



UNIVERSITAT  
JAUME•I

UNIVERSITAT JAUME I

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES

EXPERIMENTALS

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

***Desarrollo de un banco de pruebas para  
células termoeléctricas, análisis de sistemas  
de disipación, y estudio teórico de viabilidad  
como dispositivos de subenfriamiento en  
equipos de refrigeración por compresión de  
vapor***

**TRABAJO FIN DE GRADO**

AUTOR

Rafael Fabregat Albert

DIRECTORES

Ramón Cabello López

Daniel Sánchez García-Vacas

Castellón, octubre de 2020



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos tutores, Ramón Cabello López y Daniel Sánchez García-Vacas, por haberme presentado un proyecto tan interesante y del que tanto he aprendido, por su disponibilidad, y por haberme prestado una ayuda sin la cual esto no habría sido posible.

También quiero expresar mi agradecimiento, a esos compañeros de grado que al final se han convertido en importantes amigos, y han hecho de este paso por la universidad, una experiencia memorable.

Por último, quiero agradecer tanto a mi familia como a mis padres, Juan Antonio Fabregat Cortés y Pilar Albert Mochlí, todo el apoyo que me han dado, ya no solo durante estos años, sino durante toda mi vida.



# Resumen

Una de las mayores problemáticas a las que se ha tenido que enfrentar el ser humano desde tiempos inmemoriales, ha sido la producción de frío. La fuerte dependencia de fuentes naturales del mismo, las limitadas posibilidades de acumulación, y la temporal disponibilidad de este recurso, llevaron a la experimentación en producción de frío de forma artificial, y ya en el siglo XVIII, se realizaron los primeros modelos de máquinas de producción de frío artificial basadas en la evaporación de fluidos.

Hoy en día, es imposible imaginarse una vida sin equipos de producción de frío artificial, ya sean para la refrigeración del hogar, para la conservación de alimentos, de medicamentos, o incluso para la refrigeración de centros de datos, donde se estima que un 50% del consumo eléctrico se emplea para refrigerar el equipamiento [Kooimey JG, 2008]. Con el crecimiento de la población mundial y el consiguiente aumento de la demanda energética, se ha buscado crear dispositivos de producción de frío artificial cada vez más eficientes, y es en este ámbito en el que la termoelectricidad se presenta como una interesante alternativa a la hora de mejorar el rendimiento de algunos equipos.

El presente trabajo, estudia las características de la célula Peltier, un dispositivo termoeléctrico que se presenta muy prometedor debido a su prácticamente nulo mantenimiento, su simplicidad de operación y su fácil regulación. Para ello, se han realizado más de 100 ensayos en un banco que se ha diseñado específicamente para adaptarse a las células Peltier, en el cual, se ha montado uno de estos dispositivos junto con diferentes configuraciones de disipadores, con el fin de caracterizar cada conjunto formado por el módulo termoeléctrico y el disipador, y con estos datos, se ha obtenido un amplio mapa de valores que ha permitido conocer los diferentes parámetros de temperatura y consumo de las células bajo una gran cantidad de regímenes de operación.

Finalmente, se ha estudiado, de forma teórica, su viabilidad como dispositivos de subenfriamiento en equipos de refrigeración de compresión de vapor con R32, llegando a la conclusión de que si bien, la mejora en el rendimiento que se ha conseguido en este estudio particular no es alta, aporta también otros beneficios como la reducción del caudal de refrigerante, dejando por tanto patente el potencial de estas tecnologías, y la necesidad de invertir en investigación para la mejora de los mismos debido a las numerosas ventajas que aportan.

# Resum

Una de les majors problemàtiques a les quals s'ha hagut d'enfrontar l'ésser humà des de temps immemorials, ha estat la producció de fred. La forta dependència de fonts naturals d'aquest, les limitades possibilitats d'acumulació, i la temporal disponibilitat d'aquest recurs, van portar a l'experimentació en producció de fred de manera artificial, i ja en el segle XVIII, es van realitzar els primers models de màquines de producció de fred artificial basades en l'evaporació de fluids.

Avui dia, és impossible imaginar-se una vida sense equips de producció de fred artificial, ja siguin per a la refrigeració de la llar, per a la conservació d'aliments, de medicaments, o fins i tot per a la refrigeració de centres de dades, on s'estima que un 50% del consum elèctric s'empra per a refrigerar l'equipament [Kooimey JG, 2008]. Amb el creixement de la població mundial i el consegüent augment de la demanda energètica, s'ha buscat crear dispositius de producció de fred artificial cada vegada més eficients, i és en aquest àmbit en el qual la termoelectricitat es presenta com una interessant alternativa a l'hora de millorar el rendiment d'alguns equips.

El present treball, estudia les característiques de la cèl·lula Peltier, un dispositiu termoelèctric que es presenta molt prometedora a causa del seu pràcticament nul manteniment, la seva simplicitat d'operació i la seva fàcil regulació. Per a això, s'han realitzat més de 100 assajos en un banc que s'ha dissenyat específicament per a adaptar-se a les cèl·lules Peltier, en el qual, s'ha muntat un d'aquests dispositius juntament amb diferents configuracions de dissipadors, amb la finalitat de caracteritzar cada conjunt format pel mòdul termoelèctric i el dissipador, i amb aquestes dades, s'ha obtingut un ampli mapa de valors que ha permès conèixer els diferents paràmetres de temperatura i consum de les cèl·lules sota una gran quantitat de règims d'operació.

Finalment, s'ha estudiat, de manera teòrica, la seva viabilitat com a dispositius de subrefredament en equips de refrigeració de compressió de vapor amb R32, arribant a la conclusió que si bé, la millora en el rendiment que s'ha aconseguit en aquest estudi particular no és alta, aporta també altres beneficis com la reducció del cabal de refrigerant, deixant per tant palès el potencial d'aquestes tecnologies, i la necessitat d'invertir en recerca per a la millora dels mateixos a causa dels nombrosos avantatges que aporten.

