y 175 °C en el lado frío. Para una diferencia de temperaturas de 170 °C, son capaces de producir 3,98 V y 1,19 A [56] [57].

Se observa como las células Seebeck pueden trabajar en condiciones de mayor temperatura, producir más potencia ($4,7362 > 3,2112$ W) y generar mayor corriente, pero menos diferencia de potencial. Experimentalmente se deberá corroborar esta información para estudiar su uso en el prototipo final.

El objetivo de estas células será alimentar una batería de litio de 3,6 V. Para el prototipo final se utilizó el tipo de batería que se muestra en la Figura 35 [59].



Figura 35: Batería de litio a 3,6 V de Reguero Baterías [59].

Para alcanzar este objetivo será necesario utilizar un módulo convertidor elevador para alcanzar una salida de al menos 5 V, entrada mínima necesaria de las baterías de teléfonos móviles, aunque la batería que utilizamos en el laboratorio no requiera tanta tensión. El modelo utilizado en el prototipo final es el que se muestra en la Figura 36, con un rango de entrada de 0,9 a 5 V, una salida constante de 5 V para una corriente máxima de 600 mA y un puerto USB [60].



Figura 36: Módulo convertidor elevador de Miravia [60].

4.2.5. Ventiladores

Para refrigerar las células termoeléctricas, se han probado diferentes tipos de ventiladores. Los más utilizados y los que se emplearán en el prototipo final son aquellos que se muestran en la Figura 37 y que comúnmente encontramos en “drones” pequeños [61]. Estos ventiladores son de 40x40 mm al igual que las células Peltier y las Seebeck grandes.



Figura 37: A la izquierda, ventilador industrial de 5 V. A la derecha, ventilador de dron: DC 12V, 0,05 A, 40x40x10mm [61].

Estos ventiladores requieren unos valores de entrada muy reducidos para que comiencen su funcionamiento, y aumentan su velocidad conforme se genera más diferencia de temperatura en los experimentos, dado que las células termoeléctricas a su vez proporcionan una mayor diferencia de potencial.

Se planteó utilizar un ventilador de mayor tamaño (80x80 mm) que al final fue descartado dado que esto reduciría la modularidad del prototipo y porque resultaría más sencillo realizar los experimentos con un diferente número de células si cada una tuviese un ventilador pequeño asociado. No obstante, se realizó un estudio comparando los distintos consumos y la velocidad de los gases en el flujo de entrada y salida del ventilador grande con un anemómetro, a utilizar en futuros proyectos para hacer más estudios.

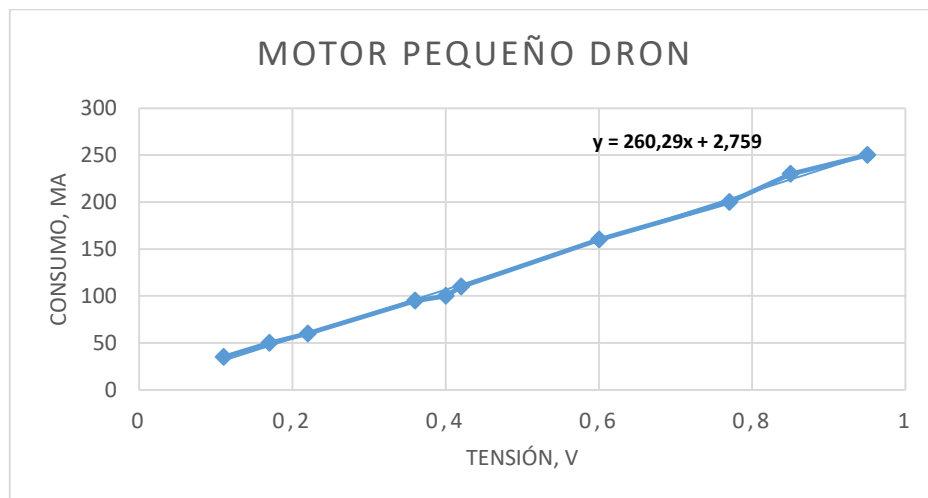


Figura 38: Tensión (V) y consumo (mA) del ventilador pequeño

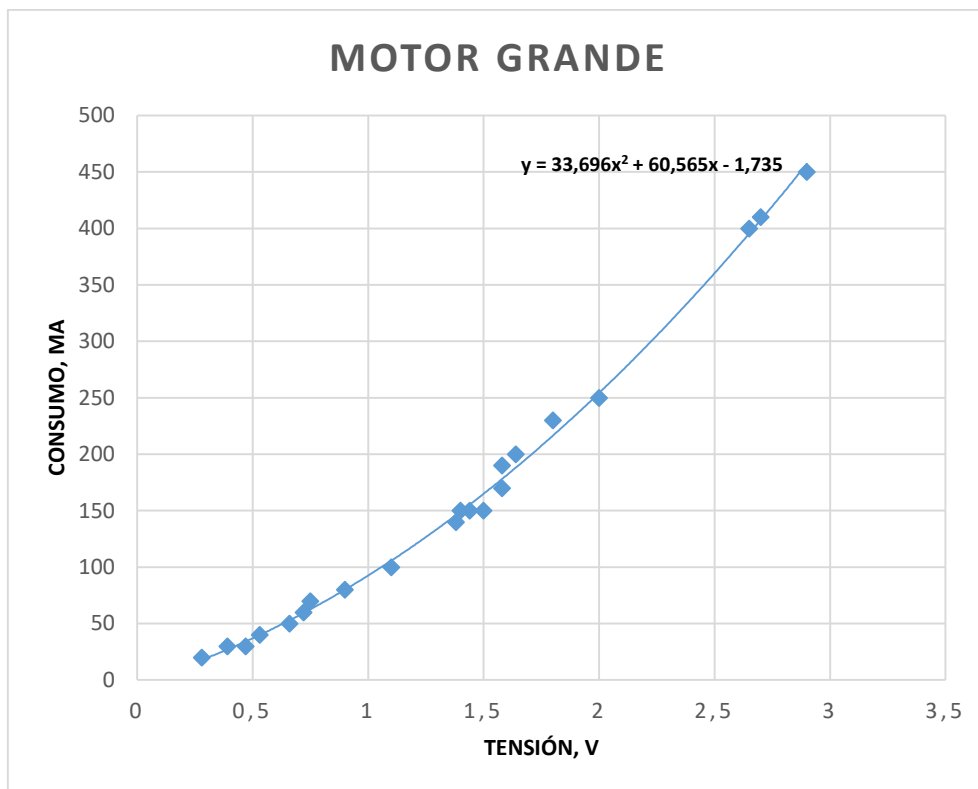


Figura 39: Tensión (V) y consumo (mA) del ventilador grande

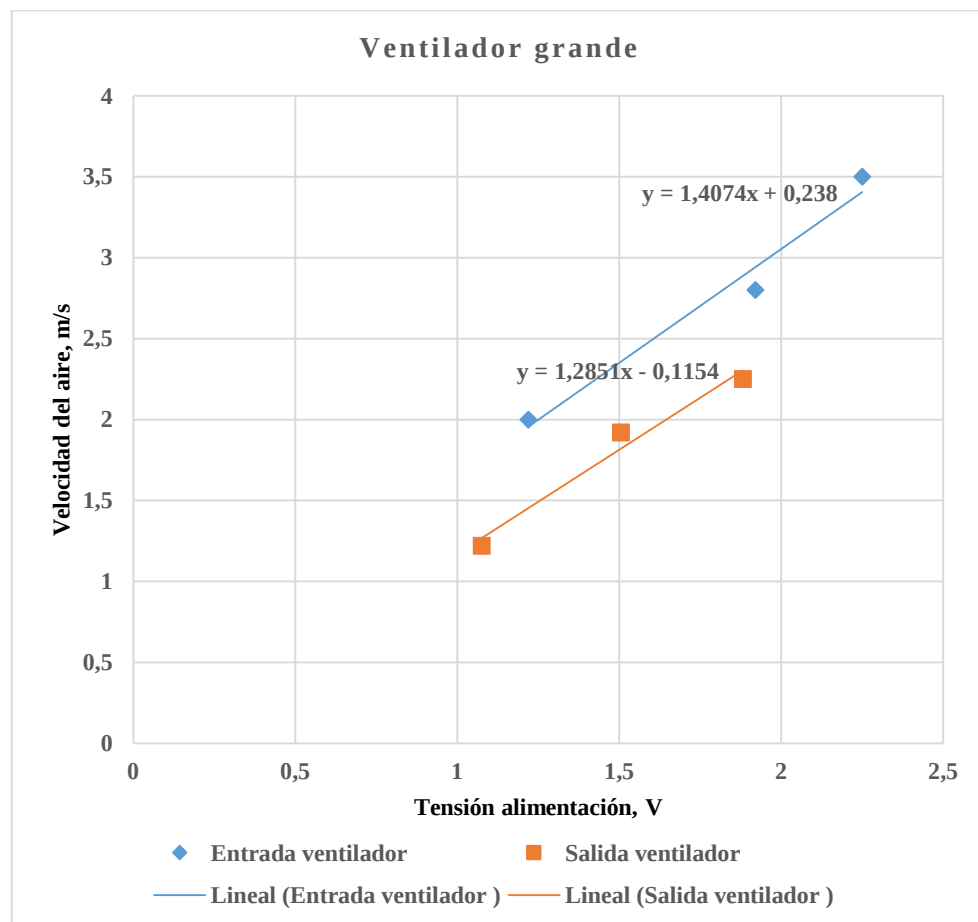


Figura 40: Estudio de velocidad del ventilador grande

4.3. Estudio experimental

Antes de realizar el montaje de un prototipo final funcional se tuvieron que realizar estudios previos para analizar el comportamiento de las células, los sistemas de refrigeración, la disipación de calor y la generación de potencia eléctrica. A partir de los resultados de estos estudios, de entender empíricamente la verdadera utilidad del efecto termoeléctrico y contando con la enorme ayuda de los tutores de este TFM, se propuso y fabricó un prototipo.

La metodología de trabajo inicial fue la siguiente;

- Se empleó un equipo funcional construido con anterioridad por el director de este TFM para hacer un estudio inicial y entender los componentes principales de estos sistemas así como los valores relativos que se pueden obtener.
- Se compró y estudió un segundo equipo que aprovechaba el efecto termoeléctrico con una configuración de componentes muy diferentes, y que se caracterizaba por el gran tamaño del ventilador que utilizaba. A través de este estudio se pudo entender la importancia tanto de un buen sistema de disipación de calor en el foco caliente, como de un buen sistema de refrigeración en el foco frío.

Caracterizar las células Peltier o Seebeck de las que disponíamos fue muy importante, ya que su capacidad de convertir potencia térmica en eléctrica determinaría el número de células necesarias para el diseño final del prototipo. Los estudios previos nos dieron una idea de la potencia eléctrica que podríamos obtener, y se dedujo que, contando con 4 células, se necesitaría un convertidor de potencia para alcanzar los 5 V que permiten cargar las baterías de un teléfono móvil. Sin embargo, este convertidor requiere unos valores mínimos de corriente que se deben alcanzar y que las células deben suministrar a la vez que alimentan el sistema de refrigeración.

Para llevar a cabo esta caracterización, se fabricaron diferentes montajes:

- Se realizó otra configuración que se podía montar sobre un pequeño fuego.
- Se realizó un montaje simple con una célula Peltier y un ventilador sobre una estufa eléctrica.
- Se preparó una configuración final más compleja con resistencias variables:
 - o Se realizó un estudio final de caracterización de células Peltier, utilizadas como células Seebeck por su reducido coste.
 - o Se realizó un estudio final de caracterización de células Seebeck.

A continuación se explican con mayor detalle los estudios realizados, sus implicaciones, las conclusiones obtenidas y el orden cronológico en el que se obtuvieron.

4.3.1. Primer equipo

El equipo que se muestra a continuación fue construido por el director de este TFM. Con este equipo se inició el desarrollo de este TFM. Los objetivos principales que se establecieron con este equipo fueron los siguientes:

- Entender el funcionamiento de un generador termoeléctrico empíricamente.
- Estudiar los distintos componentes que se requieren.
- Conseguir una noción de los valores de producción que se pueden obtener.
- Establecer una metodología de estudio para posteriores equipos.

En la Figura 41 se muestra el equipo con sus distintos componentes.

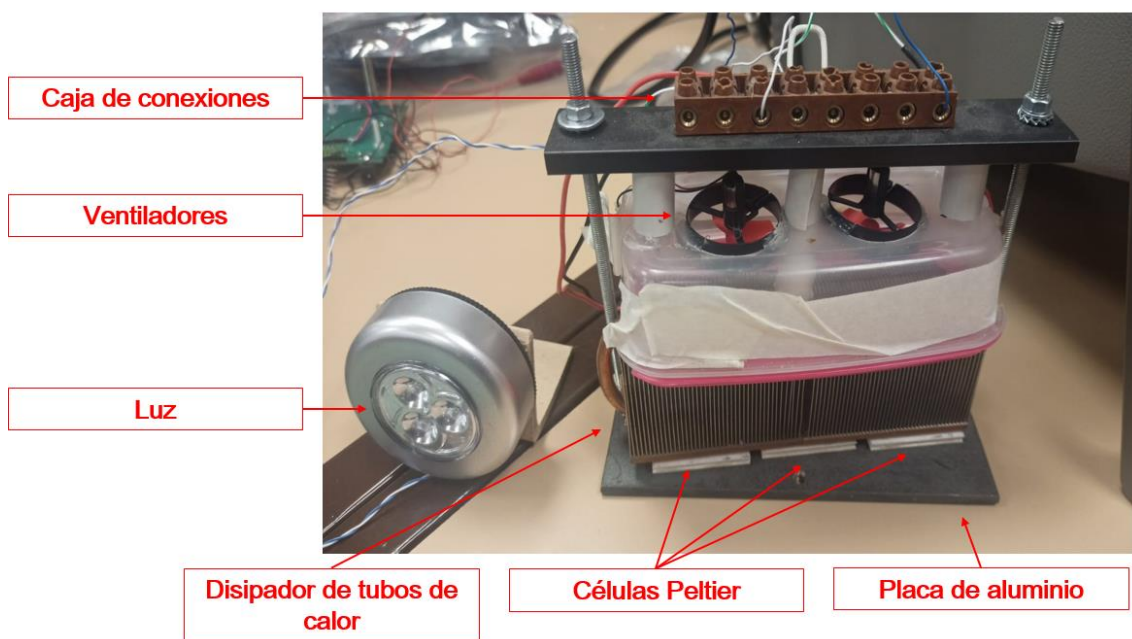


Figura 41: Primer equipo estudiado

El funcionamiento es el siguiente:

- 1) El equipo se coloca sobre un hornillo para que caliente la base, sobre la que se encontrarían las células termoeléctricas; que debe ser de un material conductor.
- 2) La cara de las células en contacto con la base es la que denominamos “**cara caliente**”, ya que es la que alcanzará la temperatura máxima de trabajo.
- 3) La cara opuesta de las células, que estará en contacto con el sistema de disipación de calor (disipador, ventilador...) en la mayoría de casos, se denominará “**cara fría**”.
- 4) En contacto con las caras frías está montado el sistema de refrigeración, que consiste en un disipador de tubos de calor, un par de ventiladores utilizados típicamente para dron, y una envoltura de plástico que asegura una ventilación directa hacia el disipador.
- 5) Encima del sistema de refrigeración se encuentra una pequeña pero alargada base metálica sobre la que se coloca la caja de conexiones. En esta configuración, la base no

está en contacto con el sistema refrigeración, lo que ayudaría a mantener la caja de conexiones a una temperatura no peligrosa, pero las patas de la misma si están en contacto con la placa de aluminio inferior.

- 6) Los dos ventiladores están conectados en paralelo (M) y los alimenta una sola de las células Peltier.
- 7) Las células Peltier están conectadas en serie.

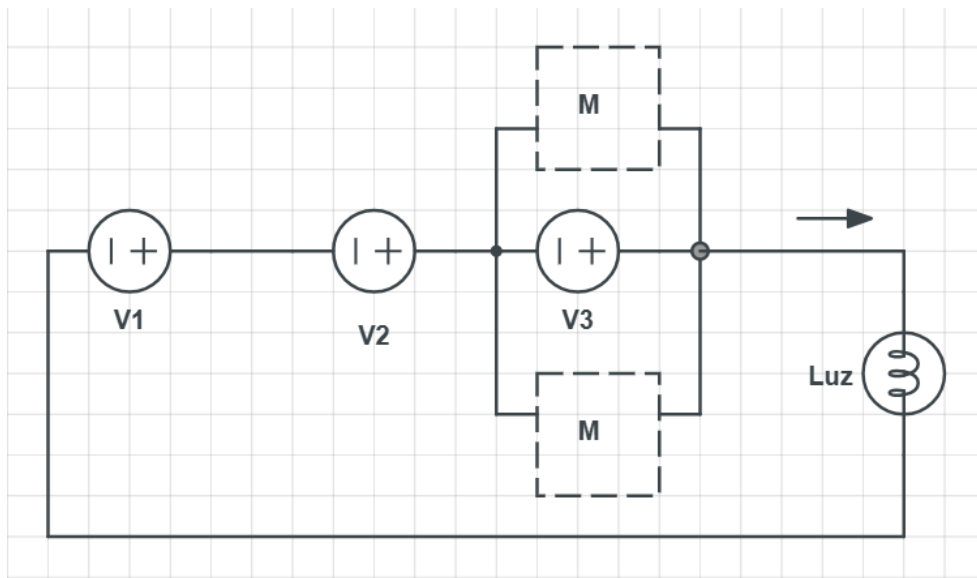


Figura 42: Circuito eléctrico del primer equipo. V1, V2 y V3 representan las células y M los motores de los ventiladores.

Debido a que las células Peltier, a diferencia de las células Seebeck, no están diseñadas para soportar elevadas temperaturas ya que se fundirían sus componentes, la cara caliente en este equipo no superó los 100 °C. El equipo fue capaz de alimentar la linterna, de la cual desconocíamos sus propiedades.

Para comprobar la eficiencia del equipo, se decidieron colocar medidores de temperatura con termopares en ambas caras de una de las células. Simultáneamente, se midió la diferencia de potencial total entre las tres células y la linterna. Si bien se decidió no modificar este equipo al inicio, el experimento habría requerido las medidas de corriente para caracterizar completamente el equipo. Dado que el objetivo de este equipo no es tanto su caracterización sino servir de introducción a la metodología de trabajo con la generación termoeléctrica, no se tomaron dichas medidas.

Primeramente, al desconocer la metodología para medir los resultados, se realizaron las medidas cambiando la temperatura en intervalos de tiempo no muy prolongados. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 43:

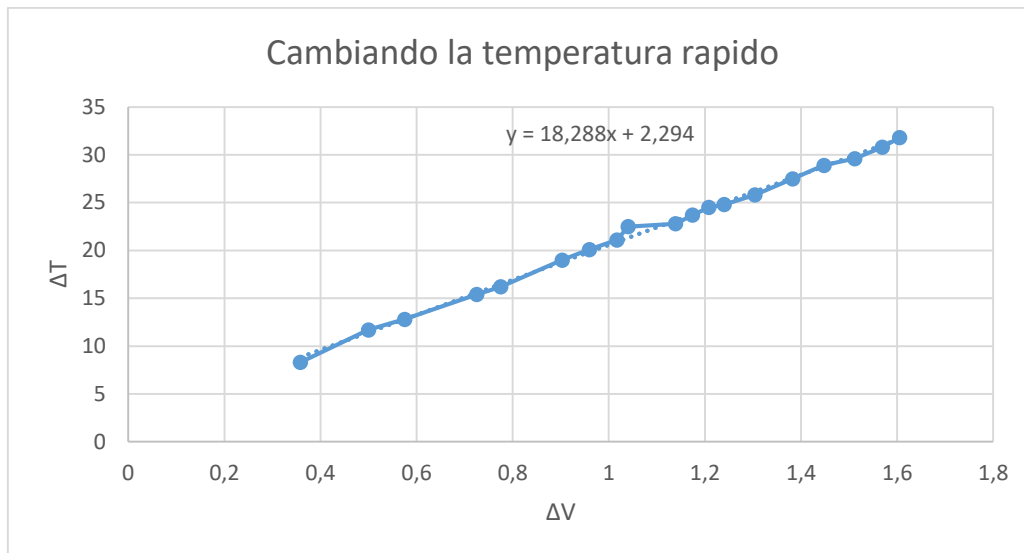


Figura 43: Medidas iniciales con el primer equipo. Diferencia de potencial obtenida para una diferencia de temperatura determinada.

Sin embargo, esta metodología no es correcta, ya que es necesario que se estabilicen las temperaturas en ambas caras de la célula. La inercia térmica en este tipo de experimentos no es despreciable y es necesario alcanzar el equilibrio térmico para tomar unas medidas lo más veraces posibles. Como consecuencia, la toma de medidas para este proyecto destacaría por el elevado periodo de tiempo requerido, especialmente en los últimos prototipos. Los resultados obtenidos se recogen en la Figura 44:

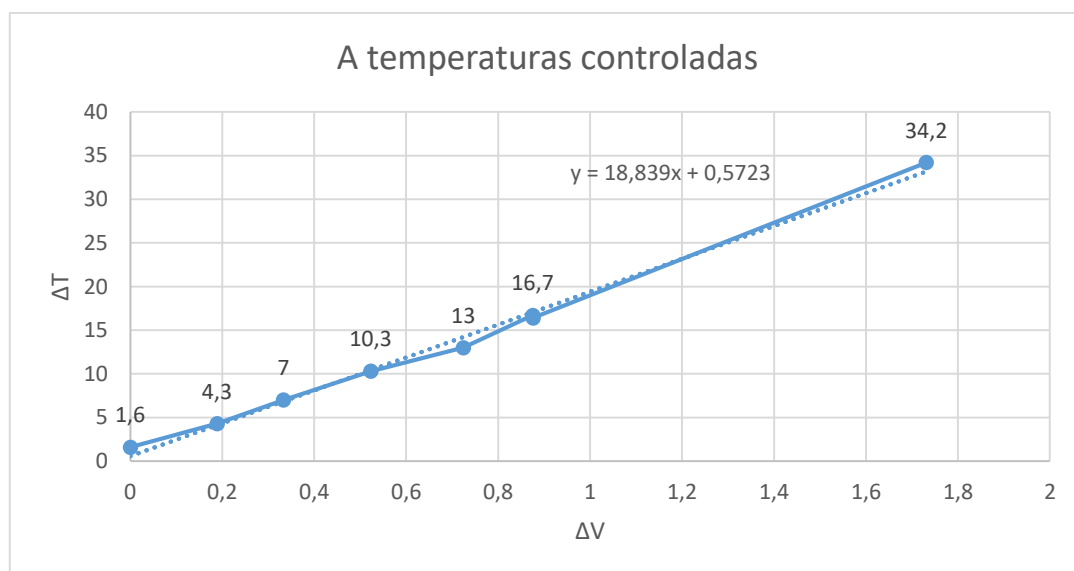


Figura 44: Relación entre la diferencia de temperaturas y la diferencia de potencial obtenida en el primer equipo. Los valores numéricos en cada punto representan el valor en el eje de ordenadas para un valor determinado en el eje de abscisas.

Si bien las diferencias al seguir un mejor método de trabajo no son apreciables en este caso, conviene mantenerlo para los futuros experimentos.