# Abstract

One of the biggest problems that humanity has had to face since ancient times, has been the production of cold. The strong dependence on natural sources, the limited possibilities of accumulation, and the temporary availability of this resource, led to experimentation in artificial cold production, and already in the 18th century, the first models of machines, capable of producing artificial cold based on the evaporation of fluids, were released.

Today, it is impossible to imagine a life without equipment for the production of artificial cold, either for home refrigeration, for preserving food, medicine, or even for cooling data centers, where an estimated 50% of electricity consumption is used to cool the equipment [Koomey JG, 2008]. With the growth of the world population and the consequent increase in energy demand, it has been sought to create increasingly efficient artificial cold production devices, and it is in this context, that thermoelectricity presents itself as an interesting alternative to improve the performance of some equipment.

The present work studies the characteristics of the Peltier cell, a thermoelectric device that is very promising due to its practically zero maintenance, its simplicity of operation and its easy regulation. For this, more than 100 tests have been carried out on a bench that has been specifically designed to adapt to Peltier cells, in which one of these devices has been mounted together with different configurations of heatsinks, in order to characterize each set, that includes the thermoelectric module and the heatsink, and with these data, a wide map of values has been obtained. This map of values has made it possible to know the different parameters of temperature and consumption of the cells under a large number of operating regimes.

Finally, their viability as subcooling devices in vapor compression refrigeration equipment with R32 has been theoretically studied, reaching the conclusion that although the improvement in performance that has been achieved in this particular study is not high, it also provides other benefits such as the reduction of the refrigerant flow, thus making clear the potential of these technologies, and the need to invest in research to improve them due to the many advantages they provide.





# ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	10
Nomenclatura	15
1. Memoria	19
2. Anexos	97
3. Pliego de condiciones	133
4. Presupuesto	151
5. Planos	155

# Índice de figuras

Figura 1.1.2-1: Valores anuales de emisiones de GEI en España. [Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Gobierno de España. Avance de emisiones de gases de efecto invernadero, año 2019].	26
Figura 1.5.1-1: Esquema de un circuito simple de refrigeración por compresión de vapor [tomado y adaptado de thermal-engineering.org].	31
Figura 1.5.1-2: Ciclo de trabajo de un circuito simple de refrigeración por compresión de vapor, a lo largo de la campana de saturación del fluido refrigerante R32.	33
Figura 1.5.3-1: Célula Peltier [Profesionalreview.com, 2018].	35
Figura 1.5.2-2: Esquema de movimiento de las cargas en una célula Peltier [Lucas, 2011].	36
Figura 1.5.2-3: Diagrama efecto Seebeck [monografías.com].	36
Figura 1.5.2-4: Diagrama efecto Peltier [monografías.com].	38
Figura 1.5.2-5: Diagrama efecto Thomson [www.unavarra.es].	38
Figura 1.5.2-6: Sección longitudinal esquematizada de un heat pipe [www.heatpipe.nl].	40
Figura 1.5.2-7: Evolución de la resistencia térmica de dos disipadores HP respecto a la potencia disipada [Može, Nemanič, Poredoš, 2020].	41
Figura 1.6.1-1: Célula Peltier Marlow TG-12 8L .	43
Figura 1.6.1-1: Fuente de potencia térmica (Cables de las resistencias en naranja).	44
Figura 1.6.3-1: Disipador convección forzada Arctic 64 GT.	45
Figura 1.6.3-2: Disipador heat pipe Katana 5.	45
Figura 1.6.3-3: Disipador Alpine AM4 Passive.	46
Figura 1.6.5-1: Keysight data logger 34972A.	47

Figura 1.6.6-1: Multímetro con pinza amperimétrica PeakTech P4350.	48
Figura 1.6.7-1: Fuente de alimentación PeakTech 6155 .	48
Figura 1.6.8-1: Aislante térmico AF Armaflex.	49
Figura 1.6.9-1: Cola de contacto Armaflex 520.	49
Figura 1.6.10-1: Tablero de fibra de densidad media.	50
Figura 1.6.11-1: Pasta térmica RS Pro 5W/mK.	50
Figura 1.6.12-1: Lámina de grafito 20W/mK.	50
Figura 1.7-1: Soporte de DM preparado y bloque de resistencias ubicado en el surco.	52
Figura 1.7-2: Pasta térmica colocada sobre el bloque de resistencias y célula Peltier.	52
Figura 1.7-3: Orificios en los que se deben remachar las escuadras.	53
Figura 1.7-4: Orificio para situar el termopar que mide la temperatura del foco frío (Cara caliente).	54
Figura 1.7-5: Disposición del conjunto ya montado y llave dinamométrica.	54
Figura 1.7-6: Forraje del conjunto.	55
Figura 1.7-7: Conjunto forrado con el material aislante.	55
Figura 1.7-8: Montaje de la sonda que mide temperatura ambiente.	56
Figura 1.7-9: Orificio que mide la temperatura de la cara caliente de la célula	57
Figura 1.7-10: Disipador heat-pipe Katana 5 ya montado.	58
Figura 1.8-1: Ensayo que verifica que no hay transferencias térmicas hacia el banco de ensayos.	61
Figura 1.8-2: Ejemplo de ensayo con el disipador Arctic 64 GT.	62

Figura 1.9.1-1: Evolución de la temperatura de la cara fría con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.	63
Figura 1.9.1-2: Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.	64
Figura 1.9.1-3: Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.	65
Figura 1.9.2-1: Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Lámina grafito).	66
Figura 1.9.2-2: Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (lámina de grafito).	67
Figura 1.9.2-3: Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (lámina de grafito).	68
Figura 1.9.3-1: Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).	69
Figura 1.9.3-2: Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).	69
Figura 1.9.3-3: Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).	70
Figura 1.9.4-1: Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador pasivo.	71
Figura 1.9.4-2: Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador pasivo.	71
Figura 1.10-1: Sistema de subenfriamiento termoeléctrico (TESC) [Tomado y adaptado de Sánchez et. al, 2020].	72
Figura 1.10.1-1: Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor.	73
Figura 1.10.2-1: Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor con IHX.	74
Figura 1.10.3-1: Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor con TESC.	75

Figura 1.10.3-2: Representación esquemática del salto de temperatura en cada unidad del TESC.	76
Figura 1.11.1-1: Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).	79
Figura 1.11.1-2: Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).	79
Figura 1.11.1-3: Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).	80
Figura 1.11.2-1: Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, lámina de grafito).	81
Figura 1.11.2-2: Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, lámina de grafito).	82
Figura 1.11.2-3: Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, lámina de grafito).	82
Figura 1.11.3-1: Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, pasta térmica).	83
Figura 1.11.3-2: Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, pasta térmica).	84
Figura 1.11.3-3: Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, pasta térmica).	84
Figura 1.11.4-1: Comparación de los tres sistemas de disipación.	86
Figura 1.11.5-1: Representación del COP de la célula Peltier y la potencia disipada, con el disipador Katana 5.	88
Figura 1.11.5-2: Evolución del COP con la incorporación de módulos termoeléctricos.	89
Figura 1.11.5-3: Evolución del caudal de refrigerante con la incorporación de módulos termoeléctricos.	90

Figura A.1.1-1: Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador convección forzada Arctic 64 GT.	102
Figura A.1.1-2: Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador convección forzada Arctic 64 GT.	103
Figura A.1.1-3: Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador convección forzada Arctic 64 GT.	103
Figura A.1.2-1: Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador katana 5, grafito.	104
Figura A.1.2-2: Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador katana 5, grafito.	104
Figura A.1.2-3: Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador katana 5, grafito.	105
Figura A.1.3-1: Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador katana 5, pasta térmica.	105
Figura A.1.3-2: Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador katana 5, pasta térmica.	106
Figura A.1.3-3: Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador katana 5, pasta térmica.	106
Figura A.2-1: Circuito simple,ciclo termodinámico.	109
Figura A.2-2: Circuito con IHX, ciclo termodinámico.	111
Figura A.2-3: Circuito con TESC, ciclo termodinámico.	113

# Nomenclatura

## Simbología

$Q_{\text{cold}}$	Calor absorbido del foco frío
$Q_{\text{hot}}$	Calor cedido al foco caliente
$Q'$	Potencia calorífica (En ocasiones también se refiere a esta como calor)
$Q_0'$	Calor absorbido por el evaporador
$Q_k'$	Calor cedido por el condensador
$Q'_{\text{ISC}}$	Potencia que disipa una unidad de subenfriamiento del TESC
$Q'_{\text{Pelt}}$	Potencia que disipa una célula Peltier de la unidad de subenfriamiento
$W_C$	Trabajo mecánico producido por el compresor
$W'_{\text{c(E)}}$	Potencia eléctrica consumida por el compresor
$P_0$	Presión de evaporación
$P_k$	Presión de condensación
$T_0$	Temperatura de evaporación
$T_k$	Temperatura de condensación
$q'$	Densidad de potencia calorífica intercambiada
$\alpha_X$	Potencia térmica de un material X
$\alpha_{XY}$	Coefficiente de Seebeck entre dos materiales X e Y.
$\mu$	Coefficiente de Thomson para un determinado metal.
$\nabla T$	Gradiente de temperaturas
$J$	Densidad o flujo de corriente

$R_{eq}$	Resistencia equivalente
$T_{ref}$	Temperatura del fluido refrigerante
$T_s$	Temperatura superficial del conducto del TESC
$T_{in}$	Temperatura de entrada
$T_{out}$	Temperatura de salida
$\eta_{is}$	Rendimiento isentrópico del compresor
$\eta_{me}$	Rendimiento mecánico-eléctrico del compresor
$t_c$	Tasa de compresión del compresor
$P_{desc}$	Presión de descarga del compresor
$P_{asp}$	Presión de aspiración del compresor
$X_v$	Título de vapor (Fracción de vapor)
$h$	Entalpía
$h_c$	Coefficiente de convección o película
$\varepsilon_{IHX}$	Eficiencia del intercambiador intermedio
$m'_{ref}$	Caudal másico de refrigerante
$m'_{refX}$	Caudal másico de refrigerante en el circuito con IHX
$m'_{refT}$	Caudal másico de refrigerante en el circuito con TESC
$L$	Longitud del conducto entre las células de la unidad de subenfriamiento
$a$	Ancho de la sección cuadrada del conducto de cobre
$b$	Alto de la sección cuadrada del conducto de cobre
$\Delta T_{lm}$	Salto de temperatura logarítmico medio
$Nu$	Número de Nusselt



$D_h$	Diámetro equivalente de la sección del conducto
$k$	Conductividad del fluido refrigerante
$Re$	Número de Reynolds
$v_{ref}$	Velocidad del fluido refrigerante
$\nu$	Viscosidad cinemática
$Pr$	Número de Prandtl
$\mu$	Viscosidad dinámica
$C_p$	Calor específico del fluido refrigerante
$A_t$	Área transversal del conducto de cobre de la unidad de subenfriamiento
$P$	Perímetro
$q_{vol}$	Caudal volumétrico que circula por el TESC
$v$	Volúmen específico del fluido refrigerante

## Abreviaturas

EES	Engineering Equation Solver
IHX	Intercambiador intermedio (Intermediate heat exchanger)
TESC	Subenfriador termoeléctrico (Thermoelectric subcooler)
COP	Coefficiente de rendimiento (Coefficient of performance)
CFCs	Clorofluorocarbonos
GEI	Gases de efecto invernadero
ODP	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (Ozone depletion potential)
GWP	Potencial de calentamiento global (Global warming potential)

COP	Coeficiente de rendimiento (Coefficient of performance)
HP	<i>Heat-pipe</i>
MDF/DM	Tablero de fibras de densidad media

# 1. Memoria

*Desarrollo de un banco de pruebas para células termoeléctricas, análisis de sistemas de disipación, y estudio teórico de viabilidad como dispositivos de subenfriamiento en equipos de refrigeración por compresión de vapor.*