Se pueden sacar las siguientes conclusiones de este experimento:

- Con una temperatura máxima de 100 °C en la placa de aluminio se obtiene una diferencia de temperaturas de casi 35 °C, un valor bastante reducido considerando que aspiramos a trabajar con cerca de 400 °C en el prototipo final.
- Para una diferencia de temperatura de 35 °C, trabajando con 3 células Peltier y alimentando a 2 ventiladores que requieren cerca de 0,5 V; se consiguen obtener 1,7 V. Cualquier batería de teléfono móvil requerirá mínimo 5 V, por lo que se debe mejorar la eficiencia ya sea mediante:
 - o Trabajar con mayores diferencias de temperaturas (mejorando el sistema de refrigeración y alcanzando temperaturas más elevadas en el foco caliente).
 - o Mejorando la conversión de energía térmica en eléctrica (utilizando células Seebeck en lugar de Peltier).
- Se debe utilizar un convertidor que nos permita alcanzar los 5 V a la salida.
- El esquema básico de los sistemas de generación termoeléctrica sigue la misma configuración que lo estudiado en el marco teórico. Para realizar el análisis experimental se requieren una fuente de generación de calor, un disipador de calor y el propio dispositivo termoeléctrico. Estudiando este equipo, se puede desarrollar más en profundidad este esquema que se muestra en la Figura 45, contando con un horno eléctrico como fuente de generación de calor que nos permite modificar la temperatura de trabajo:

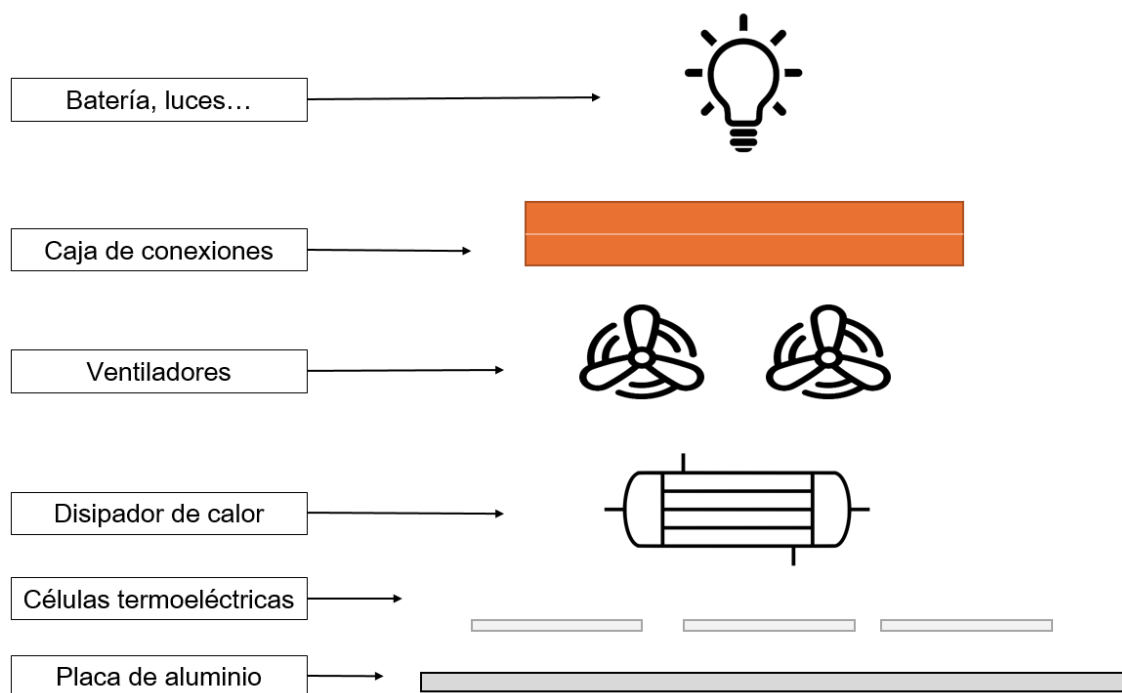


Figura 45: Esquema de componentes básicos para un prototipo

La distribución del sistema de refrigeración puede ser variable, pero el esquema a seguir como referencia será el presentado en la Figura 45. Cabe destacar que en este equipo se ha utilizado como disipador de calor un enfriador de tubos de calor, un modelo más caro, pesado y voluminoso pero que presenta una mayor eficiencia en comparación con los disipadores de calor que hay presentes en el laboratorio de la universidad, que se utilizarán para el desarrollo de prototipos y que se muestran en la Figura 46 [62] [63].

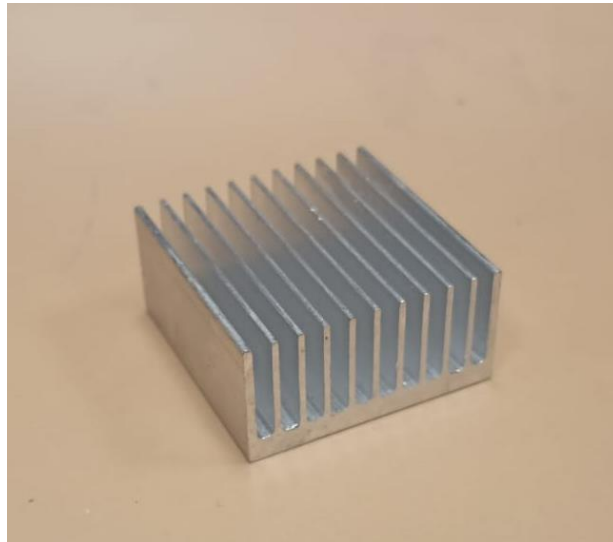


Figura 46: Disipador de calor con aletas [63].

4.3.2. Calentador de estufa

Como partíamos de la premisa de que el horno sobre el que colocaríamos el futuro prototipo alcanzaría los 400 °C, se comenzó a plantear configuraciones que evitasen que esos 400 °C alcanzasen la cara caliente de las células, ya que esto dañaría sus componentes haciendo inservible el prototipo. El equipo estudiado anteriormente tenía este problema y por ello no se pudieron superar los 100 °C de trabajo. La solución para este problema fue contar con un soporte a modo de “pata” que elevase el equipo completo para separar las células y el resto del equipo de la superficie caliente del horno. Estudiando el mercado para averiguar si ya existían prototipos que contasen con algo similar a esta “pata”, se encontró un calentador para estufas mostrado en la Figura 47 [64]. Existen numerosos modelos con esta configuración, lo que da a entender que está muy extendida en el mercado y que es una configuración funcional. Se debe colocar sobre un horno o estufa para que el ventilador funcione y provoque el flujo de aire hacia delante.

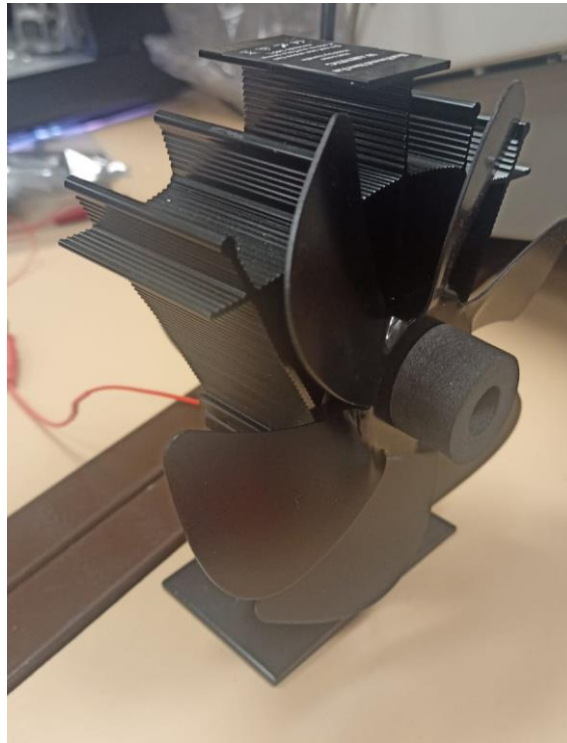


Figura 47: Calentador de estufa con pata

Los componentes del equipo se muestran en la Figura 49 y tiene algunas particularidades:

- El acabado de las superficies es excelente, facilitando el contacto y la transmisión de calor entre las superficies de los componentes y el horno. En la base de su pata cuenta con una pequeña lámina de aluminio encargada de asegurar la transmisión de calor a través de la base como es observable en la Figura 48.



Figura 48: Pata del calentador con lámina de elemento conductor

- Posee una geometría muy complicada, asemejando lo que se considera que son aletas, tanto en la pata como en la parte superior del equipo.
- Posee un espacio entre la célula y las aletas superiores donde se ubica el motor del ventilador.

- De acuerdo a la descripción del producto, este equipo está diseñado para extraer el aire caliente del horno e impulsarlo por una habitación. Es decir, el ventilador no refrigera directamente a la célula, sino que evacúa el calor hacia el lado en el que apunte, lo que a su vez ayuda a refrigerar el equipo entero.
 - o Esto no es del todo eficiente si se busca alcanzar mayores potencias, ya que si se refrigera por igual la cara caliente y la cara fría de la célula, no varía el incremento de temperatura. Por lo tanto, este método de refrigeración no es adecuado para el uso que buscamos en este proyecto.
- El ventilador es muy grande, de 6 aspas pero existen modelos con menos, y no se requiere mucho voltaje para que comience a funcionar.

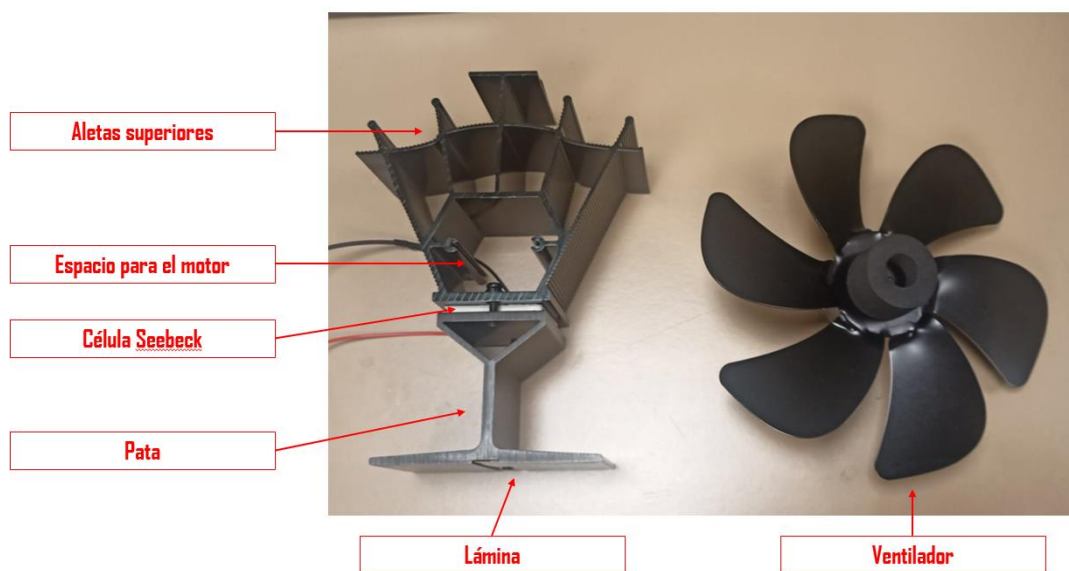


Figura 49: Componentes del calentador para estufa

Partiendo de la base de que no nos sería posible replicar geometrías similares en el laboratorio de la universidad, se quiso estudiar tanto la eficiencia de la pata como disipadora de calor, como el efecto de refrigeración provocado por el ventilador de gran tamaño.

Primero, se optó por estudiar la influencia del ventilador, es decir, utilizando el equipo como está diseñado. Se colocaron medidores de temperatura en la base de la pata, en la cara caliente de la célula y en la cara fría. A su vez, se midió la diferencia de potencial obtenida. Los resultados fueron los siguientes:

- Con apenas una diferencia de temperatura de 14 °C, el ventilador comenzó a funcionar. Sabiendo la poca diferencia de potencial que estos 14 °C suponen, deducimos que con este equipo no se busca obtener más potencia, ya que con poco potencial se consigue que el ventilador funcione y caliente el habitáculo.

- Aplicando una temperatura cercana a 250 °C en el calentador eléctrico, se alcanzó una temperatura máxima de 115 °C en la cara caliente de la célula. Esto corrobora el buen efecto de disipación de calor de la pata.
- La diferencia de temperatura entre la cara caliente y el foco caliente (el calentador) también se ve afectada por la influencia del ventilador.
- Aplicando una temperatura cercana a 250 °C en el calentador eléctrico, nunca se superaron los 65 °C en la cara fría de la célula, lo que corrobora el buen efecto de refrigeración del ventilador.
- Sin embargo, se consiguió obtener una diferencia de temperatura máxima de casi 60 °C, obteniendo una diferencia de potencial próxima a 1 V.

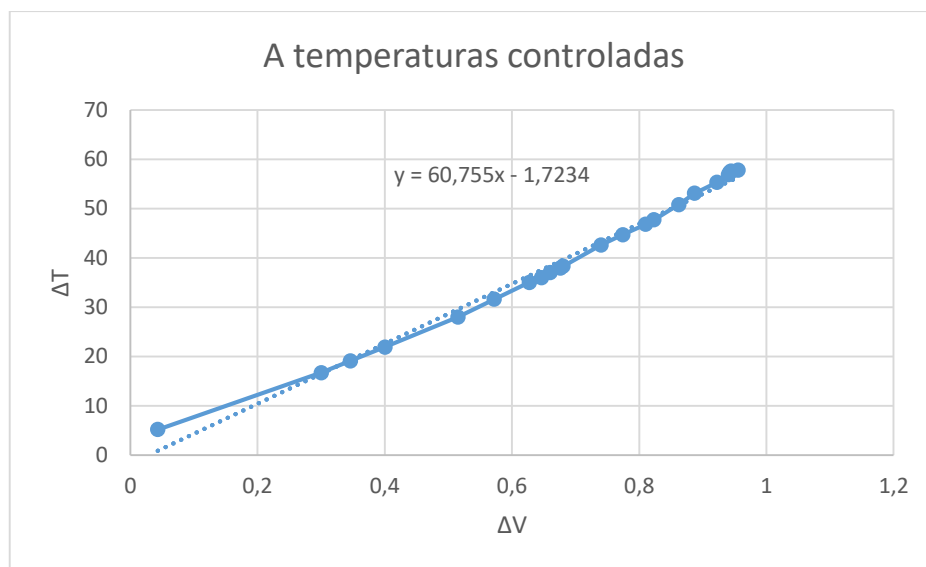


Figura 50: Relación entre diferencia de potencial y diferencia de temperatura obtenidas en el calentador para estufa en su método de trabajo habitual. La línea continua representa la medida experimental y la línea de punto la aproximación por una recta.

Teniendo en cuenta las elevadas temperaturas a las que se encontraba el foco caliente en este estudio, más que duplicando las temperaturas de estudio del primer equipo, y que no se llega a duplicar la diferencia de potencial que se obtiene, deducimos el primer defecto de este equipo: el ventilador refrigera tanto al foco frío como al foco caliente, lo que dificulta enormemente aumentar la diferencia de temperatura entre ambos y obtener como resultado un incremento mayor de temperatura.

Por lo tanto, se pueden sacar dos conclusiones que corroboran las premisas con las que se partieron antes de realizar el estudio:

- La pata es un elemento importante que se debe considerar dado que ayuda a limitar la temperatura en la cara caliente de las células.

- La configuración del ventilador no es la adecuada para el prototipo que se pretende construir.

Tras sacar estas conclusiones, se decidió hacer un segundo estudio sobre el equipo, esta vez descartando el uso del ventilador, para analizar el efecto de disipación de calor de la pata de manera aislada. Se añadió por lo tanto a la configuración una resistencia de $27\ \Omega$ y un multímetro para poder medir también la corriente y obtener la potencia resultante. Los resultados se exponen en las Figura 51 a 53, donde las líneas de puntos representan la aproximación a la función más adecuada.

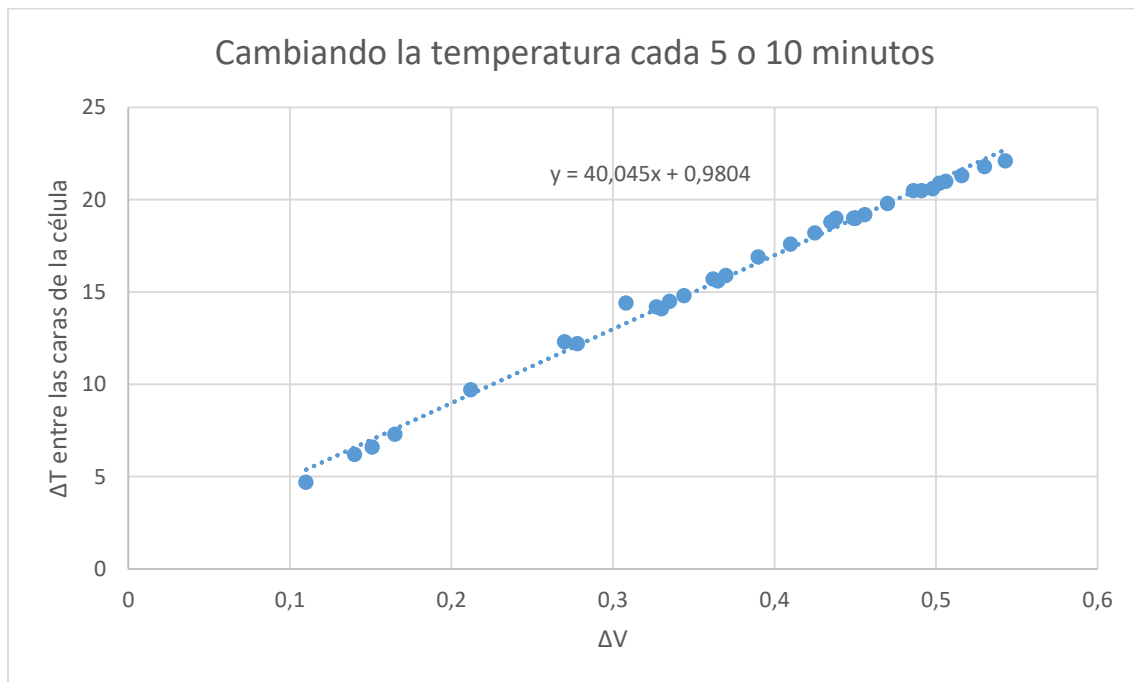


Figura 51: Relación entre la diferencia de temperaturas y la diferencia de potencial obtenida en el calentador para estufa sin utilizar el ventilador.

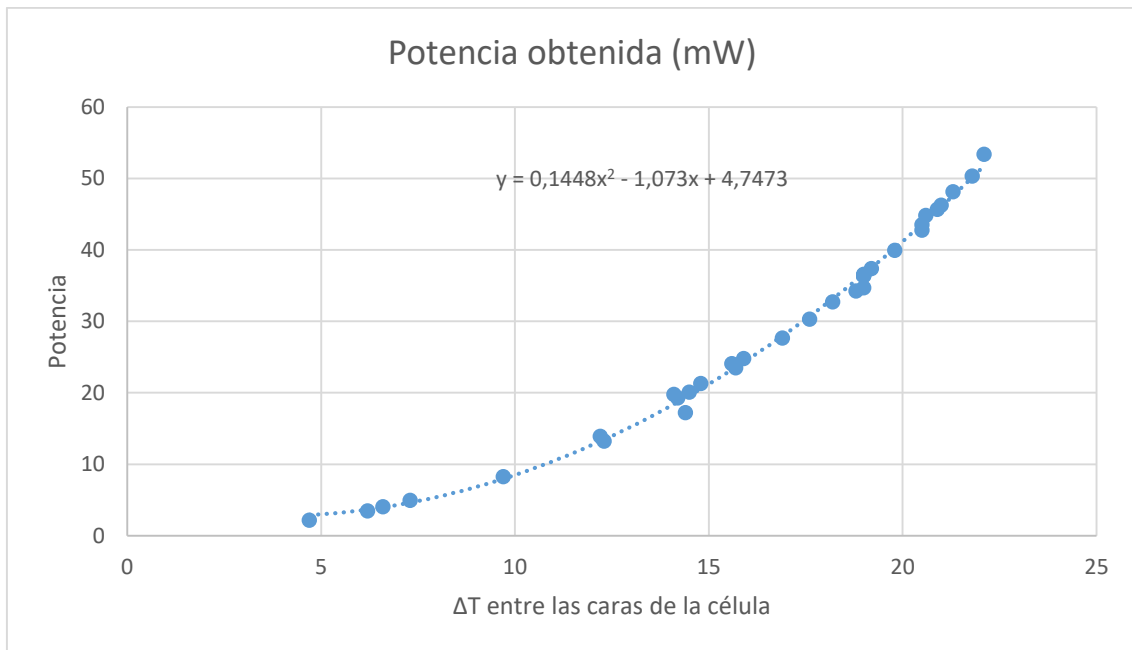


Figura 52: Relación entre la diferencia de temperatura y la potencia obtenida en el calentador para estufa sin utilizar el ventilador.

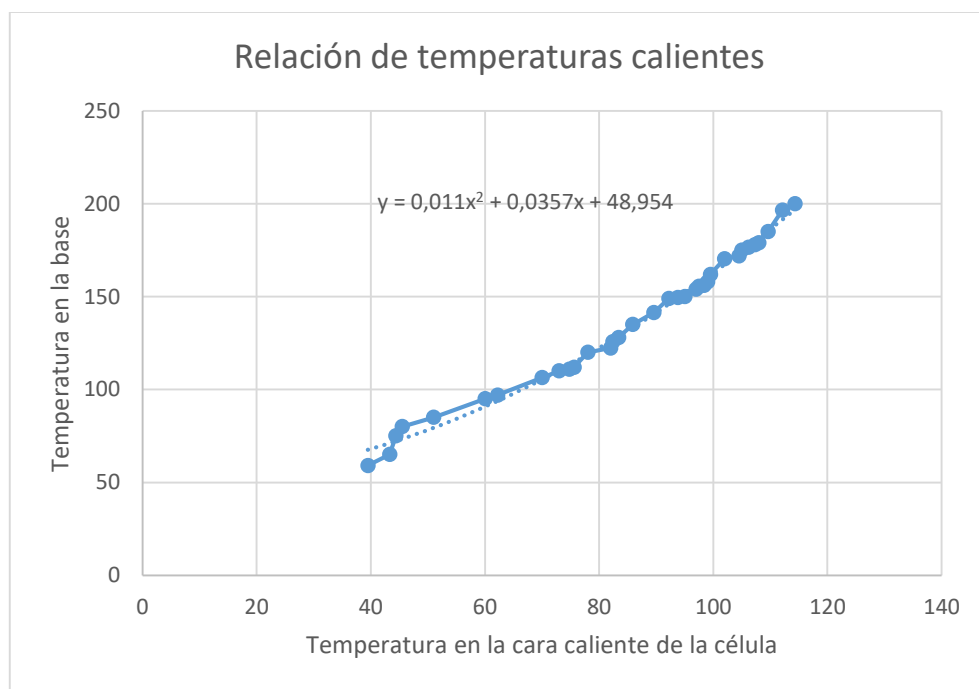


Figura 53: Relación entre la temperatura en la cara caliente de la célula y la base calefactora.

De este experimento con 1 sola célula Seebeck podemos sacar algunas conclusiones y verificar otras. Como suponíamos, sin refrigeración en el foco frío se obtienen diferencias de temperaturas de máximo 22 °C entre las caras de la célula, lo que se traduce en una potencia obtenida muy reducida.

Podemos observar cómo pese a ser una pata de aluminio, la transmisión de calor permite diferencias de temperatura entre la cara caliente de la célula y la base calentadora de hasta 85 °C.

Habiendo trabajado en los mismos rangos de temperatura que en el experimento anterior, esto supone una diferencia de temperaturas de 30 °C menos que en el caso anterior, diferencia de temperaturas que aportaba el uso del ventilador. Además, esta diferencia aumenta conforme aumenta la temperatura en la base calentadora. Esto tranquiliza a la hora de diseñar las patas del equipo, ya que podemos suponer que con patas de materiales similares evitaremos que aunque el horno real llegue a temperaturas muy elevadas, las células Seebeck no llegarán a tanto.

4.3.3. Equipo con vela

Ahora que podíamos estimar la influencia que tendría colocar una pata de aluminio en nuestro prototipo, se decidió comenzar con la caracterización experimental de las células Peltier y Seebeck. Se ha optado por utilizar los disipadores de calor con aletas presentes en el laboratorio para preparar montajes simples que nos permitiesen realizar el estudio.

El primer montaje que se realizó de manera muy simple consistió en una célula Peltier colocada su cara caliente sobre una placa de aluminio. En la cara fría se colocó un disipador de calor con aletas, encima del cual iría montado un ventilador de dron. Este equipo se ha denominado “equipo con vela” ya que se pudo montar sobre el fuego generado por una vela en un pequeño montaje y se muestra en la Figura 54. Además, se colocó un convertidor en la salida para comprobar que, en efecto, se podían alcanzar en la salida los 5 V necesarios para cargar una batería o encender unas luces. Para ello, sería necesario generar la corriente y diferencia de potencial suficientes que exige el convertidor a la entrada.

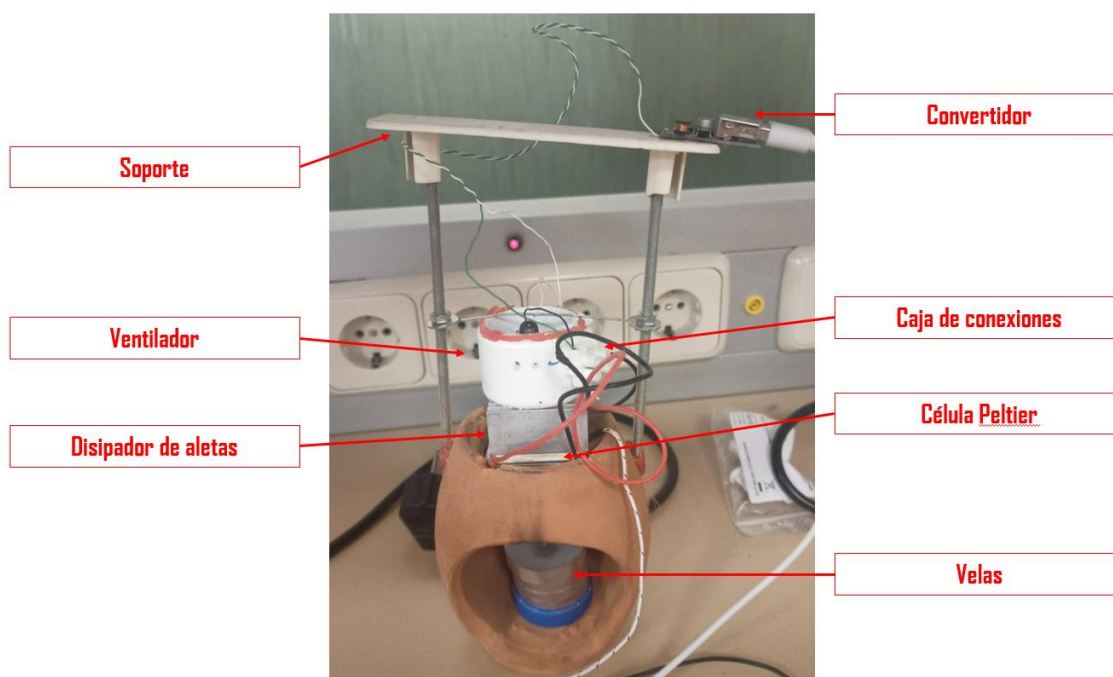


Figura 54: Componentes del equipo con vela

Con el objetivo de caracterizar correctamente la célula y estudiar la corriente y diferencia de potencial que podríamos obtener, se preparó en el laboratorio una resistencia variable de $27\ \Omega$. No necesitamos una elevada resistencia, dado que ya sabemos que los valores de corriente con los que trabajemos serán pequeños. Véase la resistencia variable en las Figura 55 y 56.