# Índice de la memoria

1.1. Introducción	22
1.1.1 Evolución histórica de la producción de frío	22
1.1.2 Contexto actual	25
1.1.3 Lugar de los módulos termoeléctricos en la industria	26
1.2. Justificación	28
1.3. Objetivos y alcance	29
1.4. Antecedentes	30
1.5. Fundamentos teóricos	31
1.5.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor	31
1.5.2 Semiconductores	33
1.5.3 Célula termoeléctrica o célula Peltier	34
1.5.3.1 Qué es una célula Peltier	34
1.5.3.2 Fenómenos implicados	36
1.5.4 Heat pipe	40
1.6. Componentes y materiales del banco de ensayos	42
1.6.1 Célula Peltier	42
1.6.2 Fuente de potencia térmica	43
1.6.3 Disipadores	44
1.6.3.1 Disipador Alpine Arctic 64 GT	45
1.6.3.2 Disipador SCKTN-5000 Katana 5	45
1.6.3.3 Disipador Alpine AM4 Passive	46
1.6.4 Sondas de temperatura	46
1.6.5 Sistema de adquisición	47
1.6.6 Dispositivos de medición	47
1.6.7 Fuentes de alimentación	48
1.6.8 Material de aislamiento térmico	48
1.6.9 Cola de contacto	49
1.6.10 Tablero de fibra de densidad media	49
1.6.11 Pasta térmica	50
1.6.12 Lámina de grafito	50
1.7. Construcción del banco de ensayos	51
1.8. Metodología seguida en los ensayos	60
1.9. Datos obtenidos	63
1.9.1 Célula Peltier con disipador de convección forzada sobre pasta térmica	63
1.9.2 Célula Peltier con disipador heat pipe sobre lámina de grafito	66
1.9.3 Célula Peltier con disipador heat pipe sobre pasta térmica	68
1.9.4 Célula Peltier con disipador pasivo sobre pasta térmica	70
1.10. Estudio teórico de viabilidad del TESC	72

1.10.1 Circuito de compresión simple de vapor	73
1.10.2 Circuito de compresión de vapor con IHX	73
1.10.3 Circuito de compresión de vapor con TESC	74
1.10.3.1 Método de la temperatura superficial constante	75
1.11. Resultados	78
1.11.1 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador de convección forzada	78
1.11.2 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador heat-pipe montado con lámina de grafito	81
1.11.3 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador heat-pipe montado con pasta térmica	83
1.11.4 Comparación de las diferentes configuraciones disipadores	85
1.11.5 Viabilidad del TESC	87
1.11.5.1 Punto de trabajo óptimo de las células Peltier	87
1.11.5.2 Efecto del TESC sobre el COP del circuito	88
1.11.5.2 Efecto del TESC sobre el caudal de refrigerante del circuito	90
1.12. Conclusión	91
1.13. Referencias	93

# 1.1. Introducción

## 1.1.1 Evolución histórica de la producción de frío

La historia de la producción de frío artificial se remonta al siglo XVII. En el año 1659, Robert Boyle, un científico Londinense, considerado como uno de los padres de la química y conocido principalmente por la ley de Boyle-Mariotte, según la cual se relaciona la presión y el volumen de un gas mantenido a temperatura constante, construyó la primera iteración de lo que actualmente se conoce como bomba de vacío, y que en aquel entonces se conoció como "*Pneumatic engine*". Con este dispositivo realizó una gran cantidad de experimentos, tal y como puede verse en su obra "*New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air, and its Effects (Made, for the Most Part, in a New Pneumatical Engine)*". En uno de los experimentos, en un intento por probar que los seres vivos necesitan aire para sobrevivir, colocó un pájaro en un frasco y sacó el aire, creando vacío. Como era de esperar, el pájaro murió, pero curiosamente, también se congeló. Este dramático experimento, le llevó a proponer que variar el volumen o la presión de un gas tenía un efecto directo sobre su temperatura [Noel West, 2002].

Más tarde, en 1755, William Cullen, médico y químico escocés, profesor de la universidad de Glasgow y fundador de la *Royal Society of Edinburgh*, realizó las que se han considerado las primeras experimentaciones acerca de la producción de frío artificial basadas en la evaporación de fluidos en el vacío, un fenómeno acerca del cual escribió en su obra "*Of the Cold Produced by Evaporating Fluids and of Some Other Means of Producing Cold*", si bien los intereses de este científico se centraban en la medicina y la química, por lo que estos primeros experimentos no derivaron en una aplicación práctica [Roger Thévenot, 1979]. Unos años después, en 1761, su discípulo, Joseph Black, descubrió que al aplicar calor al hielo, éste no se convertía en líquido inmediatamente, sino que absorbía una cierta cantidad de calor sin aumentar la temperatura, y posteriormente se producía el cambio de estado. Lo mismo ocurría al aplicar calor al agua hirviendo, absorbía una cantidad de calor diferente y posteriormente se evaporaba [Ramsay, MacLehose, 1904]. Este valor de calor absorbido manteniendo la temperatura antes del cambio de estado variaba según la sustancia y la naturaleza del cambio de estado. A esta cantidad de energía requerida por una sustancia para cambiar de fase le llamó calor latente, y fue un hito científico que no fue sino la cuna de una nueva ciencia, la termodinámica, que rige los ciclos en los que operan las máquinas de refrigeración por compresión de vapor.

En 1805, Oliver Evans, inventor e ingeniero estadounidense, fue el primero en describir la refrigeración por compresión de vapor. Este visionario, que produjo diseños y tuvo ideas avanzadas a su época, planteó el uso de circuitos cerrados en los que se empleaba éter, un fluido volátil, para enfriar agua líquida y generar hielo [Eugene S. Ferguson, 1980].

En 1821, Thomas Jordan Seebeck, físico germano, observó que existía una relación entre el calor y el magnetismo, lo que lo llevó a realizar una serie de experimentos en los que pudo observar que la unión de dos metales diferentes producía el desvío de una aguja imantada cuanto eran expuestos a un gradiente térmico [Frederick Partington, 2017 Rewrite], dando origen a lo que se conoce como termoelectricidad, término que concibió el físico danés Hans Cristian Oersted, cuyas investigaciones en este ámbito estuvieron en la misma línea que las de Seebeck. De esta manera, Seebeck consideró erróneamente que el efecto de este gradiente térmico era la magnetización del material, por lo que no fue hasta 1834, con la llegada de Jean Charles Peltier, que se describió el efecto térmico que venía dado por la unión de dos metales diferentes, y no por la magnetización del material.

Ese mismo año, Jacob Perkins, físico e ingeniero estadounidense, siguiendo las ideas de Oliver Evans, fabricó la primera máquina de compresión simple de vapor con el objetivo de fabricar hielo, y obtuvo la patente de lo que marcaría un antes y un después en la historia y la industria de la refrigeración [Roger Thévenot, 1979].

Cuatro años más tarde, en 1838, Heindrich Friedrich Emil Lenz, físico alemán conocido por la ley que lleva su mismo nombre, ley de Lenz, siguiendo la línea de los estudios que realizó Peltier y con el objetivo de explicar el fenómeno termoeléctrico, realizó un sencillo experimento que consistente en la colocación de una gota de agua en la unión de dos alambres, uno de bismuto y el otro de antimonio. La gota de agua se congeló al circular la corriente en un sentido, y se derritió al circular la corriente en sentido inverso, demostrando así que en una unión de dos metales distintos se genera calor o frío según el sentido de la corriente eléctrica [Villasevil Marco, 2011].

En 1844, el doctor John Gorrie, médico estadounidense que trabajó en florida combatiendo la fiebre amarilla, creó lo que se conoce como la primera máquina de aire acondicionado, y que consistía en un aparato con un motor a vapor y un conjunto de bielas y manivelas, que condensaban y expandían el aire siguiendo los descubrimientos de años anteriores. De esta manera, se creaban bloques de hielo, que se colocaban en las habitaciones de los enfermos de fiebre amarilla, refrigerando el ambiente con fines terapéuticos. Gorrie fue en un principio tachado de loco por tener esta ocurrencia, pero acabó demostrando la viabilidad de este sistema [Leila Macor, 2019]. Este primer modelo estaba diseñado para uso médico. Los primeros modelos comerciales de aire acondicionado llegarían unos 60 años después.

El último de los fenómenos termoeléctricos, así como la integración de todos ellos bajo el marco común de la termoelectricidad, vino de la mano de William Thomson, también conocido como Lord Kelvin por la introducción de la escala absoluta de temperaturas, que usa como unidad el grado Kelvin (K). Físico y matemático británico, destacó por ser uno de los científicos más prolíficos del siglo XIX [Matthew Trainer, 2004]. En 1851, descubrió que cuando circula corriente por un material homogéneo sometido a un

gradiente de temperatura se intercambia una cantidad de calor proporcional tanto a la corriente eléctrica como al gradiente de temperaturas, y la dirección de estos determina si el calor es generado o absorbido [Beretta et. al, 2018]. El descubrimiento de estos efectos termoeléctricos fue el pistoletazo de salida para el desarrollo por fin, de un nuevo campo de la ciencia y la ingeniería, la termoelectricidad, entendiendo como tal la transformación de energía térmica en eléctrica o recíprocamente, de eléctrica a térmica.

A partir de 1850, la ciencia y la industria de la producción de frío, si no es muy atrevido hablar de industria en estos años, tuvo un profundo desarrollo junto con el resto de sectores. Aumentó el número de patentes registradas y creció el interés en este tema [Global design database, 2020].

En 1908, se celebró en París el primer congreso internacional de refrigeración, y en 1913, se presentó el primer refrigerador doméstico destinado a la producción en serie, en la que fue la primera exposición internacional de la refrigeración. Tuvo lugar en Chicago. [Ashrae, 2020]

En 1922, el físico alemán Edmund Altenkirch introdujo el concepto de COP en la célula Peltier, definido como el cociente entre el calor absorbido por la cara fría y la potencia eléctrica consumida [Zabrocki, Seifert, Mueller, 2012]. También descubrió que los dispositivos termoeléctricos eran mejores cuando mayor era el coeficiente de Seebeck, menor era la resistencia eléctrica y menor era la conductancia térmica [Beretta et. al, 2018].

Hasta 1930, en los circuitos de refrigeración por compresión de vapor se empleaban fluidos refrigerantes como el amoníaco, el cloruro de metileno o el dióxido de azufre, compuestos peligrosos ya que eran tóxicos, inflamables e incluso altamente explosivos. Ese mismo año, Thomas Midgley Jr., ingeniero mecánico y químico estadounidense, descubridor del tetraetilo de plomo como aditivo para la gasolina, (ya que mejoraba el rendimiento de los motores, si bien posteriormente se demostró que perjudicaba gravemente el medio ambiente debido a su toxicidad) triunfó al desarrollar nuevos compuestos refrigerantes más seguros y baratos, los clorofluorocarbonos, o por sus siglas, CFCs. Estos, provocarían la catástrofe medioambiental del agujero de la capa de ozono en los años venideros [Edelmann, 2016].

Finalmente, en 1957, gracias a las aportaciones del prominente físico ruso Abram Fiódorovich Ioffe, el campo de la termoelectricidad se abre a los semiconductores, debido a que consiguen mayor eficiencia que los metales. A día de hoy, se han popularizado las células Peltier, dispositivos termoeléctricos diseñados para ya sea la producción de frío o la generación de electricidad, y como se comentará posteriormente, están formados precisamente por pares de semiconductores en serie.