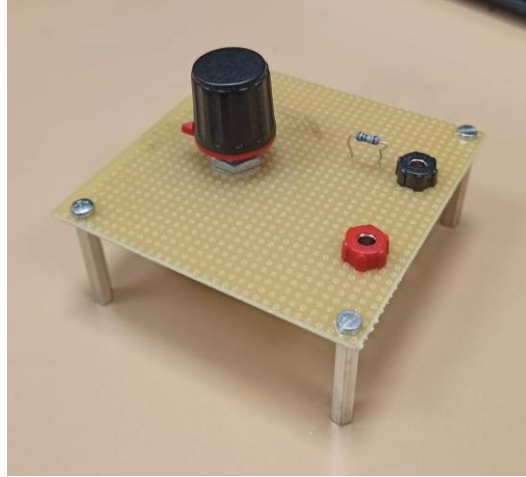


Figura 55: Resistencia variable

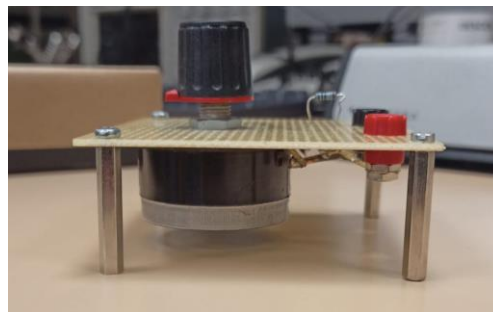


Figura 56: Vista lateral de la resistencia variable

En los experimentos anteriores la resistencia era muy próxima a 0, obteniendo la corriente máxima posible. Con el uso de la resistencia variable, podemos observar empíricamente como va cayendo la diferencia de potencial a medida que aumenta la corriente cuando reducimos el valor de la resistencia.

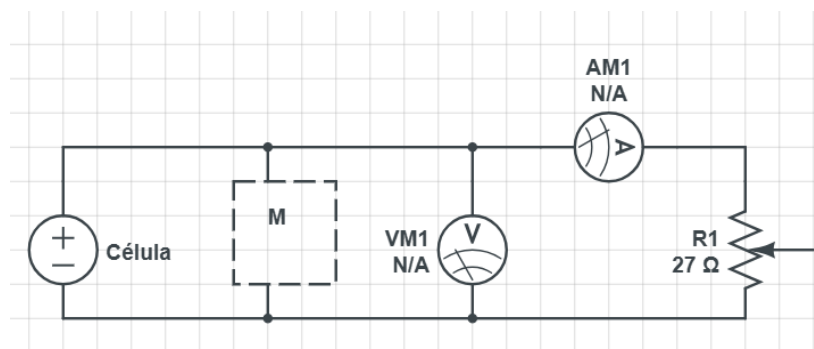


Figura 57: Circuito eléctrico para el equipo con vela

En la Figura 57 anterior se puede observar la configuración del ventilador en paralelo a la célula (representado por el símbolo “M”), al igual que el voltímetro, mientras que el multímetro para medir la corriente se colocará siempre en serie.

Si bien este montaje se colocó sobre una vela para comprobar su funcionamiento a altas temperaturas, el estudio con la resistencia variable se realizó sobre la base calefactora para poder obtener distintos rangos de diferencias de temperaturas. Los resultados se exponen en las Figuras 58 a 63:

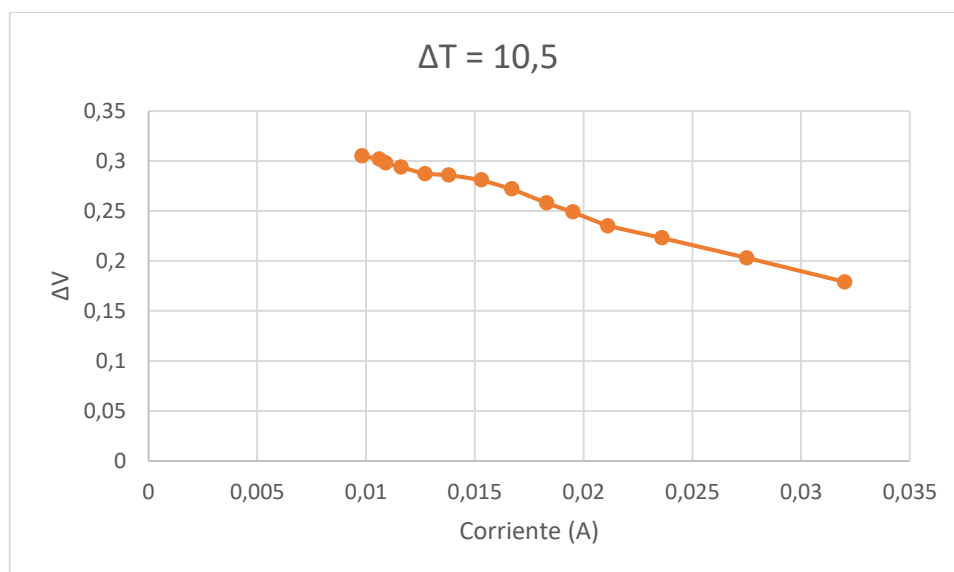


Figura 58: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 10,5 °C en el equipo con vela.

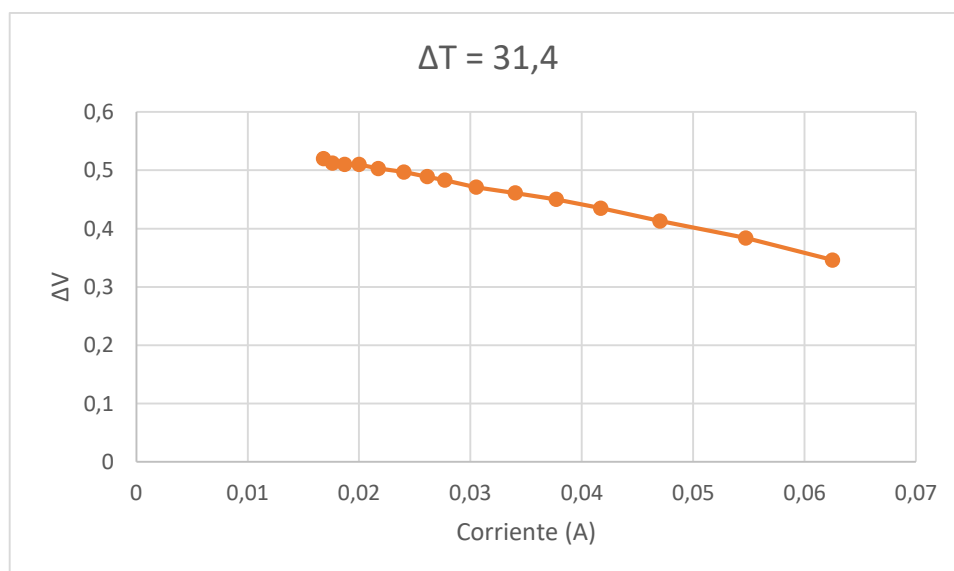


Figura 59: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 31,4 °C en el equipo con vela.

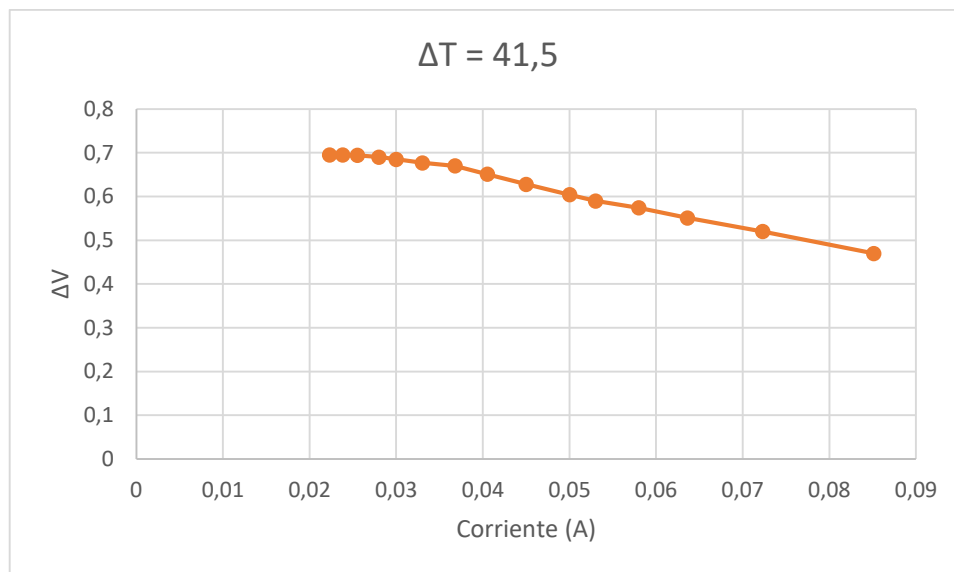


Figura 60: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 41,5 °C en el equipo con vela.

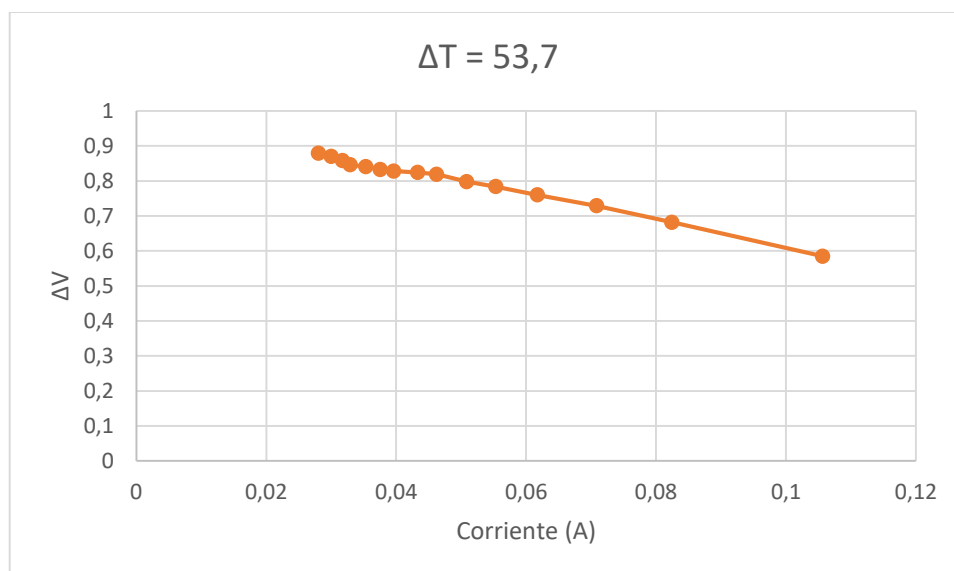


Figura 61: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 53,7 °C en el equipo con vela.

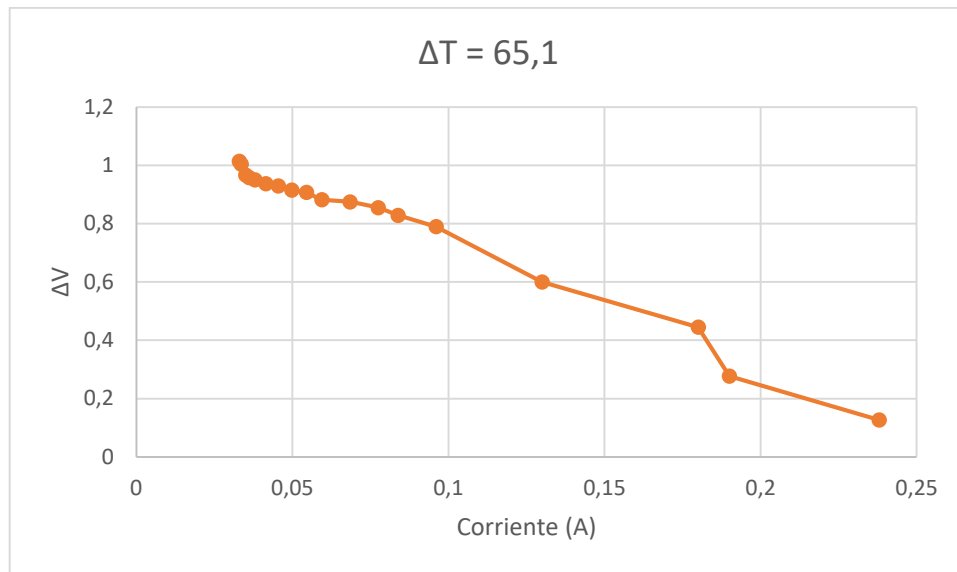


Figura 62: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 65,1 °C en el equipo con vela.

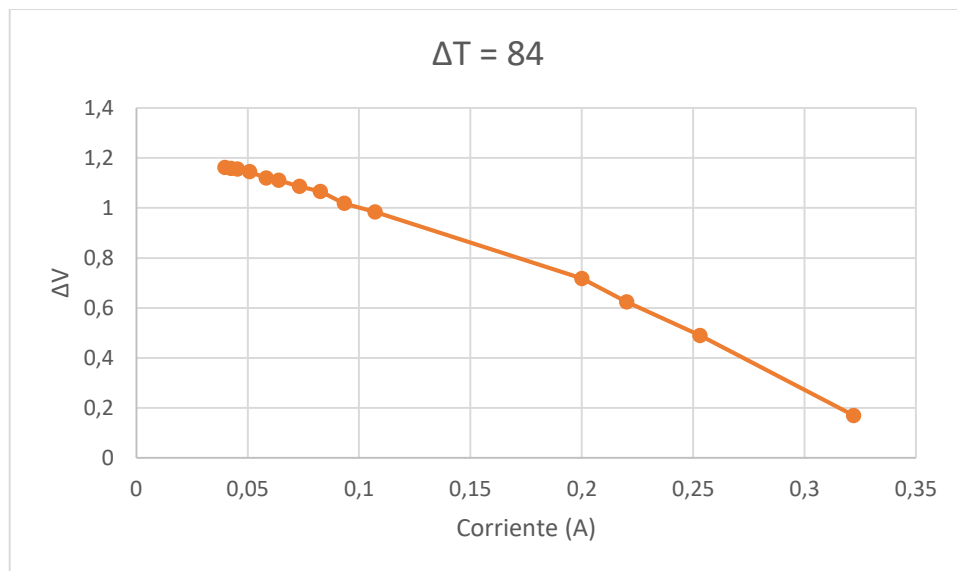


Figura 63: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 84 °C en el equipo con vela.

Las conclusiones que se pueden obtener son:

- Se obtiene una diferencia de 84 °C alcanzando una temperatura de 160,2 °C en la cara caliente de la célula. Esto significa que el ventilador es capaz de refrigerar la cara fría de la célula a la mitad de la temperatura de la otra cara en este rango de temperaturas elevado.
- La potencia que se puede obtener con una célula es aproximadamente 44 mW sin superar los 200 °C, si bien se puede obtener más de 1 V.
- La reducción de la diferencia de potencial conforme se aumenta la corriente exigida no es despreciable. Cuando se utilice el convertidor para alcanzar los 5 V a la salida, la carga de la batería será lenta ya que no se podrá exigir una corriente elevada.

- En torno a una diferencia de 15 °C comienza a funcionar el ventilador, lo que provoca que la temperatura en ambas caras disminuya. Esto ocurre cuando se alcanzan los 80 °C en la cara caliente, a partir de los que comienzan a disminuir las temperaturas de ambas caras por el ventilador. A partir de este punto, la temperatura en la base será aproximadamente 15 °C superior a la de la cara caliente, y será necesario superar los 100 °C en la base para calentar más la cara caliente.

El convertidor elevador necesita una tensión mínima en la entrada, pero no necesita una corriente de carga mínima. Sin embargo con corrientes muy reducidas también se ve afectado su funcionamiento. Con este equipo concluimos que podemos alcanzar los valores mínimos de tensión de convertidores elevadores típicos, que están entre los 0,5 y 3 V; pero la potencia que se obtiene es muy reducida debido a la pequeña corriente que se genera. En principio esto solo debería afectar a la velocidad con la que se cargan las baterías, y no al funcionamiento del convertidor. Sin embargo, en caso de querer encender luces o lámparas, que sí se requiere una potencia mínima en W, se necesitará un equipo capaz de suministrar una mayor potencia.

4.3.4. Equipo simple

Este montaje que he denominado “equipo simple” consiste en una célula Peltier con disipadores de calor en ambas caras, uno de ellos colocado en la parte superior dedicado a la refrigeración del foco frío con un ventilador de dron que iría alimentado por la propia célula justo encima. El otro disipador haría una función similar a una pata. Véase el equipo en la Figura 64:

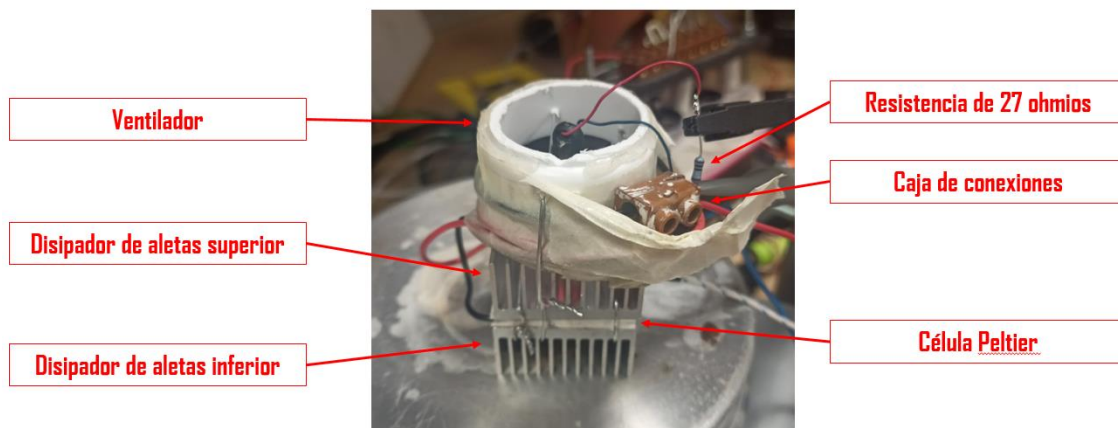


Figura 64: Componentes del equipo simple

Como se puede observar en la Figura 64, se colocó una resistencia de 27 Ω en la salida del ventilador para poder medir la corriente que exigía el ventilador en caso de que fuese necesario. Además, tras haber realizado los experimentos anteriores, se observó que aunque en algunos casos las células pudiesen generar una diferencia de potencial cercana a 1 V, la corriente generada no era muy elevada. Esto nos hizo corroborar que la generación de corriente era el limitante principal

de la potencia eléctrica. Si bien la potencia no es del todo necesaria para alimentar una batería, sí lo será para encender unas luces. Véase el circuito en la Figura 65:

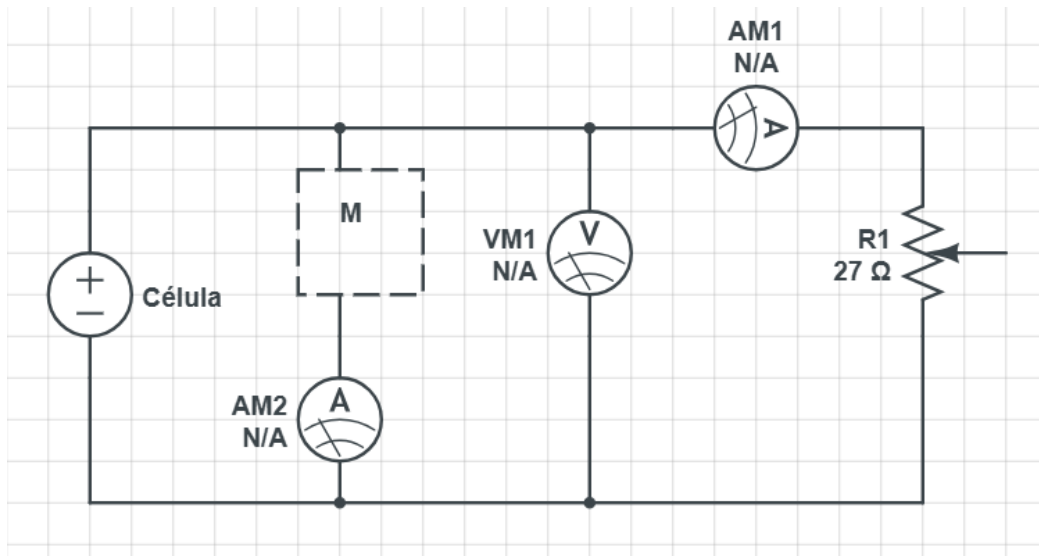


Figura 65: Circuito eléctrico del equipo simple

A diferencia del montaje anterior, en este experimento se quiso también estudiar la corriente exigida por el ventilador para conocer su influencia en la eficiencia del generador termoelectrico. Para ello, se colocó un multímetro en serie con el ventilador. El ventilador debe exigir más corriente a mayor diferencia de potencial, mientras que en la célula se debe observar el mismo comportamiento que en el experimento anterior, donde al modificar la resistencia variable reduciendo su valor, aumentábamos la corriente pero disminuíamos la tensión obtenida. Los resultados fueron los expuestos en las Figuras 66 a 73:

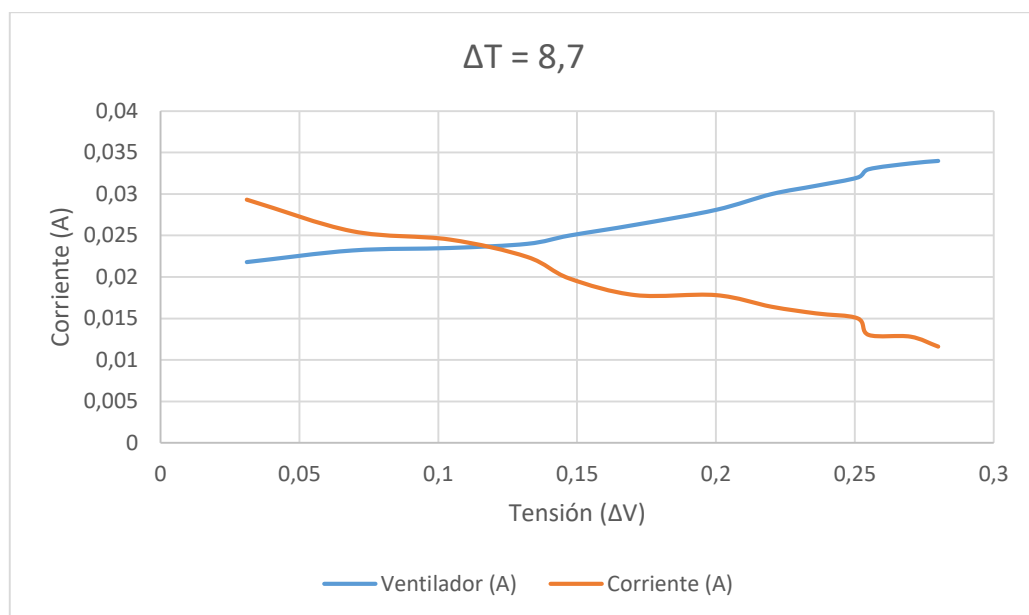


Figura 66: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 8,7 °C en el equipo simple