La historia de los fluidos refrigerantes evolucionó de forma paralela a la de las máquinas frigoríficas. De esta manera, la primera generación de refrigerantes, la formaron éteres,



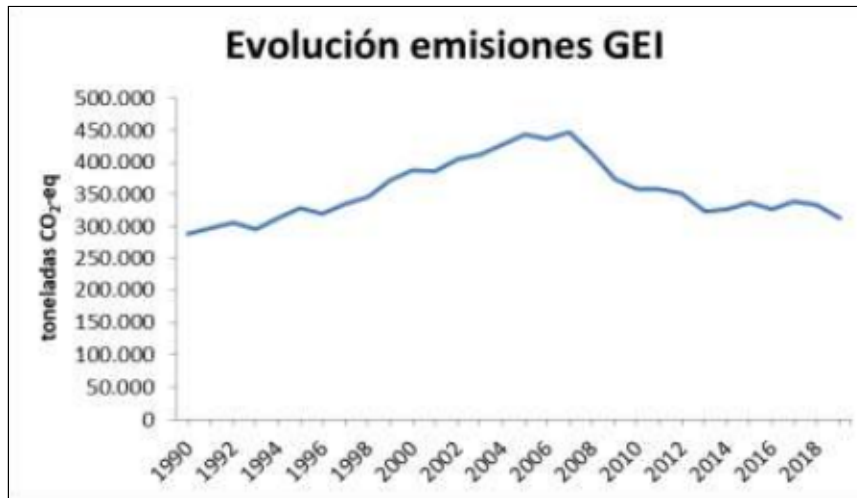
amoniaco, dióxido de azufre, y en general, cualquier cosa que funcionara para la producción de frío por nociva o inflamable que fuese. Hacia 1930, llegó la segunda generación, con el desarrollo de los CFCs. Se buscó que estos fluidos fueran seguros y ofrecieran buenas características, si bien se demostró que su efecto medioambiental era devastador por su potencial de agotamiento de la capa de ozono. [Calm, 2007]

Actualmente esta segunda generación ha sido sustituida por una tercera, e incluso una cuarta generación de refrigerantes, más eficientes y respetuosos con el medio ambiente[Calm, 2007].

### **1.1.2 Contexto actual**

Ya en enero de 1989, con la entrada en vigor del protocolo de Montreal, se planificó la eliminación gradual de los CFCs de forma asimétrica según el nivel de desarrollo de los países, en un esfuerzo a nivel internacional por reducir las emisiones mundiales de sustancias agotadoras de la capa de ozono, con el objetivo de que esta capa protectora se haya regenerado hacia el año 2050. Este tratado, que fue endurecido en posteriores revisiones, dio paso a los refrigerantes de tercera generación, refrigerantes que deben ser respetuosos con la capa de ozono, pero como se demostró posteriormente, contribuyen al efecto invernadero [Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2019],[UN Environment programme, 2020]. Con la entrada en vigor del Protocolo de Kioto en 2005, se acordó a escala internacional reducir las emisiones de efecto invernadero. La Unión Europea (UE), en el período 2013-2020, ha comunicado la intención de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% respecto al año 1990 [Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico].

En España, la evolución cronológica de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) puede verse en la Figura 1.1.2-1.



**Figura 1.1.2-1:** Valores anuales de emisiones de GEI en España. [Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Gobierno de España. Avance de emisiones de gases de efecto invernadero, año 2019].

Como puede observarse, la dirección es la correcta, las emisiones de GEI se están reduciendo año a año de forma gradual, pero queda aún mucho camino por recorrer. Este año 2020, expira la vigencia del Protocolo de Kioto, pero entra en vigor el acuerdo de París firmado en 2016, por lo que los países deben seguir esforzándose en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

### 1.1.3 Lugar de los módulos termoeléctricos en la industria

A día de hoy, las células Peltier se emplean para una gran cantidad de fines, si bien, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, se impone como el claro vencedor en la industria de la producción de frío a gran escala, ya que puede generar grandes cantidades de frío consumiendo una cantidad de energía asumible.

En comparación a los sistemas de producción de frío por compresión de vapor, los dispositivos termoeléctricos son capaces de producir frío sin partes móviles que suelen ser el origen de fallos mecánicos y desgaste. Además, los módulos termoeléctricos, no emplean ningún fluido refrigerante, por lo que no existe el riesgo de liberar estas sustancias a la atmósfera, ni la necesidad de rellenar un circuito cuando este fluido se termine fugando, fluido que además alcanza grandes presiones durante el ciclo de trabajo, y su naturaleza en ocasiones inflamable puede ser un problema en atmósferas de naturaleza explosiva. Estos motivos, a lo que se suma la cantidad de ruido que producen las instalaciones de refrigeración por compresión de vapor en comparación a las completamente silenciosas células Peltier, y como ya se intuye, su complejidad mecánica y su no siempre fácil regulación, hacen que esta tecnología no sea viable en numerosas aplicaciones que requieren de la producción de frío o el control de la temperatura. Son estas, las aplicaciones en las que los módulos termoeléctricos,

dispositivos silenciosos, sencillos, robustos, fiables, altamente integrados, y fáciles de controlar y regular, entran en escena.

Más allá de la producción de frío en neveras de pequeñas dimensiones, las células termoeléctricas, se están empleando ya sea para recuperar energía, o producir frío, en la industria aeroespacial, la automovilística y la de la salud entre otras.

En la industria aeroespacial, se emplean tanto en lanzaderas como en satélites, tanto para la generación de electricidad, aprovechando el calor ya sea generado a partir de la fisión nuclear o por otros procesos, y el frío del espacio (Ya que no siempre puede disponerse de luz solar que alimente las placas solares), como para la producción de frío. También se han empleado para controlar la temperatura en ciertos experimentos [Nesrine Jaziri, Ayda Boughamoura, Jens Müller, Brahim Mezghani, Fares Tounsi, Mohammed Ismail, 2019], [Ludek Janak, Zdenek Ancik, Jan Vetiska, Zdenek Hadas, 2015].