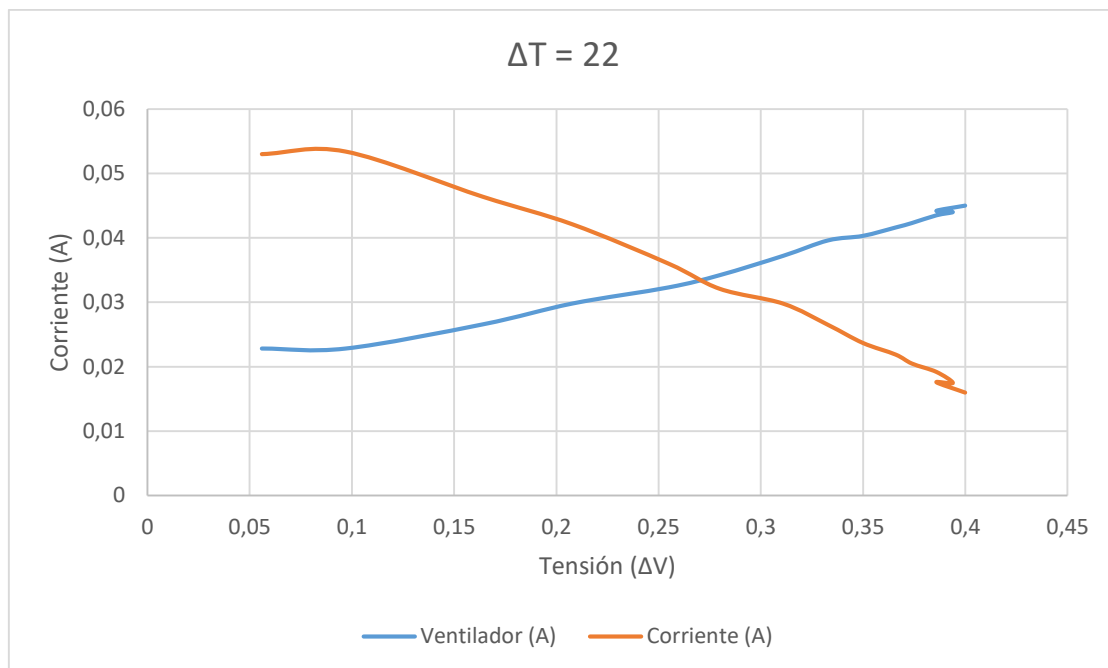


Figura 67: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 22 °C en el equipo simple

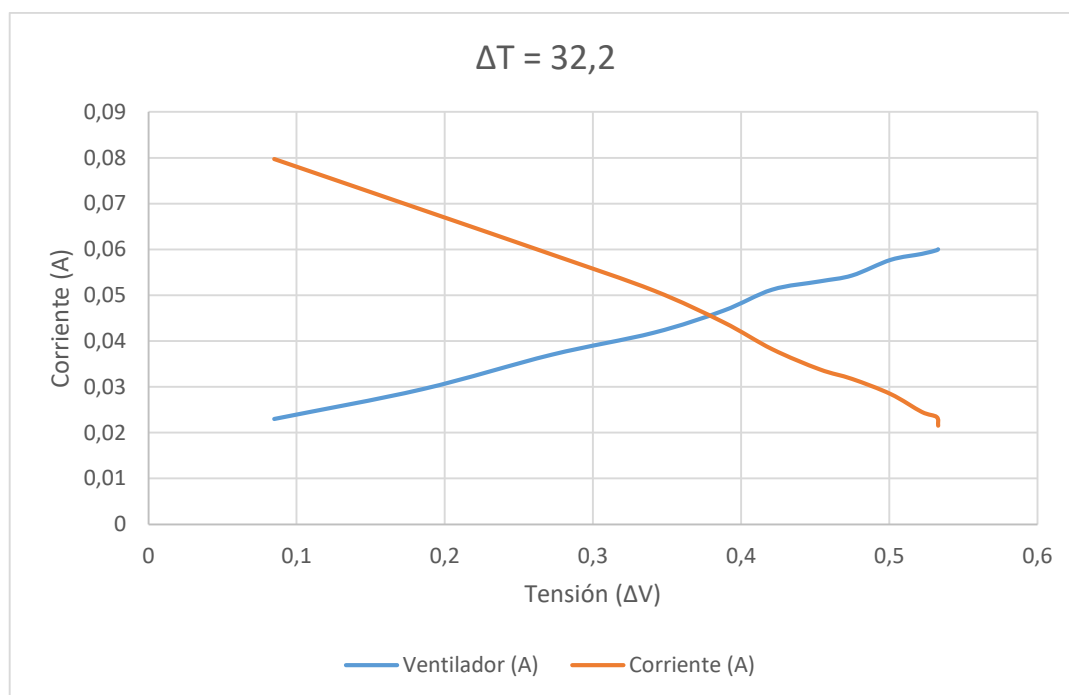


Figura 68: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 32,2 °C en el equipo simple

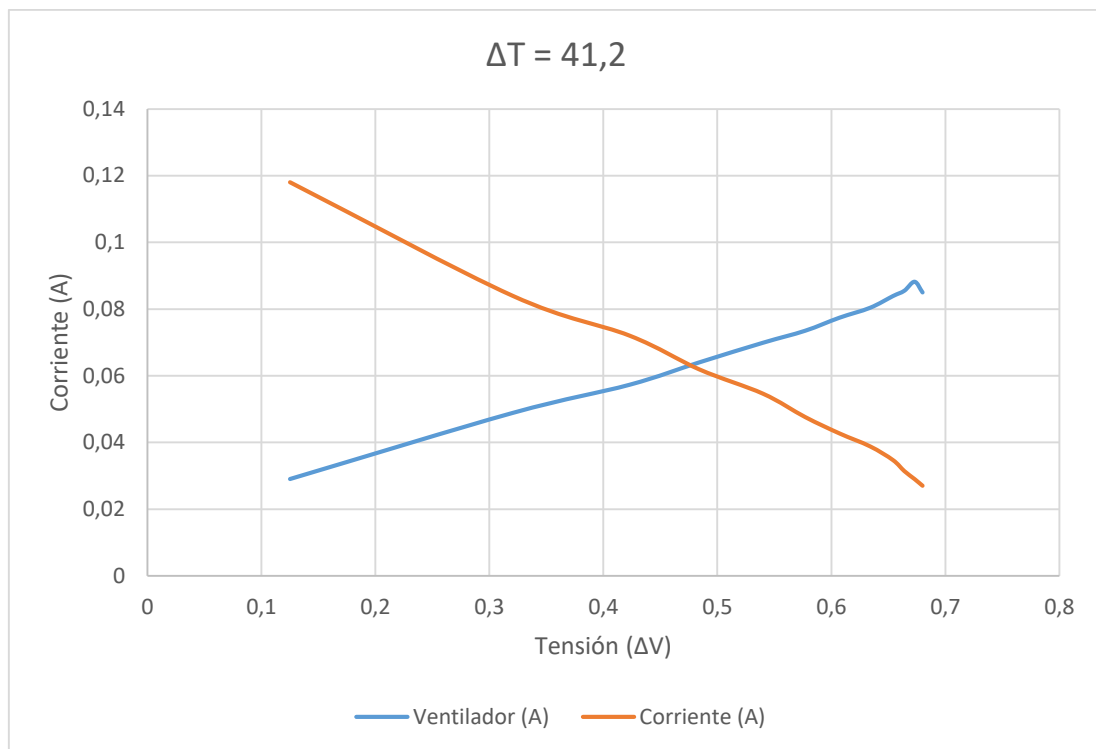


Figura 69: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 41,2 °C en el equipo simple

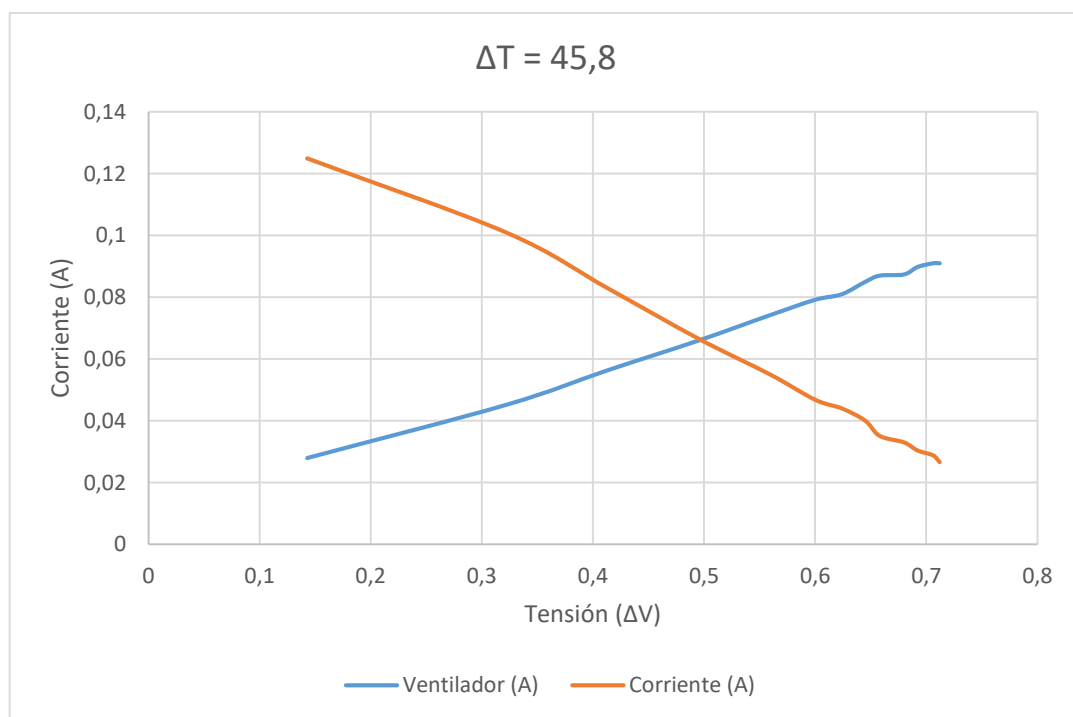


Figura 70: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 45,8 °C en el equipo simple

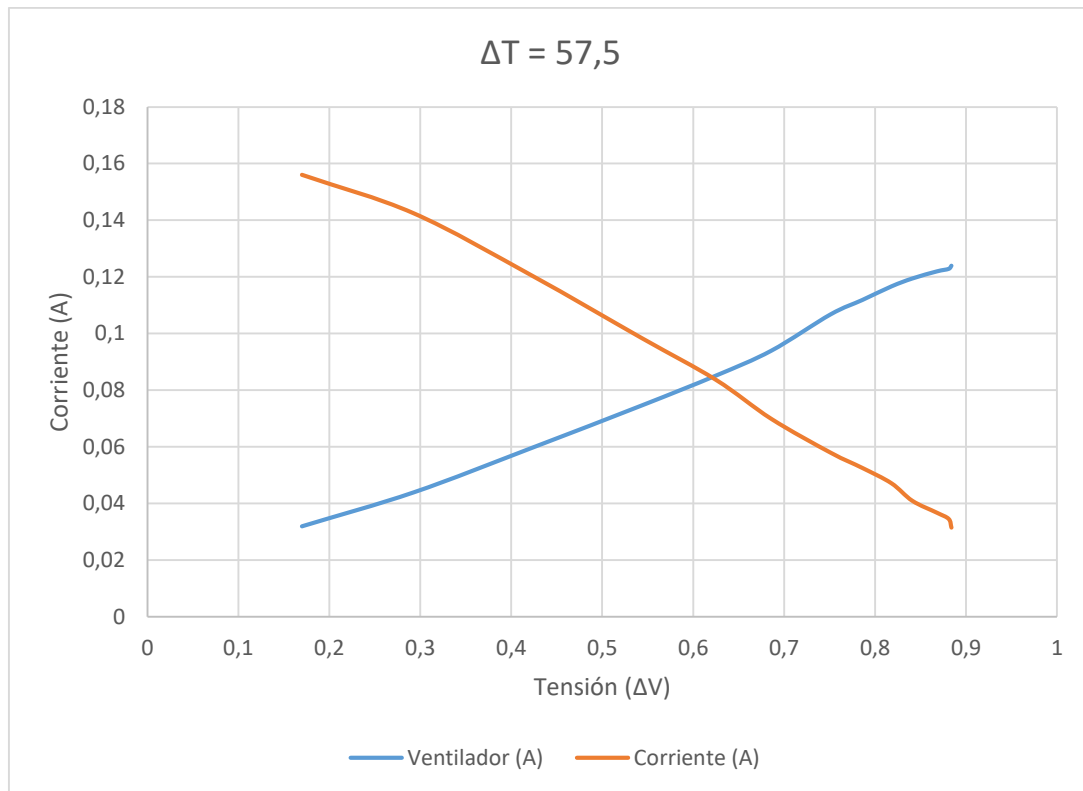


Figura 71: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 57,5 °C en el equipo simple

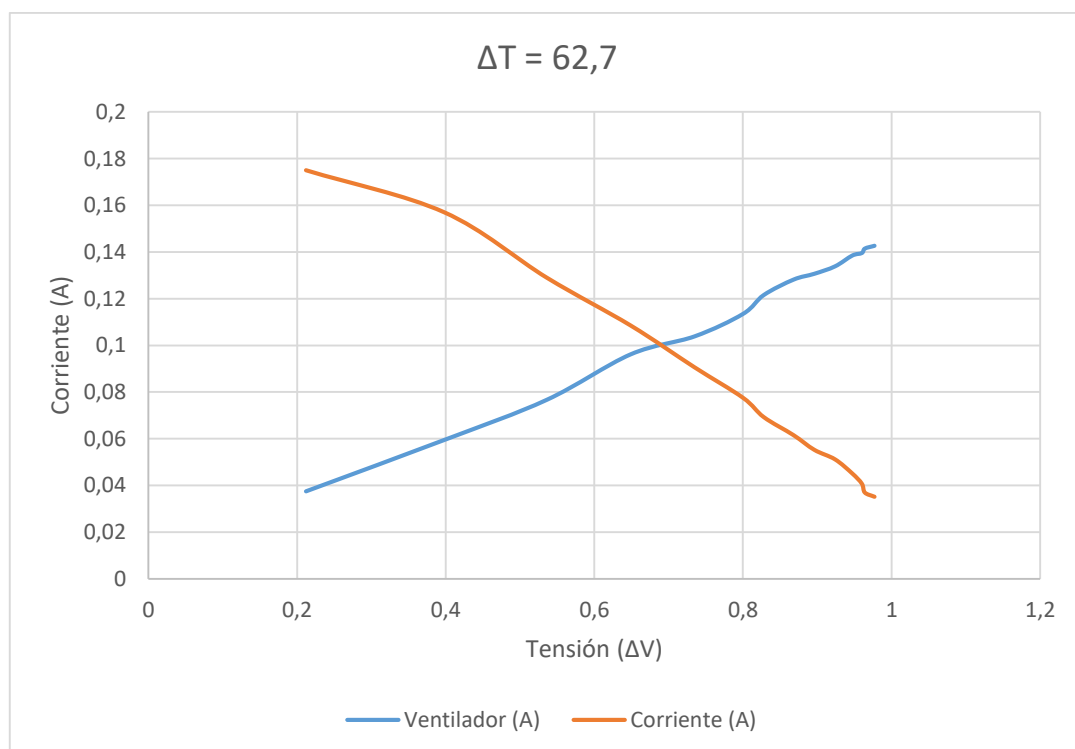


Figura 72: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 62,7 °C en el equipo simple

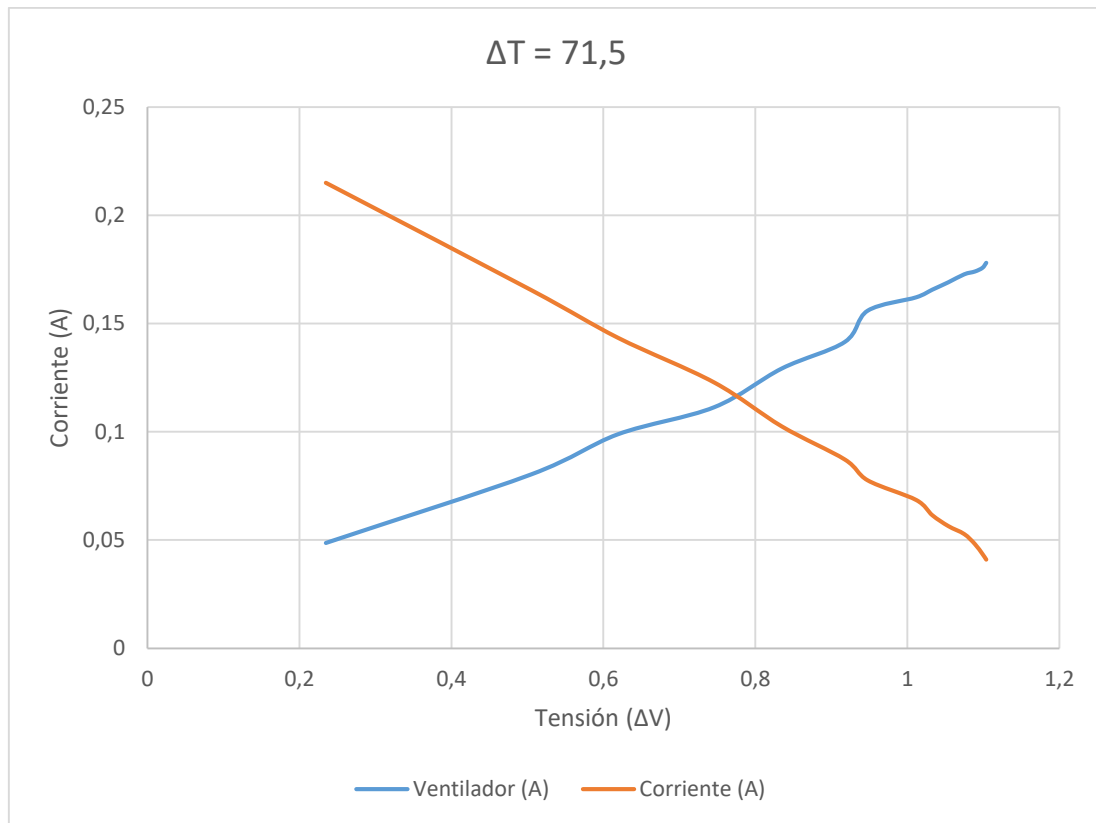


Figura 73: Relación entre diferencia de potencial y corriente para una ΔT de 71,5 °C en el equipo simple

Estos resultados muestran el compromiso entre la corriente y la tensión que proporciona una de las células Peltier mientras alimenta al ventilador. Deducimos que, para la corriente eléctrica que es capaz de suministrar la célula, la corriente exigida por el ventilador es relativamente elevada.

Por otra parte, el objetivo principal de este experimento es conocer esta relación entre la corriente y la tensión para poder seleccionar un convertidor de salida adecuado. Como se puede observar, para una temperatura del calentador superior a los 200 °C, obtenemos una diferencia de temperatura de 71,5 °C y una diferencia de potencial máxima de 1,1 V con una corriente de 0,041 A. Para un rango de tensión de 0,2 – 1,2 V y 0,05 – 0,215 A por célula, podemos elegir un convertidor considerando una configuración final de 4 ventiladores y 4 células, teniendo en cuenta que en esa configuración se podrá cambiar la distribución de las células entre paralelo o en serie. Considerando que se obtendrá al menos 1 V en la configuración final, se escogió el módulo convertidor elevador de Miravia [60], que requiere una entrada entre 0,5 V y 5 V y posee un puerto USB. Esto quiere decir que, en un principio, solo será necesario un módulo convertidor elevador y no uno elevador-reductor ya que no se espera superar los 5 V máximos.

4.3.5. Configuración final

Con el objetivo de caracterizar las células termoeléctricas para conocer su eficiencia, se preparó una configuración final de estudio basada en el trabajo de fin de grado de Hernán González Rojas [65]. Para estudiar la eficiencia de las células es necesario comparar la potencia calorífica que reciben con la que estas generan. La idea para poder realizar esta comparación consiste en utilizar dos resistencias variables calefactores que, introducidas en un compartimento aislado térmicamente, solo puedan transmitir el calor hacia la célula termoeléctrica.

Las medidas de temperatura se realizaron en los puntos (1), (2) y (3) que se muestran en Figura 74. A su vez, se midieron las tensiones y corrientes de las resistencias variables así como la tensión y corriente de la célula.

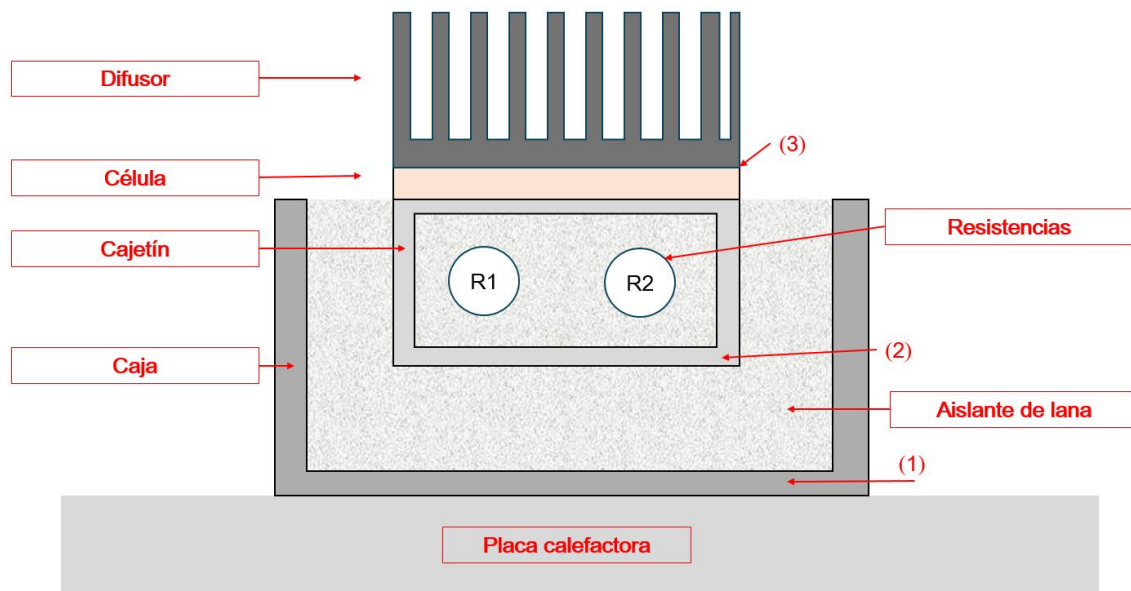


Figura 74: Esquema en sección de la configuración

Para asegurar la transmisión de calor hacia arriba, donde se encontraba la célula:

- Se introdujeron las resistencias variables en un pequeño cajetín metálico sobre el cual se colocaría la placa de aluminio que soportaría a la célula termoeléctrica.
- Se preparó una “caja” de metal con orificios a los lados en los que se introducen las resistencias en su cajetín. A través de los orificios salen los cables de las resistencias así como de los termómetros de termopares.
- Se llenó la caja de lana de roca (material térmicamente aislante) así como el cajetín, y se rodeó a las resistencias variables de este material para evitar la transmisión de calor por los lados.
- La caja se apoyó sobre la placa calefactora. Se obligó a que la temperatura seleccionada en la placa y la generada por las resistencias coincidiesen para

prevenir la transmisión de calor hacia abajo. Para comprobar que se igualaban estos valores, se midió la temperatura en la base de la caja metálica y en la base del cajetín metálico.

- Se estudió y comprobó que la medición de temperatura en cualquier cara del cajetín era válida, ya que la diferencia de temperatura entre la cara inferior y superior del cajetín estaba entre 0,5 y 1,5 °C.
- Sobre la placa de aluminio se colocó la célula termoelectrica, con un difusor encima y un ventilador de dron para refrigerar.

Se proporciona un esquema del montaje en la Figura 75:

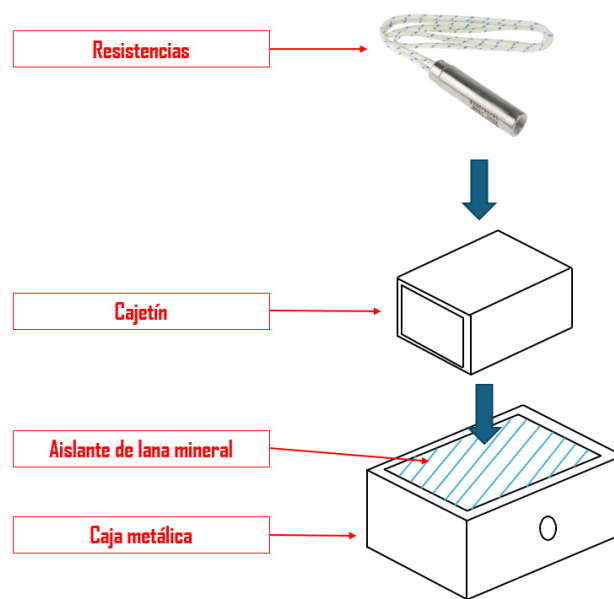


Figura 75: Esquema del montaje empleado para asegurar una transmisión de calor hacia arriba

En resumen, con la configuración preparada aseguramos transmisión de calor únicamente hacia la célula debido a que:

- La transmisión de calor a través de los lados se evita gracias al aislante de lana mineral.
- La transmisión de calor a través de la base se evita asegurando que la temperatura de la placa calefactora sea igual al foco de generación de calor que son las resistencias variables.
- Al estar el ambiente y la célula a menor temperatura, el calor se transmitirá hacia arriba como se ejemplifica en la Figura 76.

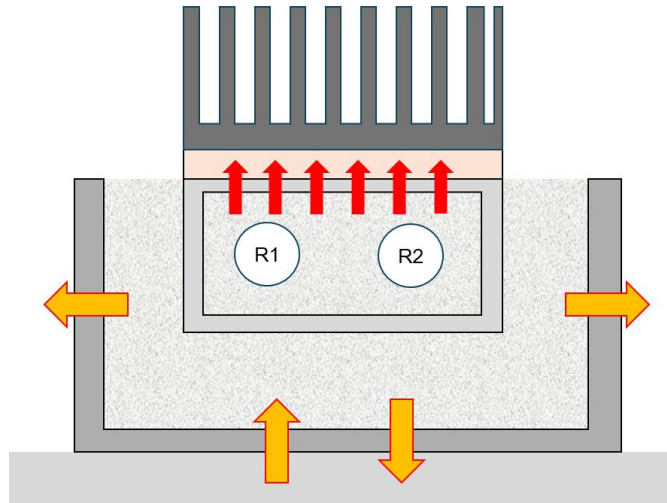


Figura 76: Transmisión de calor en la configuración final

La configuración final en la realidad se muestra en la Figura 77. Se pueden observar tanto el ventilador como los cables del mismo, de la célula, de las resistencias variables y de los termómetros de termopares. Además se colocó una barra metálica para asegurar la sujeción de la configuración que se puede ver atornillada a la caja metálica.

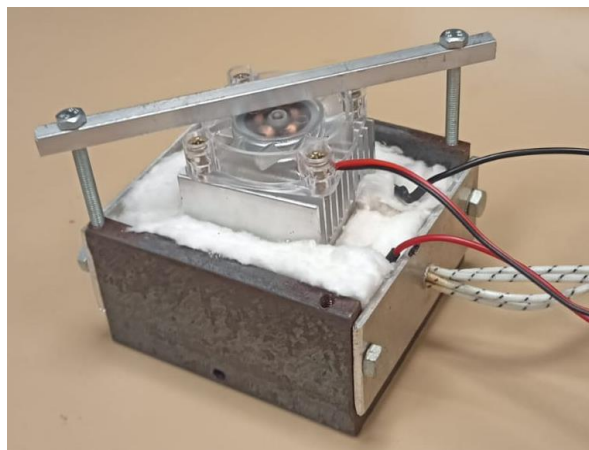


Figura 77: Configuración final

El estudio realizado con esta configuración se llevó a cabo tanto para la célula Peltier como para la célula Seebeck. Se obtuvo la potencia resultante de cada una de las células y se comparó con la suministrada por las resistencias variables para obtener la eficiencia.

4.3.5.1. Caracterización células Peltier

Los resultados para la célula Peltier para una determinada temperatura en la base y una diferencia de temperaturas generada son los expuestos en las Tablas 1 a 4.

Tabla 1: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 50,8$ y $T_{base} = 103,3$

$\Delta T = 50,8$			
ΔV	mA	mW	η (%)
0,41	13	5,33	0,12392467
0,4	13,6	5,44	0,12648221
0,39	14,6	5,694	0,13238782
0,388	15,6	6,0528	0,14073006
0,38	16,9	6,422	0,14931411
0,37	18	6,66	0,15484771
0,366	20,4	7,4664	0,17359684
0,354	23,5	8,319	0,19342013
0,344	26,3	9,0472	0,21035108
0,32	32,3	10,336	0,24031621
0,298	38,6	11,5028	0,26744478
0,264	46,2	12,1968	0,28358056
0,26	46,1	11,986	0,27867938

Tabla 2: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 74,6$ y $T_{base} = 152,2$

$\Delta T = 74,6$			
ΔV	mA	mW	η (%)
0,846	23,6	19,9656	0,2188011
0,734	24,8	18,2032	0,19948712
0,722	26,6	19,2052	0,21046795
0,714	28,5	20,349	0,22300274
0,7	31,1	21,77	0,23857534
0,686	33,6	23,0496	0,25259836
0,672	36,9	24,7968	0,27174575
0,66	39,9	26,334	0,28859178
0,646	44,3	28,6178	0,31361973
0,614	49,7	30,5158	0,33441973
0,582	58,4	33,9888	0,37248
0,542	66,8	36,2056	0,3967737
0,514	74,1	38,0874	0,41739616
0,482	82,3	39,6686	0,43472438

Tabla 3: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 102,7$ y $T_{base} = 205,5$

$\Delta T = 102,7$			
ΔV	mA	mW	η (%)
1,064	33,6	35,7504	0,24993289
1,052	35,2	37,0304	0,25888143
1,046	37,3	39,0158	0,27276147
1,044	39,1	40,8204	0,28537752
1,03	41,9	43,157	0,30171281
1,012	45,3	45,8436	0,32049497
0,986	49,1	48,4126	0,33845498
0,96	55,2	52,992	0,3704698
0,928	61,4	56,9792	0,39834452
0,888	69	61,272	0,4283557
0,844	79,1	66,7604	0,46672539
0,786	91,5	71,919	0,50278943
0,73	103,1	75,263	0,52616751
0,68	111,4	75,752	0,52958613

Tabla 4: Caracterización célula Peltier para $\Delta T = 130,2$ y $T_{base} = 256,1$

$\Delta T = 130,2$			
ΔV	mA	mW	η (%)
1,28	40,3	51,584	0,26810811
1,264	42,2	53,3408	0,27723909
1,252	44,9	56,2148	0,29217672
1,228	48,2	59,1896	0,30763825
1,212	52,3	63,3876	0,32945738
1,2	55,3	66,36	0,34490644
1,16	62,3	72,268	0,37561331
1,1	70,8	77,88	0,4047817
1,052	82,7	87,0004	0,45218503
1,02	89,1	90,882	0,47235967
0,972	98,2	95,4504	0,49610395
0,93	106,4	98,952	0,51430353
0,88	116,7	102,696	0,53376299
0,82	129	105,78	0,5497921

Podemos observar unos valores de potencia que apenas alcanzan los 100 mW y una eficiencia máxima de 0,55 %.

4.3.5.2. Caracterización células Seebeck

Los resultados para la célula Peltier para una determinada temperatura en la base y una diferencia de temperaturas generada son los expuestos en las Tablas 5 a 9.

Tabla 5: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 26,5$ y $T_{base} = 72,3$

$\Delta T = 26,5$			
ΔV	mA	mW	η (%)
0,336	10,43	3,50448	0,09241772
0,332	10,9	3,6188	0,09543249
0,328	11,61	3,80808	0,10042405
0,316	12,3	3,8868	0,1025
0,314	13,75	4,3175	0,11385812
0,308	15,18	4,67544	0,12329747
0,3	18,13	5,439	0,14343354
0,294	20,6	6,0564	0,15971519
0,284	23,9	6,7876	0,17899789
0,268	28,1	7,5308	0,19859705
0,252	33,1	8,3412	0,21996835
0,246	35,2	8,6592	0,22835443
0,234	38,9	9,1026	0,24004747

Tabla 6: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 39,1$ y $T_{base} = 110,8$

$\Delta T = 39,1$			
ΔV	mA	mW	η (%)
0,59	18,28	10,7852	0,17112846
0,58	19,71	11,4318	0,18138804
0,57	20,9	11,913	0,18902323
0,564	22,6	12,7464	0,20224676
0,558	24,8	13,8384	0,2195735
0,55	28,1	15,455	0,24522404
0,538	31	16,678	0,26462935
0,522	33,5	17,487	0,27746573
0,506	36,7	18,5702	0,29465283
0,494	41,3	20,4022	0,32372112
0,47	47	22,09	0,3505014
0,44	55,8	24,552	0,38956588
0,404	67,2	27,1488	0,43076923

Tabla 7: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 93,6$ y $T_{base} = 157,2$

$\Delta T = 93,6$			
ΔV	mA	mW	η (%)
0,988	30,9	30,5292	0,29217341
0,966	33	31,878	0,30508183
0,952	35,4	33,7008	0,32252656
0,932	39,4	36,7208	0,35142884
0,912	45	41,04	0,39276486
0,884	50,1	44,2884	0,423853
0,862	56,6	48,7892	0,46692698
0,832	62,2	51,7504	0,49526653
0,804	67,8	54,5112	0,5216882
0,75	77,7	58,275	0,55770887
0,71	87,3	61,983	0,59319552
0,666	96,1	64,0026	0,61252369
0,636	105,1	66,8436	0,63971289

Tabla 8: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 127$ y $T_{base} = 207,3$

$\Delta T = 127$			
ΔV	mA	mW	η (%)
1,34	42,5	56,95	0,34823285
1,338	45,8	61,2804	0,374712
1,324	49,4	65,4056	0,39993641
1,3	53,6	69,68	0,42607313
1,286	57,3	73,6878	0,45057967
1,262	61,9	78,1178	0,47766785
1,234	68,3	84,2822	0,51536138
1,202	75,3	90,5106	0,55344625
1,174	81,4	95,5636	0,58434389
1,144	88,2	100,9008	0,61697933
1,104	97,3	107,4192	0,65683747
1,044	114,1	119,1204	0,72838694
0,966	131,4	126,9324	0,77615507
0,91	140,4	127,764	0,78124006

Tabla 9: Caracterización célula Seebeck para $\Delta T = 161,7$ y $T_{base} = 258,8$

$\Delta T = 161,7$			
ΔV	mA	mW	η (%)
1,7	54,4	92,48	0,42337537
1,662	57,6	95,7312	0,43825944
1,64	62,2	102,008	0,46699476
1,614	66,3	107,0082	0,48988578
1,586	70,6	111,9716	0,51260833
1,544	78	120,432	0,55134022
1,51	85,8	129,558	0,59311923
1,47	95,9	140,973	0,64537734
1,44	104,4	150,336	0,68824135
1,386	115,8	160,4988	0,73476686
1,32	129,7	171,204	0,78377549
1,252	142,2	178,0344	0,81504521
1,18	152,5	179,95	0,82381486
1,122	165	185,13	0,84752901

Aunque superiores a los obtenidos con la célula Peltier, los valores de potencia siguen siendo muy reducidos, próximos a los 200 mW máximos, y la eficiencia de conversión de potencia térmica en eléctrica aún no alcanza el 1%, alcanzando un máximo de 0,85%.

4.3.5.3. Conclusiones

Con estos resultados deducimos los valores aproximados que podemos obtener de tensión, corriente y potencia por célula para una determinada temperatura en la base. De esta manera, sabiendo las temperaturas que se alcanzan en cualquier sitio o equipo donde se coloquen estas células (horno, estufa...), podemos determinar la tensión y potencia eléctrica que suministran.

También deducimos que los valores de corriente y, por consiguiente, potencia eléctrica son muy reducidos. La eficiencia de la conversión de potencia también es muy reducida, sin llegar a alcanzar el 1% experimentalmente. De acuerdo a la información suministrada por el fabricante, esta debería alcanzar el 2-3 %.

Es plausible que las condiciones en las que se ha realizado este estudio no repliquen con exactitud la teoría en la que se basan o que existan otras inexactitudes en el proceso de experimentación. A continuación se explican algunos motivos por los que se obtienen eficiencias tan reducidas experimentalmente:

- Aunque esta configuración se haya preparado para evitar pérdidas caloríficas a través de las paredes laterales y la base, los aislamientos térmicos de lana mineral pueden no haber

evitado toda la pérdida de calor por los laterales. Además, para evitar las pérdidas por la base, se ha manipulado manualmente tanto la potencia suministrada a las células variables como la temperatura seleccionada para la base. Es improbable que se haya conseguido alcanzar exactamente la misma temperatura en la base del cajetín y en la placa calefactora, por lo que también son esperables pequeñas pérdidas caloríficas a través de la base.

- Dado que con las células termoelectricas se trabaja con tensiones y corrientes reducidas, también se está trabajando con resistencias reducidas como es la resistencia variable de $27\ \Omega$. No hay carga del ventilador dado que este se alimenta externamente con una fuente de tensión. Cabe la posibilidad de que estas cargas no estén exigiendo la corriente máxima que puede suministrar la célula, y por ello la potencia eléctrica final y la eficiencia no son todo lo elevado que podrían llegar a ser.
- Todo dispositivo electrónico alcanza su eficiencia máxima en un determinado punto de trabajo, y generalmente este punto suele ser el de mayor demanda o exigencia eléctrica. Siguiendo la línea de razonamiento del punto anterior, al no exigir el máximo posible a la célula, puede que esté trabajando a un rendimiento inferior al óptimo, que es el que suministran los fabricantes. Esto también es aplicable al convertidor elevador del prototipo final.

5. Modelo Desarrollado

Tras haber realizado los experimentos previos se alcanzaron diferentes objetivos:

- Conocer los valores aproximados de tensión y potencia que queremos obtener.
- Optar por una configuración que utilice 4 células termoeléctricas para alcanzar mayores diferencias de potencial.
- Seleccionar y comprar la mayoría de materiales necesarios para montar el equipo:
 - o Células Seebeck
 - o Módulo convertidor elevador
 - o Ventiladores
 - o Batería
 - o Disipadores de calor de aletas
- Considerar necesario una pata para proteger al prototipo de temperaturas excesivas

Se ha deducido la eficiencia de las células Seebeck y su capacidad para diferentes rangos de temperatura y distintas temperaturas en su cara caliente, por lo que resulta conveniente deducir un modelo matemático que considere la influencia de la pata. Es decir, conociendo la temperatura a la que estaría el foco caliente en el que colocaríamos la pata, poder deducir la potencia eléctrica que suministraría el equipo.

5.1. Cálculos de transmisión de calor en la pata

Para realizar el cálculo de transmisión de calor en el pie o pata del equipo se estudiaron los ejemplos expuestos en “A heat transfer textbook” de John H. Lienhard IV [66] y “Transferencia de calor y masa” de Yunus A. Çengel [67]. El esquema de pata considerado se muestra en la Figura 78:

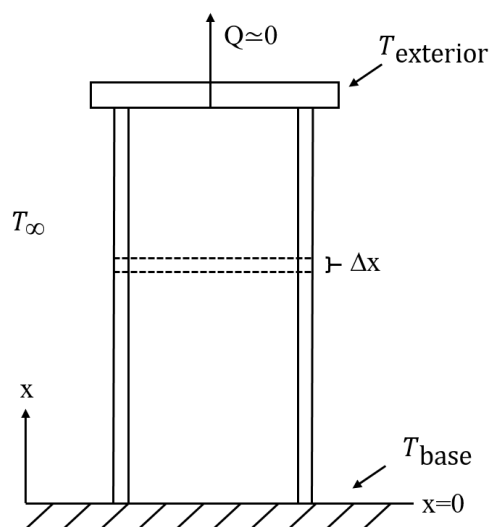


Figura 78: Pata rectangular considerada como aleta

El cálculo desarrollado es aplicable para un pie tubular, cuadrado (l) o redondo (r). Se consideran tres temperaturas diferentes: la temperatura de la base, la temperatura ambiente y la temperatura en un punto determinado de la pata (T_x). Se considerará que la pata es adiabática en su extremo superior y que la pata sufrirá pérdidas de calor por convección y conducción, pero no por radiación. Para una sección de pata cualquiera, esquematizada en la Figura 79, se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

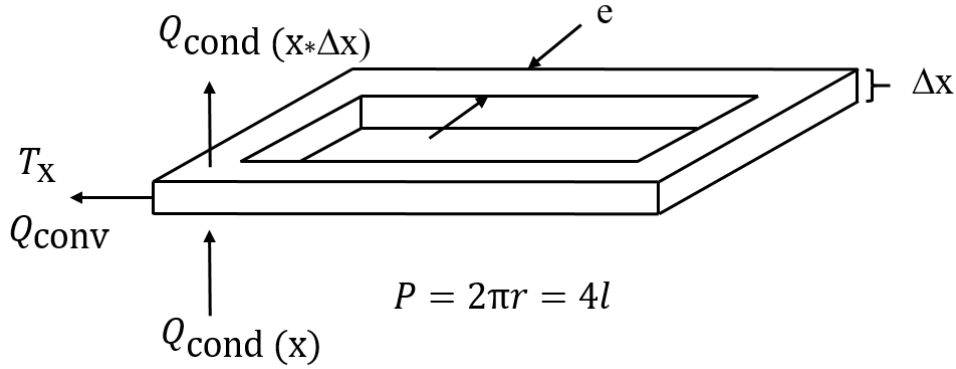


Figura 79: Sección de la pata

Aplicando la ecuación de equilibrio:

$$Q_{cond}(x) = Q_{cond}(x+dx) + Q_{conv} \quad (7)$$

Conociendo la ecuación de transmisión de calor por convección:

$$Q_{conv} = h \cdot (p \cdot \Delta x) \cdot (T_x - T_{\infty}) \quad (8)$$

Donde:

h = coeficiente de convección

p = perímetro

Sustituyendo en la ecuación (7):

$$Q_{cond}(x) = Q_{cond}(x+dx) + h \cdot (p \cdot \Delta x) \cdot (T_x - T_{\infty}) \quad (9)$$

Dividiendo por Δx :

$$\frac{Q_{cond}(x+dx) - Q_{cond}(x)}{\Delta x} + h \cdot p \cdot (T_x - T_{\infty}) = 0 \quad (10)$$

Considerando el límite cuando Δx tiende a 0:

$$\frac{\partial Q_{cond}}{\partial x} + h \cdot p \cdot (T_x - T_{\infty}) = 0 \quad (11)$$

Por otro lado, la Ley de Fourier establece que:

$$Q_{cond} = -k \cdot A_c \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \quad A_c = p \cdot e \quad (12)$$

Donde:

A_c = sección transversal

e = espesor de la sección

Por lo tanto, para la ecuación (11) se deduce que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot A_c \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) - h \cdot p \cdot (T_x - T_\infty) = 0 \quad (13)$$

Para una ecuación diferencial en la que se estudie una sección transversal y conductividad térmica constantes, se deduce que [67]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - a^2 \theta = 0 \quad (14)$$

Donde:

$$a^2 = \frac{h \cdot p}{k \cdot A_c}; \quad m = a = \sqrt{\frac{h \cdot p}{k \cdot A_c}} \quad (15)$$

Y:

$$\theta_x = T_x - T_\infty \quad (16)$$

En la base del pie sería: $\theta_b = T_b - T_\infty$

Aplicando la teoría de las ecuaciones diferenciales para una ecuación diferencial lineal, homogénea, de segundo orden y constantes específicas [67]:

$$\theta_{(x)} = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx} \quad (17)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes que se deben deducir. Para ello, se empieza considerando que en la base $x = 0$.

$$\begin{aligned} \theta_{(0)} &= \theta_b = C_1 + C_2 \\ C_1 &= \theta_b - C_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Considerando que el calor en la punta es muy pequeño comparado con el transferido al ambiente a lo largo del pie, en la punta de este se deduce que para $x = L$:

$$Q_{x=L} = 0; \quad ; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

Aplicado a la ecuación (17):

$$\frac{\partial \theta_{(x)}}{\partial x} = m \cdot C_1 \cdot e^{mx} - m \cdot C_2 \cdot e^{-mx} \quad (20)$$

Para $x = L$:

$$0 = m \cdot C_1 \cdot e^{mL} - m \cdot C_2 \cdot e^{-mL} \quad (21)$$

$$C_1 \cdot e^{mL} = C_2 \cdot e^{-mL}$$

Aplicando la ecuación (18):

$$(\theta_b - C_2) \cdot e^{mL} = C_2 \cdot e^{-mL} \quad (22)$$

$$\theta_b \cdot e^{mL} - C_2 \cdot e^{mL} = C_2 \cdot e^{-mL}$$

$$C_2 \cdot (e^{mL} + e^{-mL}) = \theta_b \cdot e^{mL}$$

$$C_2 = \frac{\theta_b \cdot e^{mL}}{e^{mL} + e^{-mL}}$$

Además:

$$C_1 = -\frac{\theta_b \cdot e^{mL}}{e^{mL} + e^{-mL}} + \theta_b \quad (23)$$

Sustituyendo en la ecuación (17):

$$\theta_{(x)} = -\frac{\theta_b \cdot e^{mL}}{e^{mL} + e^{-mL}} + \theta_b \cdot e^{mx} + \frac{\theta_b \cdot e^{mL}}{e^{mL} + e^{-mL}} \cdot e^{-mx} \quad (24)$$

Conociendo la siguiente definición:

$$\operatorname{csch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (25)$$

Aplicando la ecuación (16), la ecuación (17) se puede desarrollar ahora hasta conseguir la ecuación final de distribución de temperaturas:

$$\frac{\theta_x}{\theta_b} = \frac{e^{mL} \cdot e^{mx} + e^{mx} \cdot e^{-mL} - e^{mL} \cdot e^{mx} + e^{mL} \cdot e^{-mx}}{2 \cdot \operatorname{csch}(mL)} \quad (26)$$

$$\frac{\theta_x}{\theta_b} = \frac{e^{-m(L-x)} + e^{m(L-x)}}{2 \cdot \operatorname{csch}(mL)}$$

$$\frac{\theta_x}{\theta_b} = \frac{2 \cdot \operatorname{csch}(m(L-x))}{2 \cdot \operatorname{csch}(mL)}$$

Finalmente deducimos que la distribución de temperaturas es:

$$\theta_x = (T_x - T_\infty) = (T_b - T_\infty) \cdot \frac{\operatorname{csch}(m(L-x))}{\operatorname{csch}(mL)} \quad (27)$$

El calor Q evacuado en toda la aleta se puede determinar a través de la Ley de Fourier en la base del pie:

$$Q = -k \cdot A_c \cdot \frac{\partial(T - T_\infty)}{\partial x}; \quad \text{para } x = 0 \quad (28)$$

Multiplicando la ecuación (28) por $L/k \cdot A_c \cdot (T_b - T_\infty)$ y sustituyendo en ella la ecuación (27), obtenemos [66]:

$$\frac{Q_b}{k \cdot A_c \cdot (T_b - T_\infty)} = mL \cdot \frac{\sinh(mL)}{\cosh(mL)} = mL \cdot \tanh(mL) \quad (29)$$

$$\frac{Q_b}{\sqrt{k \cdot A_c \cdot h \cdot p \cdot (T_b - T_\infty)}} = \tanh(mL) \quad (30)$$

5.1.1. Convección natural, coeficiente global de transmisión h

Para el cálculo del coeficiente global de transmisión por convección (h), se utilizarán las tablas y definiciones típicas para los números de Nusselt (Nu), Grashof (G_{rl}), Prandtl (Pr) y Rayleigh (R_{al}) [67].

El número de Rayleigh (R_{al}) se define como:

$$R_{al} = G_{rl} \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (31)$$

El número de Nusselt (Nu) se define como:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} = C \cdot (G_{rl} \cdot Pr)^n = C \cdot R_{al}^n \quad (32)$$

El valor de C depende de la configuración geométrica, siendo siempre menor que 1. El valor de “n” depende del régimen del flujo (1/4 para flujo laminar y 1/3 para flujo turbulento). Las tablas de correlaciones extraídas de la bibliografía se muestran en las Figuras 80 y 81:

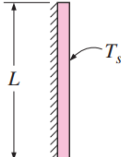
Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	$10^4 - 10^9$ $10^9 - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59 Ra_L^{1/4}$ $Nu = 0.1 Ra_L^{1/3}$ $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (compleja pero más exacta)

Figura 80: Correlaciones para el número de Nusselt de Yunus A. Cengel [67].

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073

Figura 81: Propiedades del aire a 1 atm de Yunus A.Cengel [67].

5.2. Análisis con cámara termográfica para distintas patas

Para emplear las tablas de propiedades es necesario calcular una temperatura media del aire que se define como:

$$T_F = \frac{T_{s\ media} + T_{\infty}}{2} \quad (33)$$

Donde $T_{s\ media}$ es la temperatura media en la superficie lateral de la pata. Esta temperatura de la superficie que se empleará en los cálculos se obtuvo mediante el uso de una cámara termográfica.

Se utilizó una cámara termográfica con la que se pudieron caracterizar térmicamente las dos patas construidas para el prototipo final. La pata construida como modelo para un futuro producto que se puede comercializar y como modelo para los cálculos finales se muestra en la Figura 82:



Figura 82: Pata del equipo final

Se tomaron fotografías para unas temperaturas de la placa calefactora de 100 °C y 150 °C que se muestran en las Figuras 83 y 84:

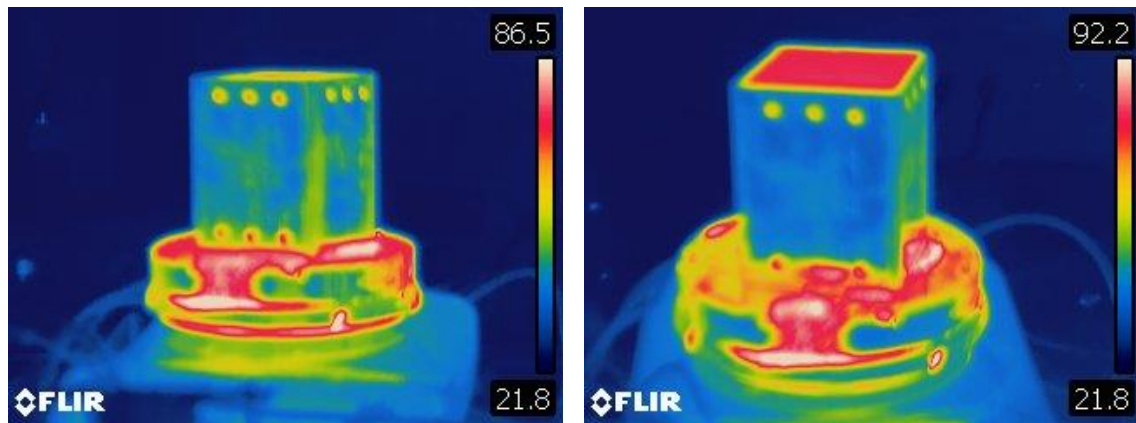


Figura 83: Fotografías para la pata final a 100 °C en la base.