En la industria automovilística, se están empezando a emplear módulos termoeléctricos para el control de la temperatura de las baterías en los coches eléctricos, de forma que con estos sistemas la degradación por temperatura de la batería se reduzca considerablemente, y se extienda por tanto la vida útil de las mismas [Lyu, Siddique, Majid, Biglarbegan, Gadsden, Mahmud, 2019]. El fabricante alemán BMW ha puesto en marcha varios proyectos en los que se investiga el aprovechamiento del calor perdido en los gases de escape para generar electricidad mediante el uso de módulos termoeléctricos [Liebl, Neugebauer, Eder, Linde, Mazar, Stütz, 2009].

En la industria de la salud, se emplean principalmente para alimentar implantes médicos electrónicos, aprovechando el gradiente de temperatura entre el cuerpo humano y el exterior. [Nesrine Jaziri, Ayda Boughamoura, Jens Müller, Brahim Mezghani, Fares Tounsi, Mohammed Ismail, 2019].

Por si fuera poco, cada vez se están encontrando más aplicaciones para las células termoeléctricas, que en los últimos años están ganando popularidad a juzgar por la gran cantidad de artículos científicos que hablan de nuevos usos y potenciales posibilidades.

## 1.2. Justificación

La producción de frío por compresión mecánica de vapor es el método de producción de frío por excelencia en la actualidad. Su fácil mantenimiento, la sencillez de su operación y su moderado consumo eléctrico hacen este sistema idóneo para una gran cantidad de aplicaciones, desde sistemas de aire acondicionado ya sea para automóviles o para el hogar, hasta contenedores frigoríficos de tamaño industrial.

Estos equipos, que han avanzado de forma considerable en términos medioambientales en los últimos años, siguen contribuyendo al efecto invernadero, tanto de forma directa (37%), debido a emisiones de los fluidos de trabajo, como de forma indirecta (63%), debido a su consumo eléctrico [IIR ,2019], por lo que deben adaptarse a los nuevos criterios medioambientales, cada vez más restrictivos. Dentro de todo este contexto, se ha decidido realizar el estudio teórico de viabilidad del TESC en un circuito cuyo fluido de trabajo sea el R32, por ser un fluido con un potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) de cero, y un potencial de calentamiento global (GWP), bajo en comparación con otros refrigerantes comúnmente utilizados.

Por otra parte, cabe destacar que el volumen de este sector, es tal, que representa en torno a un 17% del consumo global de electricidad [IIF-IIR, Coulomb, Dupont, Pichard, 2016], y se estima que las ventas anuales de equipos de refrigeración, aires acondicionados y bombas de calor a nivel global mueven un capital de unos 500.000 millones de dólares al año [IIR ,2019]. Así mismo, en Estados Unidos, se prevé un aumento del 21% en el número de empleos relacionados con el mantenimiento, instalación y diseño de equipos de acondicionamiento de aire desde 2012 a 2022, una tasa de crecimiento mucho mayor que la media de crecimiento del resto de ocupaciones laborales, situada en torno a un 11% [United States Department of Labor, 2015].

Esto, sumado a la importancia de la producción de frío en sectores tan esenciales como el alimenticio, en el que a escala global se pierde hasta un 20% de la cantidad de producto debido a la falta de refrigeración y la consiguiente pérdida en la cadena de frío [IIR, 2009], confiere a la industria frigorígena un peso y una importancia tal, que hace de gran interés el estudio de alternativas para conseguir que estos sistemas, sean cada vez más eficientes, y también, menos contaminantes.

### **1.3. Objetivos y alcance**

Visto el peso de este sector a nivel global tanto en la industria como en la economía, así como su impacto en el medio ambiente, es imperativo invertir en el estudio de mejoras y alternativas para los equipos que se emplean. Este trabajo tiene el objetivo principal de caracterizar la célula Peltier, un dispositivo que pese a tener años de historia, se presenta como una novedosa alternativa, muy prometedora en la mejora del rendimiento de equipos de refrigeración por compresión de vapor, equipos con un gran protagonismo hoy en día. Para ello se ha desarrollado un banco de ensayos físico en el que se podrá estudiar el comportamiento de estas células con diferentes configuraciones de disipadores y en un amplio régimen de funcionamiento.

Habrá que tener en cuenta los parámetros que rigen el funcionamiento de las células, medir todas las variables implicadas, desde los consumos eléctricos a las temperaturas alcanzadas, y seguir una metodología de ensayos que posteriormente permita extrapolar los datos a todos los puntos de funcionamiento dentro del rango de trabajo de la misma. Desarrollar esta metodología es un objetivo específico que determinará en gran medida el objetivo principal. Como objetivos específicos, también está la correcta construcción del banco de ensayos, cuyo montaje requiere de numerosas competencias técnicas y manuales que incluyen el manejo de maquinaria industrial como el taladro de columna.

Este trabajo también alcanza el estudio a nivel teórico de estos sistemas con el objetivo principal de determinar si son realmente viables como equipos de subenfriamiento a la salida del condensador de equipos de compresión de vapor, para lo cual se partirá de un circuito de compresión simple de vapor, y con el programa EES (Engineering Equation Solver), se simulará el efecto de añadir el dispositivo de subenfriamiento. También se comparará con otros sistemas de subenfriamiento como el intercambiador intermedio (IHX).