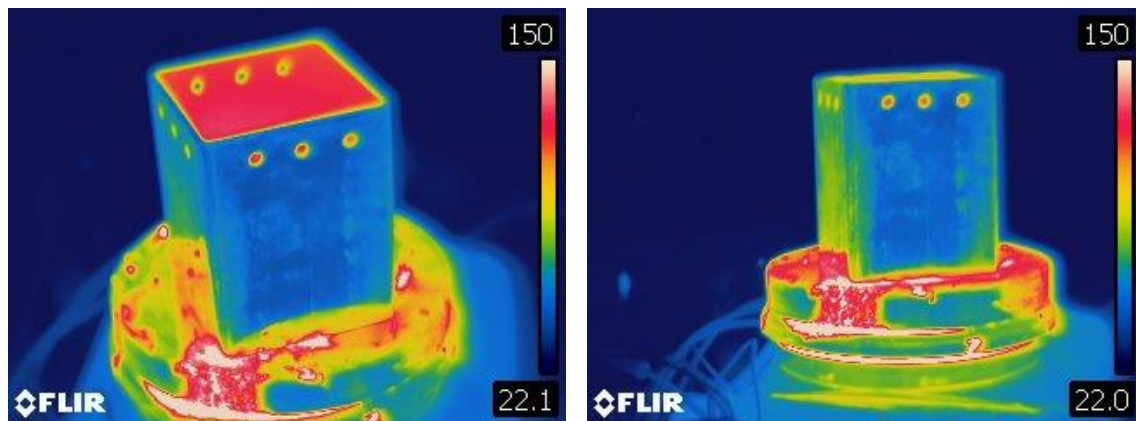


Figura 84: Fotografías para la pata final a 150 °C en la base.

Basándonos en lo observado en las fotografías para el último caso, se considerarán 90 °C como temperatura media en la superficie de la pata para una temperatura de 150 °C en la base. Observamos como en las caras exteriores de la pata la temperatura es prácticamente igual a la del ambiente, mientras que en las caras interiores está entre los 100 y 140 °C.

Adicionalmente, se preparó otra pata de mayor longitud pero de menor área en su extremo superior, por lo que no sería posible colocar el prototipo final sobre la misma. Por consiguiente, se montó un equipo similar el denominado “equipo con vela” sobre su cara superior. Este montaje consistió en una placa de aluminio, una célula Peltier, un difusor y un ventilador. Véase el montaje en la Figura 85

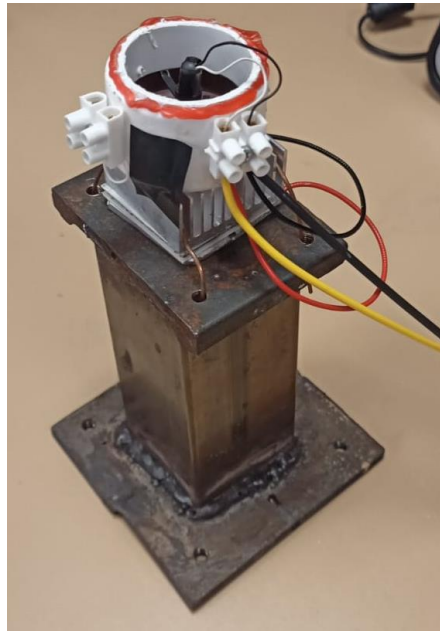


Figura 85: Pata alargada

Los resultados con la cámara termográfica se muestran en la Figura 86. Se puede observar como la temperatura a lo largo de la pata es mucho más reducida que en su base, y en la cara superior se alcanza aproximadamente 60 °C. Con este estudio se puede concluir que ambas patas son capaces de reducir la temperatura lo suficiente como para que los componentes electrónicos no sufran daños a estas temperaturas de trabajo.

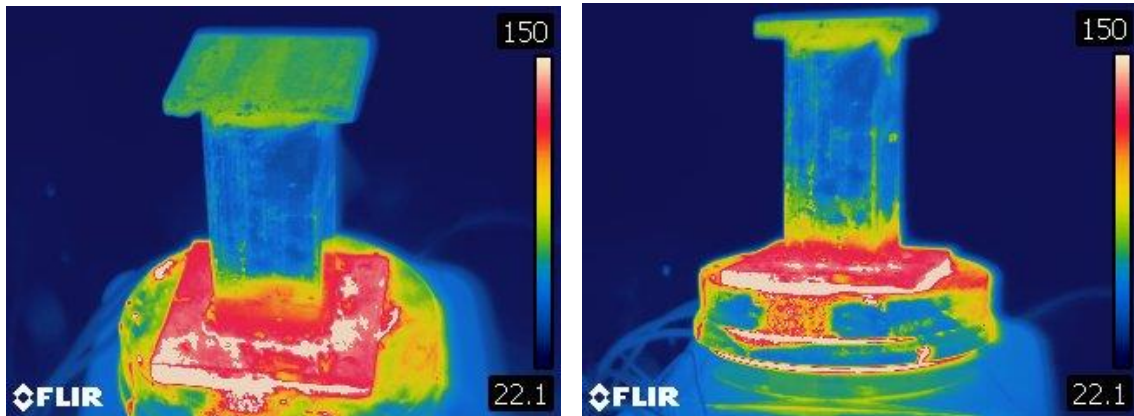


Figura 86: Fotografías para la pata alargada a 150 °C en la base.

Se intentaron realizar medidas y tomar fotografías de esta pata junto con el montaje sobre su cara superior para estudiar su eficacia. A continuación se muestran las imágenes y los resultados en las Figuras 87 a 90:

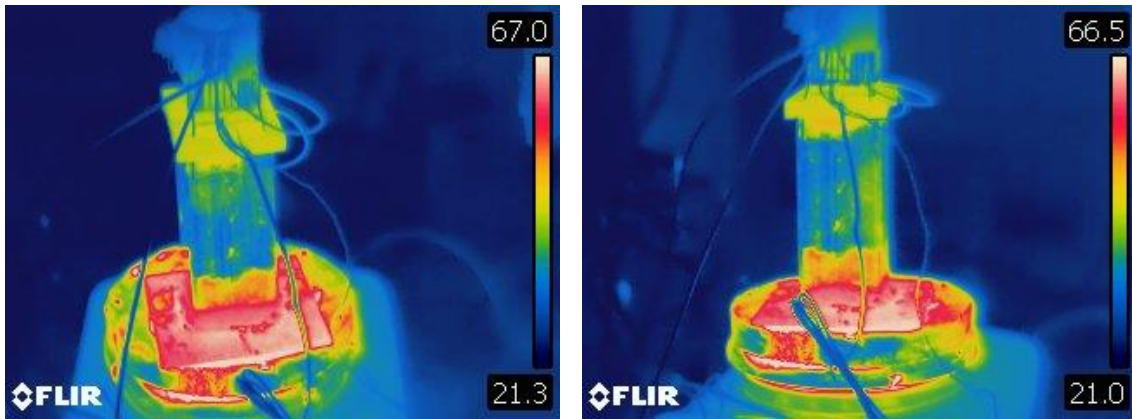


Figura 87: Fotografías para el montaje sobre la pata alargada a 100 °C en la base.

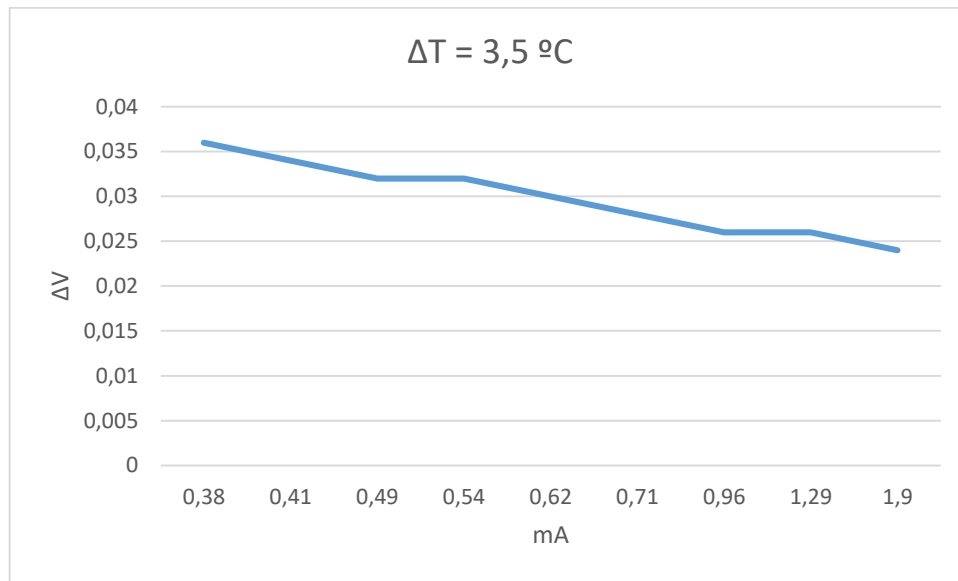


Figura 88: Resultados para el montaje sobre la pata alargada a 100 °C en la base.

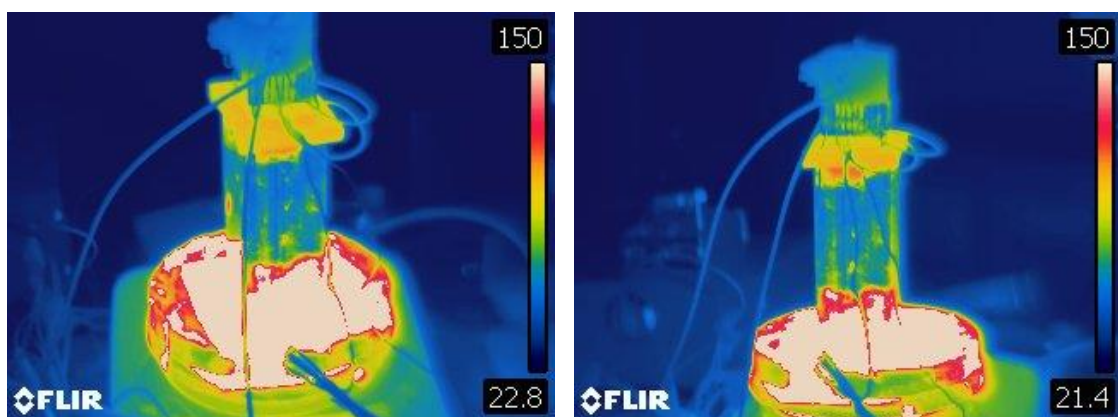


Figura 89: Fotografías para el montaje sobre la pata alargada a 150 °C en la base.

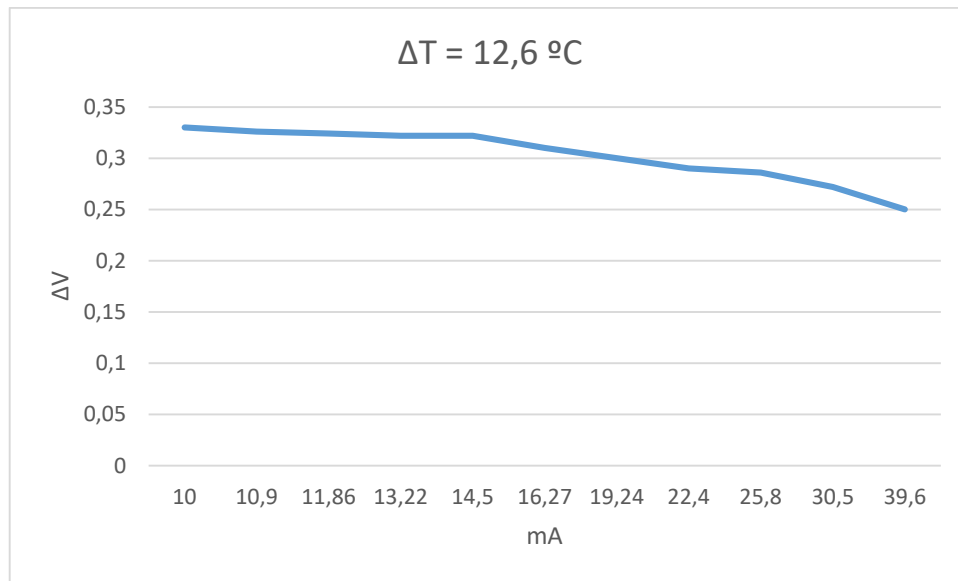


Figura 90: Resultados para el montaje sobre la pata alargada a 150 °C en la base.

Se observa, claramente, una diferencia de temperaturas muy reducida que resulta en una potencia eléctrica muy pequeña. Esto se debe a que la base de los montajes no alcanza una temperatura de trabajo óptima. En el primer caso la base del montaje alcanza los 40 °C, y en el segundo caso los 100 °C. La pata ha sido capaz de reducir la temperatura en la parte superior de la pata 50 °C comparado con la base.

5.3. Cálculos aplicados

En nuestro caso trabajaremos con un tubo cuadrado de 40 mm de lado (l), 2 mm de espesor (e), altura de 20 cm (L), temperatura en la base de 150 °C, una temperatura media en la superficie de 90 °C y una temperatura ambiente de 30 °C. De acuerdo a la ecuación (33), la temperatura media del aire es de 60 °C.

Los cálculos iniciales fueron los siguientes:

$$p = 4 \cdot l = 0,16 \text{ m} \quad (34)$$

$$A_c = p \cdot e = 0,16 \cdot 0,002 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (35)$$

$$A_s = 4 \cdot 0,2 \cdot 0,04 = 0,032 \text{ m}^2 \quad (36)$$

Los números de Rayleigh y Nusselt se despejan utilizando los valores de la figura (80) para una temperatura del aire de 60 °C, resultando en:

$$R_{al} = \frac{9,81 \cdot 0,003 \cdot (90 - 30) \cdot 0,2^3}{(1,896 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 0,7202 = 28301402,2 \quad (37)$$

$$N_u = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot R_{al}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,7202} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 42,1774 \quad (38)$$

Con estos números se resuelve el valor de coeficiente global de transmisión;

$$h = \frac{k}{L} \cdot N_u = 5,922 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (39)$$

Finalmente se deduce el calor transmitido:

$$Q = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = 5,922 \cdot 0,032 \cdot (90 - 30) = 11,37024 \text{ W} \quad (40)$$

Aplicando la ecuación (30) podemos deducir la distribución de temperaturas para un coeficiente de transmisión de calor por conducción del acero de 79,5 W/mK.

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot p}{k \cdot A_c}} = \sqrt{\frac{5,922 \cdot 0,16}{79,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}}} = 6,1029 \quad (41)$$

Aplicando la ecuación (27) podemos deducir la temperatura en la base superior de la pata:

$$\theta_x = (T_x - T_\infty) = (\theta_b) \cdot \frac{\text{csch}(m(0,2 - x))}{\text{csch}(m \cdot 0,2)} \quad (42)$$

$\theta_x = 65,1428$ $T_x = 95,14$	(43)
---------------------------------------	------

De acuerdo a la Figura 83, la cara superior de la pata se encuentra entre los 86 y 120 °C, y midiendo la temperatura manualmente se obtienen 98,8 °C. Con un error del 3,8 %, deducimos

por lo tanto que este método de cálculo es válido y aplicable en nuestro caso para diferentes temperaturas para deducir la temperatura en la base superior de la pata y por lo tanto en la cara caliente de la célula.

5.4. Validez de las hipótesis

Conociendo la conversión y la potencia eléctrica que suministran las células para una determinada temperatura en la base, podemos determinar el valor de la potencia térmica. Interpolando entre los valores de temperatura en la base y la potencia térmica consecuente, obtenemos 5,67643 W para 98,8 °C y una $\Delta T = 39,7$ °C entre la placa calefactora y la cara caliente de la célula. Aplicando la ecuación (30), utilizando esta potencia térmica se obtiene una distribución de temperaturas que se calcula a continuación:

$$\frac{5,67643}{\sqrt{79,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 5,922 \cdot 0,16 \cdot (\theta_b)}} = \tanh(6,1029 \cdot 0,2) \quad (44)$$

$$\theta_b = 43,815 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (45)$$

El error obtenido es de 10,4 %, permitiendo no considerar la cara superior de las patas como adiabática y realizar la caracterización experimental de las células. Se deduce que las pérdidas por conducción a través de la cara superior de la pata no son tan relevantes como las pérdidas por convección a través de los laterales. Esto también se puede observar en las fotografías tomadas por la cámara termográfica.

5.5. Resultados prototipo final

El prototipo final consistirá en una pata 20 cm de alto, una base metálica, 4 células Peltier (2 de ellas unidas a la placa metálica con pasta térmica), 4 disipadores de calor y 4 ventiladores de dron (1 de cada por cada célula) y un soporte con la caja de conexiones. La salida del circuito se conectará con la entrada del convertidor elevador, tras el cual se encontrará la batería a cargar. Véase el equipo en la Figura 91:



Figura 91: Prototipo final

Se tomaron fotografías con la cámara termográfica para una temperatura en la base de 150 ° C para comprobar la seguridad de los componentes electrónicos aún sin la pata, ya que para este rango de temperaturas de estudio no es necesaria, y dado que será la configuración empleada para la toma de datos. Las fotografías se muestran en la Figura 92:

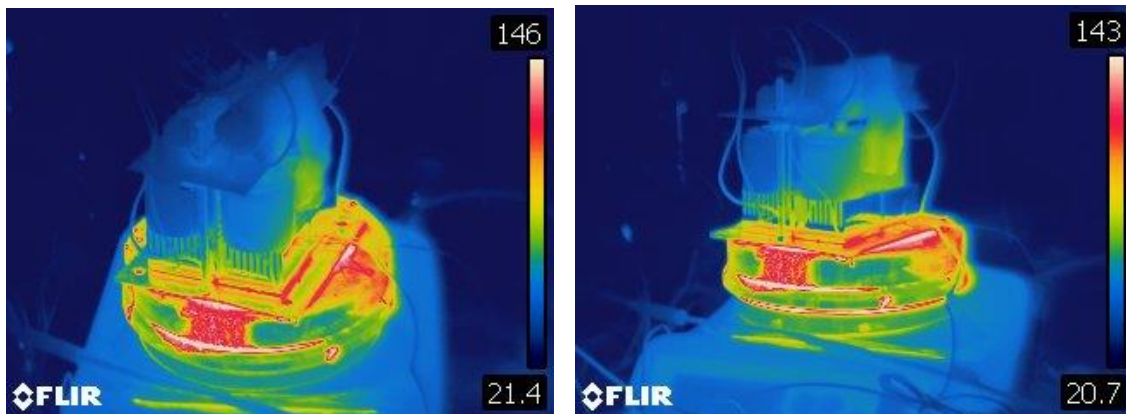


Figura 92: Fotografías para el prototipo final a 150 °C en la base.

Se pueden llevar a cabo diversas configuraciones dada la modularidad del equipo. Las dos a estudiar fueron:

- Las 4 células en paralelo alimentando simultáneamente a los ventiladores y al convertidor.
- Las 4 células en serie con 1 de ellas alimentando a los 4 ventiladores.

A la salida del convertidor irá siempre la batería. Las distintas configuraciones se muestran en las Figuras 93 y 94:

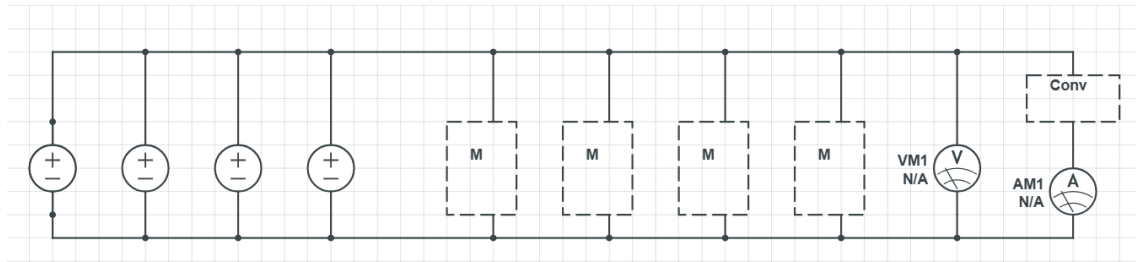


Figura 93: Configuración con las 4 células en paralelo.

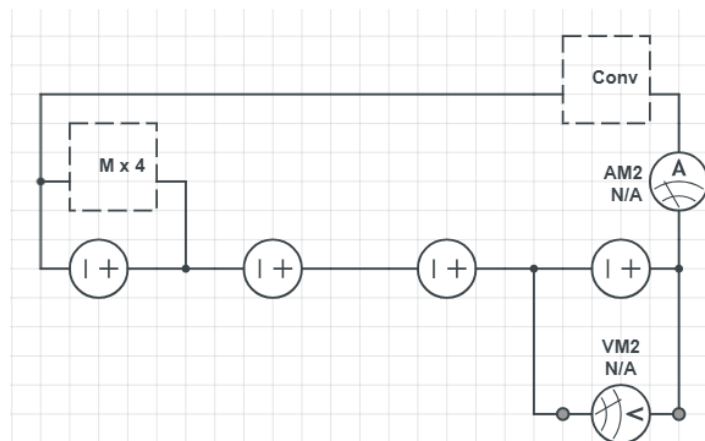


Figura 94: Configuración con las 4 células en serie.

En una primera configuración en paralelo se espera un valor de tensión conservador, pero la corriente debe verse multiplicada en comparación con anteriores experimentos.

Los resultados fueron los observables en las Figuras 95 y 96, alcanzando una temperatura máxima en la cara caliente de la célula de 162 °C:

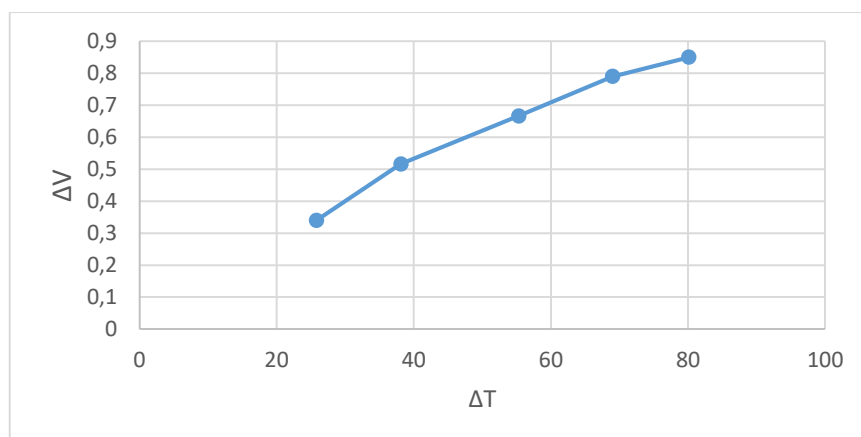


Figura 95: Tensión obtenida en la configuración en paralelo

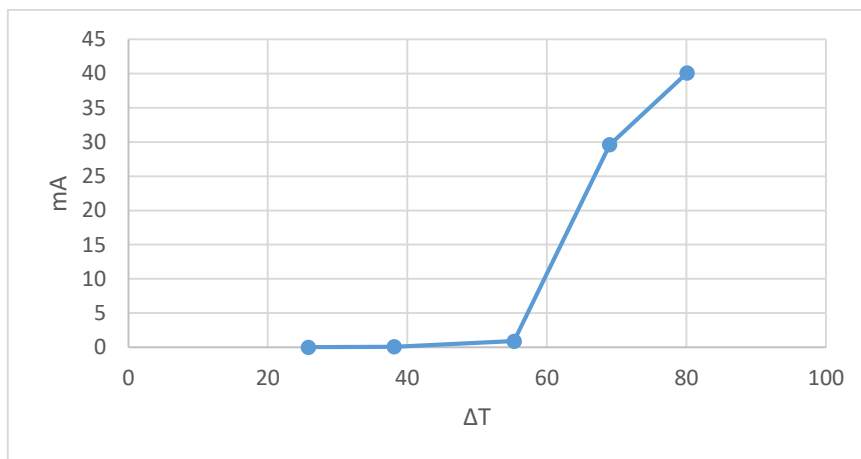


Figura 96: Corriente obtenida en la configuración en paralelo

Con esta configuración fue posible comenzar el proceso de carga de las baterías, debido a que se alcanzaba el mínimo de 0,5 V necesario para el funcionamiento del convertidor electrónico, si bien el máximo alcanzado fue de 0,85 V. Los reducidos valores de corriente que se observan podrían deberse a que las baterías empleadas estaban bastante cargadas y no exigían más corriente.

El convertidor es capaz de suministrar hasta 600 mA de acuerdo a las especificaciones del fabricante, aunque experimentalmente se ha comprobado que alcanza un máximo de 179 mA antes de que comience a caer la tensión; y esta configuración permite alcanzar los 0,85 V, por lo que deducimos que no debería haber problema a la hora de exigir más corriente para cargar las baterías desde cero aún si ello exigiese una tensión mayor al umbral de 0,5 V.

La potencia máxima que este equipo ha sido capaz de suministrar ha sido de 0,35 W. Esta potencia se ha obtenido para una configuración de las células y los ventiladores en paralelo, ya que en serie la corriente generada por las células no ha sido suficiente para alimentar a los ventiladores y al convertidor simultáneamente.

Conociendo la potencia máxima y sabiendo por estudio empírico que un teléfono móvil se puede cargar con un cargador de carga rápida en 15 minutos y que exige 10 W, podemos deducir el tiempo que tardaría en cargar este móvil el prototipo desarrollado:

$$\frac{\frac{(10 * 15)}{60}}{0,35} = 7,143 \text{ horas} \quad (46)$$

6. Evaluación de costes

6.1. Presupuesto del trabajo completo

A continuación se expone el coste de todos los equipos/materiales principales que han sido necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 10: Coste de todos los materiales y equipos

Unidad	Precio/unidad
Multímetro RS pro	35,87 €
Multímetro Kaise	26,51 €
Osciloscopio digital	3650 - 1754,5 €
Fuente de alimentación continua	50,00 €
Transformador trifásico	
Placa calefactora	400,00 €
Termómetro Velleman	88,95 €
Termómetro Spacnana	3,65 €
Célula Seebeck 30x30	28,76 €
Célula Seebeck 40x40	32,60 €
Célula Peltier	22,00 €
Ventilador dron	1,93 €
Resistencias variables	18,40 €
Difusor	2,11 €
Convertidor	0,35 €

Para estudiar el coste que supondría a una empresa realizar este estudio, consideraremos un coste de ingenieros electrónicos diario de 126,16 € y 300 € por el uso de un laboratorio durante una semana [68]. También se consideraran 4 células de cada tipo, 4 ventiladores y 4 difusores. Se considerarán 24 días laborales totales para llevar a cabo este estudio experimentalmente con todo el proceso entendido y preparado para la puesta en marcha.

Tabla 11: Coste total de realización de este estudio

Unidad	Precio/unidad
Célula Seebeck 30x30	115,04 €
Célula Seebeck 40x40	130,40 €
Célula Peltier	88,00 €
Ventilador dron	7,71 €
Difusor	8,44 €
Operario	2.523,20 €
Convertidor	0,35 €
Uso del laboratorio	1.200,00 €
	4.073,14 €

6.2. Presupuesto para un equipo en el mercado

Para estudiar el coste por unidad que supondría a una empresa fabricar uno de estos equipos, supondremos:

- El mismo coste por día de un ingeniero considerando que se fabrican 4 piezas por hora
- Un coste por perfiles de aluminio diario de 16 € para la fabricación de patas y otros elementos [69]
- Un coste de uso diario de máquinas de 0,3 € (coste calculado para el coste de un máquina fresadora de 1300 € para un periodo de amortización de 15 años [70])
- Un coste por cableado y caja de conexiones por equipo de 4 € [71].
- Se aplicará una reducción al coste de los materiales del 30 % considerando pedidos en lotes grandes, debido a que es común aplicar descuentos al pedir materiales en lotes [72].

Tabla 12: Coste de fabricación y montaje de un equipo

Unidad	Precio/unidad
Célula Seebeck 40x40	91,28 €
Ventilador dron	5,39 €
Difusor	5,91 €
Operario	3,94 €
Maquinaria	0,30 €
Perfiles	0,50 €
Cableado	4,00 €
Convertidor	0,35 €
	111,32 €

Se debe tener en cuenta el superior precio de las células Seebeck comparado con el de las células Peltier, que suponen el elemento más costoso. Para utilizar a temperaturas controladas, se pueden utilizar ambas por igual y se reduciría considerablemente el coste si se utilizan células Peltier.

7. Plan de negocio

En esta sección se propone un breve estudio de la viabilidad económica y la posibilidad de lanzar un producto como el prototipo al mercado.

7.1. Análisis de mercado

7.1.1. Mercado objetivo

Como se ha adelantado a lo largo del proyecto, este tipo de producto o prototipos similares están diseñados para satisfacer la necesidad de energía eléctrica en aquellas zonas con difícil acceso a la red eléctrica. Concretamente para este proyecto se han utilizado como referencia las familias de Chad, en África del sur, que utilizan hornos de los cuales se puede aprovechar el calor. Sin embargo, este producto se podría utilizar en otros ámbitos como en industrias que obtengan calores residuales de su producción o a modo de aparatos de emergencia antes situaciones que requieran energía de respaldo.

7.1.2. Competencia

Como se ha podido observar en las conclusiones de este trabajo, la potencia eléctrica que este prototipo es capaz de suministrar no alcanza lo que los paneles solares son capaces. De momento, no se debe considerar la tecnología fotovoltaica como un directo competidor.

Las estufas de biomasa que requieren fuego para su funcionamiento, los equipos usados para refrigerar cámaras, los equipos que aprovechan el calor corporal, o los ventiladores de horno aunque estos no suministren energía eléctrica directamente; pueden considerarse la competencia directa. Estos son pequeños equipos diseñados para dar solución a problemas cotidianos que aprovechan los generadores termoeléctricos. En particular, las estufas de biomasa son el competidor más directo, ya que cumplen la misma exacta función con un equipo diferente.

No serán competencia aquellos equipos como los recuperadores de calor de los coches o los utilizados para termocicladores, ya que son equipos más complicados y especializados para este tipo de aparatos.

7.1.3. Estado del mercado

Aplicando el modelo de las 5 fuerzas de Porter podemos hacer el siguiente análisis del mercado:

- La competencia por el momento es escasa dado que esta tecnología está aún por desarrollar, lo que supone una ventaja para este tipo de equipos.
- No existe un riesgo real a ser sustituido en el mercado todavía, debido a la falta de equipos similares a este equipo. Sin embargo, no se puede menospreciar este riesgo ya que existe un único sustituto en el mercado que son las estufas de biomasa. El público objetivo debe decidir si es más rentable comprar una estufa entera nueva o un equipo complementario con su horno/estufa.

- En contraparte, el riesgo de nuevos entrantes en el mercado es muy alto. Esta tecnología tiene mucho potencial y ya se está planteando nuevos equipos que utilizan generadores termoeléctricos como los paneles de biomasa.
- Los compradores no poseen mucho poder de negociación dado que el resto de tecnologías renovables no facilitan equipos tan pequeños, compactos o modulares. La demanda es además muy elevada.
- Los proveedores tampoco poseen mucho poder, ya que los componentes utilizados para construir este equipo no son muy caros y se pueden encontrar en diversos proveedores.

En conclusión, excluyendo que debe explotarse el mercado antes de que entren nuevos competidores, las 4 fuerzas de Porter restantes son muy favorables. Si este tipo de producto decide estudiarse más a fondo para hacer un diseño más sólido con mejores prestaciones, se encontraría con una buena recepción en el mercado.

7.2. Modelo de negocio

7.2.1. Propuesta de valor

Para diferenciarse de las estufas de biomasa este equipo se caracteriza por las siguientes razones:

- Este equipo presenta un volumen más reducido y un diseño más robusto
- Tiene una configuración modular que permite añadir más generadores termoeléctricos
- No requiere fuego para empezar a funcionar
- Puede trabajar en un amplio rango de temperaturas mientras no se superen los 200 °C máximos de trabajo de los generadores,
- Se pueden utilizar diversos tipos de patas debido a la modularización.
- Los costes no son tan elevados como una estufa nueva.

7.2.2. Estrategias de entrada al mercado

Para comenzar su campaña de comercialización, una empresa dedicada a vender este tipo de productos debería buscar asociarse con empresas de aquellas industrias que generen calor residual, pero sobre todo con el gobierno, ONGs o empresas de carácter solidario para poder crear campañas de recaudación de fondos y a su vez conseguir fácil acceso a su público objetivo. También se deben aprovechar las subvenciones que se conceden en la actualidad para fomentar productos que impulsen las energías renovables.

7.2.3. Precios

Debido a que aquellas zonas con difícil acceso a la red eléctrica suelen caracterizarse por ser altamente sensibles al precio, se debe buscar una rentabilidad inicial reducida. Este es un motivo de disuasión de la competencia, una baja rentabilidad.

Se propone vender el producto a un 25 % de su coste de producción, ya que es un producto con una alta vida útil y con un reducido número anual de ventas. Este tipo de productos generalmente tienen un margen de rentabilidad elevado que en este caso no es posible aplicar.

7.2.4. Marketing

Las campañas de marketing deben focalizarse en los objetivos de desarrollo sostenible, en la concienciación sobre la situación en aquellas zonas con difícil acceso a la red eléctrica y en el apoyo a las energías renovables.

Los medios de comunicación a utilizar serán las redes sociales y la publicidad a través de marketing digital. Si la empresa vendiese únicamente este producto, una asociación con fundaciones u ONGs sería casi obligatorio para darse a conocer y facilitar un contacto a posibles clientes interesados.

Los medios de distribución deben ser los locales de las zonas rurales, pero se propone la creación de una plataforma que facilite la compra a clientes, pero sobre todo que permita a aquellos interesados con aportar subvenciones de manera solidaria una fácil y transparente transacción.

7.2.5. Barreras y riesgos

Los mercados de la energía suelen estar fuertemente regulados y dependen de cada país. Conseguir la aprobación y las certificaciones pertinentes será una barrera al principio.

El coste inicial de producción parece bajo, cercano a los 100 €, especialmente en comparación con los paneles solares o las estufas de biomasa. Sin embargo el índice de rentabilidad está limitado por la sensibilidad del mercado africano ante los precios. Además, a diferencia de las empresas de servicios, las inversiones iniciales de fábricas suelen ser muy intensivas en capital dado que se requiere establecer una logística y comprar toda la maquinaria.

Existe el riesgo a que el producto no sea aceptado en el mercado debido a la falta de conocimientos sobre la tecnología termoeléctrica por parte del público objetivo. También es posible que, aun reduciendo al máximo el índice de rentabilidad, el coste mínimo siga suponiendo demasiado para la economía local.

Por otra parte, como toda tecnología que esté en estudio o desarrollo, es inevitable que con el tiempo surja un competidor con un producto mejor preparado para el mercado si no se dedica un departamento de investigación y desarrollo a mejorar el producto.

7.2.6. Mitigación de riesgos

Algunas estrategias de mitigación de riesgos pueden ser:

- Dedicar más tiempo y trabajo a mejorar y evolucionar el producto. Un producto mejor preparado podrá enfrentarse mejor a nuevos competidores.

- Considero fundamental la asociación con el gobierno u ONGs que ayuden a dar a conocer el producto para introducirlo en el mercado.
- Encontrar distintas fuentes de proveedores para no depender de uno solo, aunque esto aumente los costes.
- Realizar eventos promocionales tales como campañas solidarias para dar a conocer tanto el problema como la solución propuesta.

8. Conclusiones y Trabajos Futuros

8.1. Conclusiones

8.1.1. Estudio de la tecnología

Uno de los objetivos principales de este proyecto ha sido estudiar la generación termoeléctrica y los generadores (TEG) que se utilizan en la industria y entender los retos a los que se enfrenta esta tecnología. Se han estudiado las distintas aplicaciones y ámbitos de uso así como posibles prototipos que proponen nuevas configuraciones.

- Existen aplicaciones para la generación termoeléctrica que en la actualidad tienen gran éxito como el aprovechamiento del calor residual en motores de vehículos, los termocicladores en la biotecnología, o las aplicaciones con la biomasa como combustible como son los biopaneles de microalgas.
- En la actualidad se están estudiando y desarrollando equipos como los que aprovechan la energía geotérmica o las tecnologías de concentración solar e incluso existen equipos en el mercado como las estufas de biomasa.

La producción de estos equipos termoeléctricos en cuanto a potencia eléctrica no es despreciable, si bien la conversión energética desde la potencia térmica debe mejorarse. Nuevos materiales con mejores prestaciones como los hidrogeles de lignina están en desarrollo y aspiran a hacer crecer esta tecnología. La generación termoeléctrica tiene mucho potencial y cabe la posibilidad de que en un futuro se desarrolle un equipo capaz de competir con los paneles fotovoltaicos.

8.1.2. Experimentación

Tras realizar numerosos experimentos con distintas configuraciones se han podido poner en evidencia los retos a los que se enfrenta esta tecnología. Se han estudiado montajes ya preparados e incluso productos que se comercializan para entender el funcionamiento de los generadores termoeléctricos empíricamente. Gracias a este estudio experimental, se han seleccionado los componentes principales para construir un prototipo final con el objetivo de que se pueda convertir en un producto funcional que puedan utilizar las familias en Chad, África del Sur, para cargar sus dispositivos móviles o encender luces.

Las principales conclusiones extraídas de este estudio experimental han sido:

- La tensión obtenida en los generadores termoeléctricos es suficiente para cargar dispositivos móviles si se utilizan varios en conjunto. Dependiendo de la configuración, se necesitan módulos amplificadores o no.
- La corriente obtenida es muy reducida, lo que limita enormemente la potencia eléctrica que estos equipos pueden generar. Sin embargo, ha quedado comprobado que pueden alimentar a equipos pequeños de iluminación.

- No existe una diferencia sustancial entre la eficiencia de las células Peltier y las células Seebeck, con la única diferencia de que las últimas permiten trabajar a mayor temperatura y suponen un coste 4 o 5 veces mayor.
- Se requieren diferencias de temperatura sustanciales para que el producto del generador termoeléctrico resulte interesante ($\Delta T_{\min} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Construir un módulo que refrigere únicamente la cara fría de las células es el reto principal de este tipo de equipos. El uso de ventiladores de dron y difusores de aletas cuadrados ha resultado eficiente para alcanzar diferencias de temperatura de hasta $162\text{ }^{\circ}\text{C}$ (considerando que el máximo alcanzable por las células Seebeck es de 170 ° de acuerdo con las características del fabricante).
- Incluir una “pata” o “pie” resulta necesario para proteger a las células y otros componentes electrónicos de las elevadas temperaturas.

Se ha desarrollado un modelo matemático capaz de deducir con un error inferior al 10 % la temperatura en la cara superior de las patas para una temperatura en su base. Este modelo con las ecuaciones simplificadas se puede aplicar a cualquier otra pata que comparta la misma geometría.

Habiendo estudiado la eficiencia de las células y pudiendo conocer la temperatura en su cara caliente mediante el uso de una pata a una temperatura determinada en su base, se puede deducir numéricamente la salida que cada una de estas células generan.

Por último y con todos estos conocimientos, se ha construido un prototipo final en el laboratorio utilizando 4 células que es capaz de cargar una batería de litio. Este equipo está diseñado para poder colocarse sobre los hornillos utilizados en Chad. Sin embargo, la corriente generada y la potencia eléctrica total son muy reducidas. El tiempo de carga de la batería resulta elevado, pero se concluye que el equipo es capaz de aprovechar una potencia térmica que de otra manera sería desaprovechada.

Adicionalmente, se ha estudiado la posibilidad de lanzar este prototipo al mercado como un producto. Se ha llegado a la conclusión de que el mercado sería receptivo a este tipo de ideas, pero se debe invertir en ellas como si de una campaña solidaria se tratase, ya que los márgenes de rentabilidad son reducidos debido al coste de construcción de los equipos y la sensibilidad al precio de los países en los que habita el público objetivo. Además, el potencial de esta tecnología provoca que aún no haya suficientes competidores, lo que supone un incentivo para entrar en el mercado.

8.2. Trabajo futuro

Se recomienda indagar en profundidad en las imprecisiones que hayan podido tener lugar durante el desarrollo de este proyecto:

- La eficiencia de las células resulta muy reducida experimentalmente cuando se compara con la información que aporta el fabricante. Se recomienda repetir el estudio con un nuevo montaje que asegure que no haya pérdidas por transmisión de calor a través de los laterales y la configuración exige la máxima potencia posible a las células.
- Realizar las medidas con el prototipo final con un convertidor que tenga una tensión de entrada más reducida y una carga más fiable que sustituya a las baterías de litio.
- En el prototipo final se han utilizado células Peltier. Si se sustituyen por células Seebeck se podrá obtener un rendimiento mayor dado que estas pueden trabajar a mayores temperaturas.
- Sería recomendable preparar en el montaje un aislamiento para el módulo de refrigeración, que permita que entre aire fresco pero a su vez la evacuación del aire impulsado a través de las células.
- Se puede modificar el prototipo final para hacer un experimento colocando las células en serie y en el que cada una de las células alimente a un solo ventilador.
- Dado que el objetivo de este proyecto ha sido diseñar un prototipo que se pudiera lanzar al mercado, se ha buscado escoger los materiales que permitiesen abaratar el coste al máximo. Una mejor selección de células Seebeck, que permitan trabajar a mayores temperaturas y con un mejor rendimiento del 3%, podrían reducir el tiempo de carga de las baterías a las 2 horas. Además, con una mejor eficiencia se podría también reducir el número de células necesarias para el equipo, reduciendo su tamaño.

Como posible línea de trabajo futuro se propone el desarrollo de nuevos prototipos empleando los modelos matemáticos y los métodos de análisis experimental explicados en este proyecto. Se propone el estudio de la lignina para materiales termoeléctricos y estudiar la eficiencia de los biopaneles. También se propone el desarrollo de nuevo prototipos que empleen el efecto termoeléctrico inverso, es decir, que puedan refrigerar un entorno si se les suministra una potencia eléctrica.

9. Objetivos de Desarrollo Sostenible

La relación de este trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible es clara y directa. El objetivo ha sido estudiar la energía y los generadores termoeléctricos así como diseñar un prototipo funcional capaz de generar electricidad para poder aplicarlo en aquellas zonas con difícil acceso a la red eléctrica.

ODS 1: Fin de la pobreza

Existen numerosos países, comarcas y poblaciones por todo el mundo con dificultad para acceder a la red eléctrica. En zonas como África del sur la transición desde los combustibles fósiles a las energías renovables es un verdadero reto, dado que estos suponen casi un 80% de su mix energético. A través de este proyecto se ha estudiado la viabilidad de tecnologías de generación termoeléctrica en estas zonas y se ha propuesto un modelo de equipo que puede ser utilizado en los hornillos típicos que se utilizan en estas zonas.

ODS 7: Energía asequible y no contaminante

La generación termoeléctrica forma parte de las energías renovables. Aunque aún no compita directamente con la energía termosolar, supone una fuente de energía más barata y no contaminante que aún tiene un amplio camino por recorrer y que se debe estudiar. Considerando los elevados costes de la energía actualmente, los generadores termoeléctricos siguen una tendencia similar a los paneles solares, proponiendo a sus consumidores que lo utilicen personalmente en sus hogares para alimentar determinados aparatos electrónicos. En este trabajo se ha propuesto un prototipo con el objetivo de cumplir este fin y además se han estudiado otros equipos y aplicaciones que han tenido los generadores termoeléctricos en las distintas industrias.

ODS 12: Producción y consumo responsables

Dado que los generadores termoeléctricos aprovechan el calor residual que de otra manera se desperdiciaría, e incluso algunas tecnologías con biomasa regeneran el combustible, esta tecnología que se ha estudiado permite garantizar un ciclo de consumo de combustible y producción de electricidad responsables. No se compromete al medioambiente ni se pone en peligro de extinción ningún combustible.

ODS 13: Acción por el clima

Los generadores termoeléctricos suponen una fuente de energía renovable que, junto con algunas tecnologías como los paneles de biomasa que reducen la contaminación, suponen una fuente alternativa a los combustibles fósiles evitando dañar el medioambiente. Estudiar esta tecnología y proponer equipos a desarrollar así como estudiar su viabilidad en el mercado, aumentan las posibilidades de que sea explotada e impulsada a competir con el resto de energías renovables.



Figura 97: Objetivos de desarrollo sostenible competentes [73].

10. Bibliografía

- [1] Renova Energía, «Renova Energía,» [En línea]. Available: <https://www.renova-energia.com/electricidad-en-zonas-remotas/>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [2] X. Irujo, «Nabarralde,» 13 1 2022. [En línea]. Available: <https://nabarralde.eus/es/niagara/>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [3] Bullfinch, «Linkedin - The history of power: A timeline of energy generation over the decades,» Linkedin, 3 3 2022. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/history-power-timeline-energy-generation-over-decades-/>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [4] United Nations, «Naciones Unidas - El Acuerdo de París,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [5] United Nations, «Naciones Unidas - Objetivos de Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [6] EIA, «EIA - Energy sources have changed throughout the history of the United States,» EIA, 3 7 2013. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=11951>. [Último acceso: 13 11 2023].
- [7] S. Owusu-Mante, «Climate Policy Lab - South Africa's 2019 IRP Renewable Energy Targets,» 13 5 2020. [En línea]. Available: <https://www.climatepolicylab.org/communityvoices/2020/5/13/south-africas-2019-irp-renewable-energy-targets>. [Último acceso: 14 11 2023].
- [8] Equipos y Laboratorio de Colombia, «Equipos y Laboratorio de Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/el-efecto-termoelectrico>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [9] R. Awati, «TechTarget - Seebeck effect,» 10 2021. [En línea]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Seebeck-effect>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [10] TC SA para Medida y Control de Temperatura, «TC-SA - Termopar Tipo K,» [En línea]. Available: <https://www.tc-sa.es/termopares/tipo-k-termopar.html#:~:text=%EF%BB%BFTermopar%20Tipo%20K%2C%20llamado,utiliza%20en%20otro%20ambiente%20distinto..> [Último acceso: 20 11 2023].
- [11] TC SA para Medida y Control de Temperatura, «TC - SA Termopar Tipo J,» [En línea]. Available: <https://www.tc-sa.es/termopares/tipo-j-termopar.html#:~:text=%EF%BB%BFTermopar%20Tipo%20J%2C%20com%3BANmente,por%20encima%20de%20los%20550%C2%BAC..> [Último acceso: 20 11 2023].

- [12] O. Geneva, «Tegam - Thermocouple Thermometers and the Seebeck Effect,» 22 7 2019. [En línea]. Available: <https://www.tegam.com/thermocouple-thermometers-and-the-seebeck-effect/>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [13] K. R. K. M. L. Z. W. J. X. W. Z. Peijie Sun, «Science direct - Generic Seebeck effect from spin entropy,» The Innovation, 28 5 2021. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675821000266?pes=vor>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [14] H. J. Goldsmid, «IOPScience - The Physics of Thermoelectric Energy Conversion,» Morgan & Claypool Publishers, 4 2017. [En línea]. Available: <https://iopscience.iop.org/book/mono/978-1-6817-4641-8/chapter/bk978-1-6817-4641-8ch1>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [15] T. E. o. E. Britannica, «Britannica - Thomson effect,» 31 7 2023. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/Thomson-effect>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [16] Electricity - Magnetism, «Thermoelectricity - 30-second summary,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/thomson-effect/>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [17] Wikipedia, «Thermoelectric effect,» 16 11 2023. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect. [Último acceso: 20 11 2023].
- [18] Green Car Congress, «BMW provides an update on waste heat recovery projects; Turbosteamer and the Thermoelectric Generator,» Thermoelectrcis, Waste Heat Recovery, 30 8 2011. [En línea]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [19] D. M. L. Dr. Andreas Eder, «The BMW Group Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators.,» de *Efficient and Dynamic - The BMW Group Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators.*, San Diego, 03/01/2011.
- [20] D. Woerner, «Next Generation RTGs for NASA,» *Aerospace Research Central*, 7 7 2017.
- [21] SatCatalog, «SatCatalog - MMRTG,» [En línea]. Available: <https://www.satcatalog.com/component/mmrtg/>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [22] NASA, «Radioisotope Thermoelectric Generators,» [En línea]. Available: <https://science.nasa.gov/mission/cassini/radioisotope-thermoelectric-generator/>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [23] Energy Education, «Radioisotope thermal generator,» [En línea]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Radioisotope_thermal_generator. [Último acceso: 20 11 2023].
- [24] NASA, «Radioisotope Power Systems - From a Source of Heat Comes the Power to Explore,» [En línea]. Available: <https://rps.nasa.gov/technology/>. [Último acceso: 20 11 2023].

- [25] Laird Thermal Systems, «Thermoelectric Cooling for Security Cameras,» [En línea]. Available: <https://lairdthermal.com/thermal-technical-library/application-notes/thermoelectric-cooling-for-security-cameras>. [Último acceso: 20 11 2023].
- [26] ThermoFisher Scientific, «PCR Thermal Cyclers Education,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/es/es/home/life-science/cloning/cloning-learning-center/invitrogen-school-of-molecular-biology/pcr-education/pcr-thermal-cyclers.html>. [Último acceso: 21 11 2023].
- [27] Smithsonian Institution Archives, Washington, D.C., «History of the Polymerase Chain Reaction Videohistory Collection,» 1992-1993. [En línea]. Available: https://siarchives.si.edu/collections/siris_arc_217745. [Último acceso: 21 11 2023].
- [28] European Environment Agency, «Un futuro basado en las energías renovables,» 29 8 2023. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2022/articulos/un-futuro-basado-en-las>. [Último acceso: 10 7 2024].
- [29] R. Domenech, «Convertir residuos de madera en electricidad, una solución pionera liderada por la Universitat de València,» Onda Cero, 10 4 2024. [En línea]. Available: https://www.ondacero.es/emisoras/comunidad-valenciana/valencia/noticias/convertir-residuos-madera-electricidad-solucion-pionera-liderada-universitat-valencia_2024041066167a6317c56e000157d6a5.html. [Último acceso: 11 7 2024].
- [30] M. A., «Logran convertir la madera en electricidad: los bosques van a ser baterías futuristas,» Ecoticias, 11 5 2024. [En línea]. Available: <https://www.ecoticias.com/hoyeco/madera-en-electricidad/6130/>. [Último acceso: 11 7 2024].
- [31] M. P. Ortiz, «Diseño de una central termoeléctrica de biomasa,» 25 5 2016. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/90919/TFG%20Dise%C3%B1o%20central%20termoel%C3%A9ctrica%20de%20biomasa.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 11 7 2024].
- [32] R. M. Nuñez, «Ingeniería básica de una planta de cogeneración con biomasa,» 12 2012. [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1278/349215.pdf>. [Último acceso: 11 7 2024].
- [33] Ecoinventos, «Nuevos biopaneles de algas que producen energía, oxígeno y biomasa, además absorben CO₂,» 10 7 2023. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/greenfluidics/>. [Último acceso: 11 7 2024].
- [34] A. Piggott, «How Thermoelectric Generators Work,» Applied Thermoelectric Solutions LLC, [En línea]. Available: <https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-generators-work/>. [Último acceso: 23 11 2023].
- [35] Custom Thermoelectric - Your Thermoelectric Partner, «Thermoelectric Generators (TEGs),» [En línea]. Available:

<https://customthermoelectric.com/products/thermoelectric-power-generators.html>.
[Último acceso: 26 11 2023].

- [36] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi y M. Ismail, «A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications,» *Energy Reports*, vol. 6, nº 7, pp. 264-287, 12 2020.
- [37] J. Castillo Fernández, «Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza, 2017.
- [38] Smartgridsinfo, «La UPNA prueba un prototipo de generador termoeléctrico en el Timanfaya basado en geotermia,» 9 9 2020. [En línea]. Available: <https://www.smartgridsinfo.es/2020/09/09/upna-prueba-prototipo-generador-termoelectrico-timanfaya-basado-geotermia>. [Último acceso: 21 11 2023].
- [39] Thermonamic, «Biomass Stove with a 10 Watts Thermoelectric Power Generator,» [En línea]. Available: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=855. [Último acceso: 11 11 2023].
- [40] Thermonamic, «Biomass Stove with a 5 Watts Thermoelectric Power Generator,» [En línea]. Available: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=875. [Último acceso: 21 11 2023].
- [41] Thermonamic, «Biomass Stove with a 10 Watts Thermoelectric Power Generator,» [En línea]. Available: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=875. [Último acceso: 21 11 2023].
- [42] H. d. I. O. d. I. B. Víctor Alfredo Álvarez Hernández, «Construcción de un prototipo de generador termoeléctrico de estado sólido empleando un concentrador solar,» Ciudad de México, 2014.
- [43] I. Errolturralde, P. Aranguren, Á. Casi, P. Alegría, L. Catalán, M. Araiz y D. Astrain, «Estudio experimental sobre una bomba de calor termoeléctrica multietapa con diferentes intercambiadores intermedios,» [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/11481/3-ees.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 21 11 2023].
- [44] D. Astrain, J. G. Vián y M. Domínguez, «Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, nº 17, pp. 2183-2200, 12 2003.
- [45] M. Araiz, A. Martínez, D. Astrain y P. Aranguren, «Experimental and computational study on thermoelectric generators using thermosyphons with phase change as heat exchangers,» *Energy Conversion and Management*, vol. 137, pp. 155-164, 1 4 2017.
- [46] P. Aranguren, S. DiazDeGarayo, A. Martínez, M. Araiz y D. Astrain, «Heat pipes thermal performance for a reversible thermoelectric cooler-heat pump for a nZEB,» *Energy and Buildings*, vol. 187, pp. 163-172, 15 3 2019.

- [47] Kaise, «MY64,» Kaise instrumentación, [En línea]. Available: <https://kaiseinstrumentacion.com/producto/my64/>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [48] RS, «Multímetro RS PRO RS14, 600V ac/600V dc, 10A ac/10A dc, CAT III,» RS Pro, [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/multimetros/1231938>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [49] Rohde & Schwarz, «R&S®Scope Rider handheld oscilloscope,» R&S, [En línea]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/osciloscopios/rs-scope-rider-handheld-oscilloscope_63493-156160.html. [Último acceso: 5 7 2024].
- [50] Grupo Galiana, «Transformadores,» Galiana Industrial, [En línea]. Available: <https://www.grupogaliana.com/>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [51] Ovan, «MicroHeat,» Ovan, [En línea]. Available: <https://ovan.es/productos/microheat/>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [52] Velleman, «Termómetro con termopar tipo K/J, medición dual, pantalla LCD dual, -200 ° C -1370 ° C, Hold de datos,» Velleman Group, [En línea]. Available: <https://www.velleman.eu/products/view/?id=421078>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [53] Amazon, «LCD Thermometer Digital Thermometer with K Type Thermocouple Sensor Probe LCD Thermometer,» Spacnana, [En línea]. Available: https://www.amazon.co.uk/dp/B0BXT13CBT/ref=sspa_dk_detail_5?psc=1&pf_rd_p=46187d6a-4306-4bc6-830c-7b2085e0e39f&pf_rd_r=51E71DV64PX96FV11DS0&pd_rd_wg=r0yxL&pd_rd_w=CFwYh&content-id=amzn1.sym.46187d6a-4306-4bc6-830c-7b2085e0e39f&pd_rd_r=177a44e3-57ca-49b2-a. [Último acceso: 5 7 2024].
- [54] RS Pro, «Calentador de cartucho RS PRO, long. 40mm, Ø 10 mm, 220 V ac, 200 W,» RS Pro, [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/elementos-de-calefaccion/8606909>. [Último acceso: 6 7 2024].
- [55] RS Pro, «Calentador de cartucho RS PRO, long. 1.5plg, Ø 1/4 pulg., 220 V ac, 50 W,» RS Pro, [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/elementos-de-calefaccion/8606814>. [Último acceso: 6 7 2024].
- [56] RS, «GM200-71-14-16,» Adaptive power management, [En línea]. Available: <https://docs.rs-online.com/3ea8/0900766b814473ae.pdf>. [Último acceso: 5 7 2024].
- [57] RS, «GM200-127-14-16,» Adaptive Power Management, [En línea]. Available: <https://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/6-GM200-127-14-16%20%282%29.pdf>. [Último acceso: 6 7 2024].
- [58] Electronicscomp, «SP1848-27145 Thermoelectric Power Generator TEG 150°C Peltier Module,» [En línea]. Available: <https://www.electroniccomp.com/sp1848-27145-thermoelectric-power-generator-teg-150-degree-c-peltier-module>. [Último acceso: 6 7 2024].
- [59] RB, «Batería litio 3,6 Voltios 2.850 mAh Eve INR18650-29V,» Reguero Baterías, [En línea]. Available: https://www.reguerobaterias.es/p90041616_bateria-litio-3-6-voltios-

2-850-mah-eve-inr18650-29v.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw1qO0BhDwARIsANfnkv_uW7TA0b6Ju4T9s_Pr p8DmsBmRIha5GRvQsAigDDI0lwl_8AjpLgAaAs0jEALw_wcB. [Último acceso: 6 7 2024].

- [60] Miravia, «Boost Convertidor DC-DC 0.9V-5V a 5V 600mA USB Step up Modulo Alimentacion,» Leantec, [En línea]. Available: https://www.miravia.es/p/i1356590481992846-s2070248697805966.html?dsourc=share&laz_share_info=5535310_200_100_0_5537310_null&laz_token=4dbdfa889d68f0911758238aa3a7aaba. [Último acceso: 6 7 2024].
- [61] AliExpress, «SUNON-ventilador de refrigeración para servidor, dispositivo de ventilación de 2 cables, DC 12V, 0.05A, 40x40x10mm,» Brushless dc, [En línea]. Available: https://www.aliexpress.us/item/2255800968069177.html?src=google&aff_fcid=3f39a210af2f4d9b82662d35db2ee77c-1720263788500-05085-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=3f39a210af2f4d9b82662d35db2ee77c-1720263788500-05085-UneMJZV. [Último acceso: 6 7 2024].
- [62] TME, «TUBOS DE CALOR (HEAT PIPE) DE WAKEFIELD THERMAL,» TME, 26 11 2020. [En línea]. Available: <https://www.tme.eu/es/news/about-product/page/42621/Tubos-de-calor-heat-pipe-de-Wakefield-Vette/>. [Último acceso: 26 6 2024].
- [63] RS, «Disipador Fischer Elektronik de Aluminio Negro, 1.5K/W, dim. 100 x 66 x 40mm, para usar con Aluminio Rectangular,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/disipadores/1898050?gb=s>. [Último acceso: 11 7 2024].
- [64] CN, «AliExpress,» [En línea]. Available: https://es.aliexpress.com/item/1005005166820109.html?spm=a2g0o.detail.pcDetailTo pMoreOtherSeller.4.7d7767kF67kFlq&gps-id=pcDetailTopMoreOtherSeller&scm=1007.40050.354490.0&scm_id=1007.40050.354490.0&scm-url=1007.40050.354490.0&pvid=38216b9d-0a17-4a3d-ab3b. [Último acceso: 26 6 2024].
- [65] H. A. G. Rojas, «Estudio y parametrización de un generador termoeléctrico,» 9 6 2015. [En línea]. [Último acceso: 8 7 2024].
- [66] J. H. L. IV, «Conduction analysis, dimensional analysis, and fin design,» de *A heat transfer textbook*, Cambridge, Massachussets, U.S.A., Phlogiston Press, 2020, p. 784.
- [67] Y. A. Cengel, «Transferencia de calor desde superficies con aletas,» de *Transferencia de calor y masa*, México, McGraw-Hill Interamericana, 2007, p. 930.
- [68] Talent, «Salario medio para Ingeniero Eléctrico en España, 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+el%C3%A9ctrico#:~:text=El%20salario%20ingeniero%20el%C3%A9ctrico%20promedio,hasta%20%E2%82%AC%2038.676%20al%20a%C3%B1o..> [Último acceso: 10 7 2024].

- [69] Adajusa, «PERFIL ALUMINIO 30X30 CORTE A MEDIDA,» Adajusa, [En línea]. Available: <https://adajusa.es/es/perfilaria-de-aluminio/11290-perfil-aluminio-30x30-corte-a-medida-8445340112907.html>. [Último acceso: 10 7 2024].
- [70] Tecnomáquinas, «Fresadoras,» 2024. [En línea]. Available: <https://tecnomaquinas.es/4-fresadoras>. [Último acceso: 10 7 2024].
- [71] Recambiosremolques, «Caja de conexión eléctrica estanca,» 2024. [En línea]. Available: <https://recambiosremolques.com/epages/9812b318-7598-426d-8c64-3fa0c391cff3.mobile/?ObjectPath=/Shops/9812b318-7598-426d-8c64-3fa0c391cff3/Products/110130&ClassicView=1>. [Último acceso: 7 10 2024].
- [72] FasterCapital, «Descuentos en pedidos al por mayor Maximizar los ahorros como aprovechar los descuentos en pedidos al por mayor para su negocio,» 18 4 2024. [En línea]. Available: <https://fastercapital.com/es/contenido/Descuentos-en-pedidos-al-por-mayor--Maximizar-los-ahorros--como-aprovechar-los-descuentos-en-pedidos-al-por-mayor-para-su-negocio.html>. [Último acceso: 7 10 2024].
- [73] Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 11 7 2024].

ANEXO A: Hoja de características – Célula Peltier

This magical cells based on the Peltier effect are capable of generating electric power. The SP1848-27145 40x40mm Thermoelectric Power Generator TEG 150C Peltier Module operates maximum up to 150°C which will give you different voltage and current outputs at different values of temperature.

Thermoelectric Power Generators also are known as TEG or Peltier Module create a detects temperature differential on each side. You can take the advantage of this temperature differential detection to generate electricity.

After applying the heat on one side and cold on other side the device will start generating the voltage which depends upon the value of applied heat. The SP1848-27145 40x40mm Thermoelectric Power Generator TEG 150C Peltier Module will generate the moderate amount of voltage with mA of current.

A Thermoelectric Generator (TEG) module is a semiconductor-based electronic component that functions as a small generator.

Temperature (C) 20 40 60 80 100

Open circuit voltage (V) 0.97 1.8 2.4 3.6 4.8

Current (mA) 225 368 469 558 669

Operating Tips:

1. Do not exceed the maximum operating temperature of the module.
2. Life expectancy: 200,000 hours.
3. Failure rate based on longtime testings: 0.2%.

Note:-

1. **MODEL NUMBER SIDE** IS EXPOSED TO **HEAT-SINK or ICE** AND **OPPOSITE SIDE** TO **HEAT**.
2. Place 2-3 drops of grease compound on both sides of TEG Module

Features of SP1848-27145 Thermoelectric Power Generator TEG 150°C Peltier Module:-

1. Small and lightweight, convenient for use.
2. Designed specifically for power generation.
3. Sealed for moisture protection and contain thermal elements formulated for optimum Seebeck power generation.
4. High-temperature 150°C, with NM static protection.
5. Quality tested cooling cells.
6. Simple to install and operate.
7. *with 5v Booster board you can charge the cell phone*

Specifications of SP1848-27145 Thermoelectric Power Generator TEG 150°C Peltier Module:-

Model	SP1848-27145
Open Circuit Voltage (V)	4.8
Operating Temperature (C)	0 to 150
Maximum Temperature(C)	150
Wire Length(mm)	350
Length (mm)	40
Width (mm)	40
Height (mm)	3.6
Weight(gm)	30

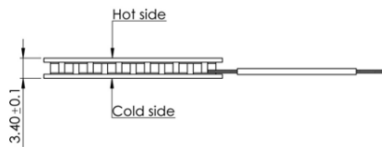
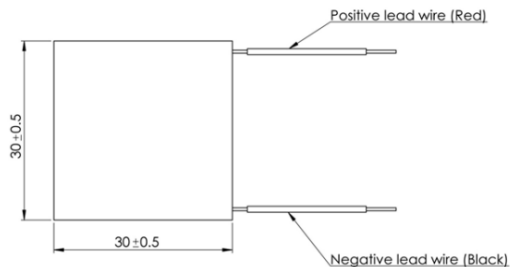
Package Includes :

1 x SP1848-27145 40x40mm Thermoelectric Power Generator TEG 150C Peltier Module

ANEXO B: Hoja de características – Célula Seebeck 30x30 mm

GM200-71-14-16

Thermoelectric generator module



Parameters for hot side temp 200°C and cold side temp 30°C

Matched load output power	2.82W
Matched load resistance	1.88Ω ± 15%
Open circuit voltage	4.6V
Matched load output	1.23A
Matched load output voltage	2.3V
Heat flow through module	~56.4W
Maximum compress (non-destructive)	1 MPa
Maximum operation temperature	Hot side - 200°C. Cold side - 175°C

Features

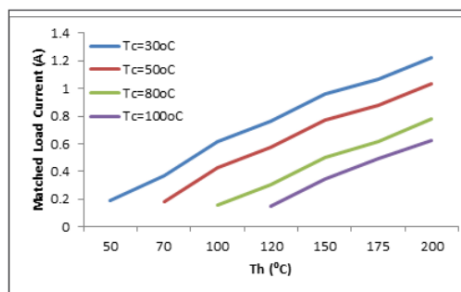
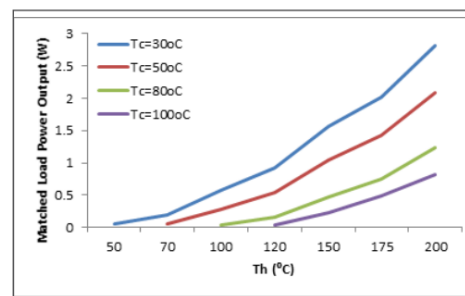
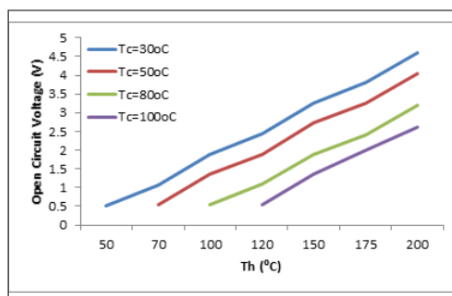
- Compact structure (no moving parts)
- Reliable performance
- Maintenance-free
- Noise-free operation
- Low-carbon, green technology



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-71-14-16

Thermoelectric generator module

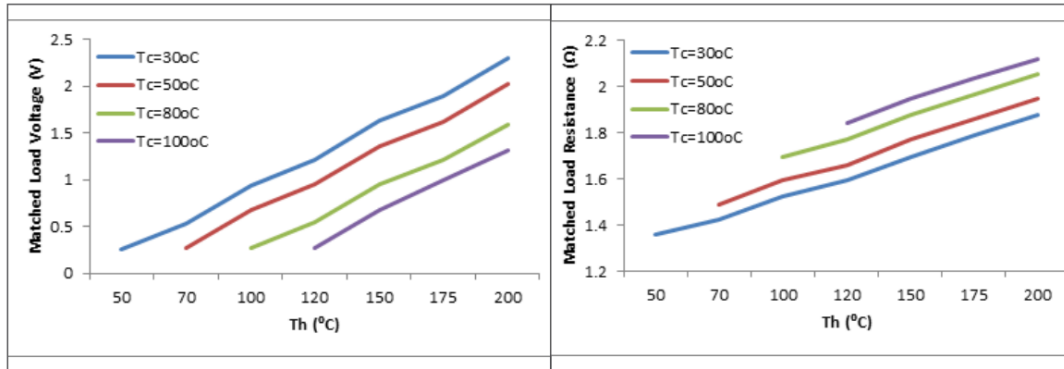


Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-71-14-16 Thermoelectric generator module



Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
 Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-71-14-16 Thermoelectric generator module

Formulae for calculating thermoelectric properties (best fit derived from measured material characteristics)

Thermal conductivity

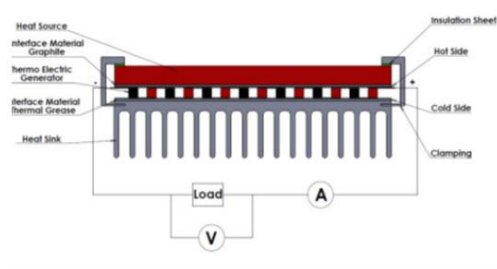
- $k_n = (0.0000334545 \times T^2 - 0.023350303 \times T + 5.606333) \text{ W/mK}$
- $k_p = (0.0000361558 \times T^2 - 0.026351342 \times T + 6.22162) \text{ W/mK}$

Seebeck coefficient

- $\alpha_n = (0.001530736 \times T^2 - 1.08058874 \times T - 28.338095) \times 10^{-6} \text{ V/K}$
- $\alpha_p = (-0.003638095 \times T^2 + 2.74380952 \times T - 296.214286) \times 10^{-6} \text{ V/K}$

Electrical conductivity

- $\sigma_n = (0.015601732 \times T^2 - 15.708052 \times T + 4466.38095) \times 10^2 \text{ S/m}$
- $\sigma_p = (0.01057143 \times T^2 - 10.16048 \times T + 3113.71429) \times 10^2 \text{ S/m}$



Where the subscript *n* refers to the n-type thermoelement and the subscript *p* refers to the p-type thermoelement. It should be noted here that the electrical conductivity relates to the electrical resistivity as follows: $\rho = 1/\sigma$. Thus, where electrical resistivity is needed, one can calculate the electrical conductivity through the aforementioned formulae and then reverse to calculate the electrical resistivity.

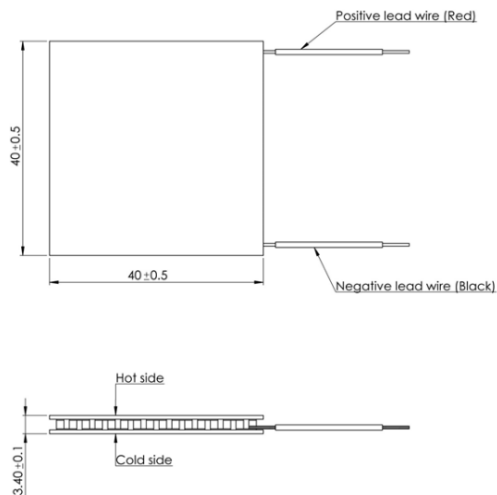


Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
 Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

ANEXO C: Hoja de características – Célula Seebeck 40x40 mm

GM200-127-14-16

Thermoelectric generator module



Parameters for hot side temp 200°C and cold side temp 30°C

Matched load output power	4.73W
Matched load resistance	$3.34\Omega \pm 15\%$
Open circuit voltage	7.95V
Matched load output	1.19A
Matched load output voltage	3.98V
Heat flow through module	~94.6W
Maximum compress (non-destructive)	1MPa
Maximum operation temperature	Hot side - 200°C. Cold side - 175°C

Features

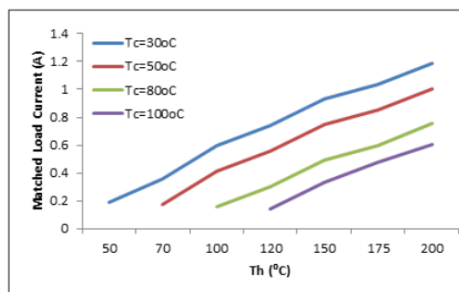
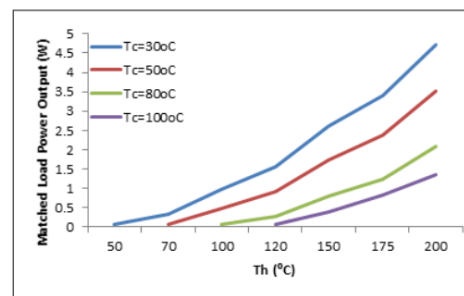
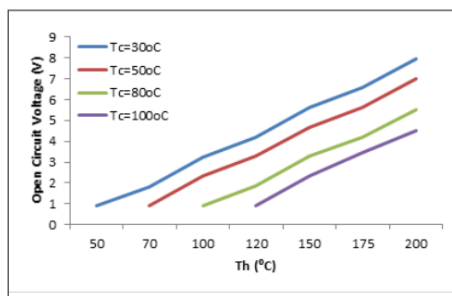
- Compact structure (no moving parts)
- Reliable performance
- Maintenance-free
- Noise-free operation
- Low-carbon, green technology



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etsyd.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etsyd.com

GM200-127-14-16

Thermoelectric generator module

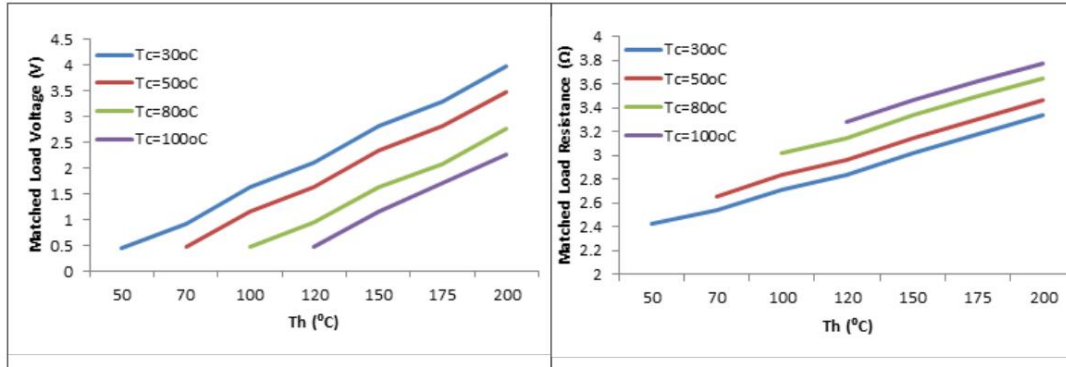


Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etsyd.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etsyd.com

GM200-127-14-16 Thermoelectric generator module



Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-127-14-16 Thermoelectric generator module

Formulae for calculating thermoelectric properties (best fit derived from measured material characteristics)

Thermal conductivity

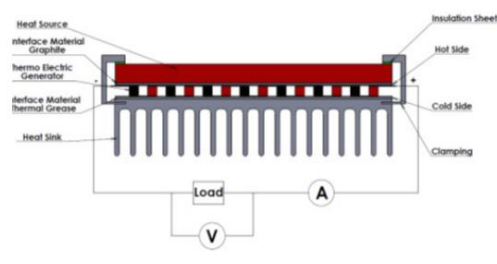
- $k_n = (0.0000334545 \times T^2 - 0.023350303 \times T + 5.606333) \text{ W/mK}$
- $k_p = (0.0000361558 \times T^2 - 0.026351342 \times T + 6.22162) \text{ W/mK}$

Seebeck coefficient

- $\alpha_n = (0.001530736 \times T^2 - 1.08058874 \times T - 28.338095) \times 10^{-6} \text{ V/K}$
- $\alpha_p = (-0.003638095 \times T^2 + 2.74380952 \times T - 296.214286) \times 10^{-6} \text{ V/K}$

Electrical conductivity

- $\sigma_p = (0.015601732 \times T^2 - 15.708052 \times T + 4466.38095) \times 10^2 \text{ S/m}$
- $\sigma_n = (0.01057143 \times T^2 - 10.16048 \times T + 3113.71429) \times 10^2 \text{ S/m}$



Where the subscript n refers to the n-type thermoelement and the subscript p refers to the p-type thermoelement. It should be noted here that the electrical conductivity relates to the electrical resistivity as follows: $\rho = 1/\sigma$. Thus, where electrical resistivity is needed, one can calculate the electrical conductivity through the aforementioned formulae and then reverse to calculate the electrical resistivity.



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com