## 1.4. Antecedentes

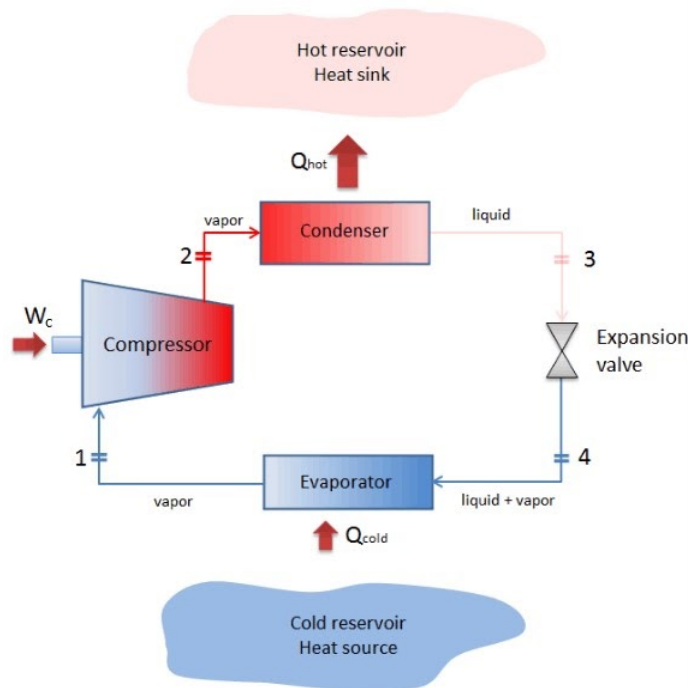
Como se ha visto, las células termoeléctricas, son dispositivos que reúnen una serie de características que las hacen muy interesantes para una gran cantidad de aplicaciones, sin embargo, este trabajo se centrará en su uso como sistemas de subenfriamiento en equipos de refrigeración por compresión de vapor. Anteriores estudios experimentales, ya han concluido que efectivamente, el uso de TESC (subenfriadores termoeléctricos) , puede llegar a mejorar el rendimiento en ciclos de CO<sub>2</sub> hasta en un 20% [D. Astrain, A. Merino, L. Catalán, P. Aranguren, M. Araiz, D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, 2019], pero sería interesante estudiar con qué sistema de disipación ofrece mejores resultados la célula Peltier, es decir, con qué configuración de disipadores se consigue la máxima temperatura de cara fría, bajo una carga térmica y una tensión de alimentación dadas. Este trabajo busca responder a esta problemática, mediante un método de ensayos robusto y fiable, que permita obtener datos que esclarezcan cual es la configuración más óptima según el régimen de operación de las células Peltier del TESC.

## 1.5. Fundamentos teóricos

### 1.5.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor se basa en la capacidad que tiene un fluido de absorber energía cuando se evapora. Las máquinas que funcionan siguiendo este ciclo, trabajan absorbiendo calor de un foco frío, y liberándolo a un foco caliente que está a mayor temperatura.

Esto parece contradecir la segunda ley de la termodinámica, que ha sido expresada de muchas formas diferentes, pero la definición que más se ajusta a esta problemática, es la que formuló el científico alemán Rudolf Clausius en 1850; *“Es imposible que una máquina autónoma, sin ayuda de algún agente externo, transfiera calor de un cuerpo a otro más caliente”*. Sin embargo, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor es compatible con este postulado, ya que para pasar el calor del foco frío ( $Q_{cold}$ ) al caliente ( $Q_{hot}$ ), se realiza un aporte externo de energía, en forma de trabajo mecánico ( $W_C$ ). Ver Figura 1.5.1-1.



**Figura 1.5.1-1:** Esquema de un circuito simple de refrigeración por compresión de vapor [tomado y adaptado de [thermal-engineering.org](http://thermal-engineering.org)].

De esta manera, realizando un balance energético a este sistema se obtiene la expresión (1).

$$Q_{cold} + W_C = Q_{hot} \quad (1)$$

Por tanto, puede afirmarse que la cantidad de calor extraída al foco frío, será siempre menor a la aportada al foco caliente.

Dado que estos dispositivos, buscan extraer la mayor cantidad de calor del foco frío, para cederlo al foco caliente consumiendo el menor trabajo posible, puede definirse el rendimiento como el cociente entre la cantidad de calor extraída del foco frío y el trabajo que se ha aportado, si bien, esta definición de rendimiento puede llevar a valores superiores a la unidad, según la relación entre  $Q_{\text{cold}}$  y  $Q_{\text{hot}}$  del sistema, por lo que en lugar de rendimiento se ha empleado el término COP o coeficiente de rendimiento, del inglés, coefficient of performance, y que sigue la expresión (2).

$$COP = \frac{Q_{\text{cold}}}{W_c} \quad (2)$$

Este parámetro, será por tanto el que se intentará maximizar para conseguir así la mayor producción de frío, con el menor trabajo posible.

En cuanto al ciclo de funcionamiento, el circuito básico de refrigeración por compresión de vapor opera siguiendo 4 etapas. Estas etapas son: Compresión, condensación, expansión y evaporación, y que corresponden a las etapas 1-2, 2-3, 3-4 y 4-1 de la Figura 1.5.1-1.

- **Etapas 1-2, Compresión.**

En esta etapa, el fluido refrigerante, que ha salido del evaporador a las condiciones del punto 1, es decir, a temperatura de evaporación, con un título de vapor igual a la unidad (Vapor saturado), y a presión de evaporación ( $P_0$ ), es comprimido por el compresor, que lo eleva a la presión de condensación ( $P_k$ ), siguiendo una recta de entropía constante. La energía que se requiere para elevar la presión de 1 a 2 es  $W_c$ . Ver Figura 1.5.1-2

- **Etapas 2-3, Condensación.**

La etapa de condensación, es aquella en la que el fluido, que está en condiciones de vapor sobrecalentado y a una presión de  $P_k$ , cede el calor al ambiente en el condensador, que es básicamente un intercambiador de calor que permite esta transferencia térmica. En el condensador, el fluido se enfría a presión constante desde la temperatura del punto 2 hasta la temperatura de condensación, y el resto de calor cedido se invierte en el cambio de estado del fluido, pasando este de vapor a líquido saturado a la salida del condensador (Punto 3). Este intercambio de calor latente se produce dentro de la campana de saturación del fluido, tal y como puede verse en la Figura 1.5.1-2.

- **Etapas 3-4, Expansión.**

El fluido refrigerante, que sale del condensador en condiciones de líquido saturado, pasa por una válvula de expansión, que baja su presión de  $P_k$  a  $P_0$ . Esta expansión se produce a entalpía constante. Al bajar la presión, y dado que en el punto 3 el fluido se halla en condiciones de líquido saturado, se vuelve a entrar a la campana de saturación,

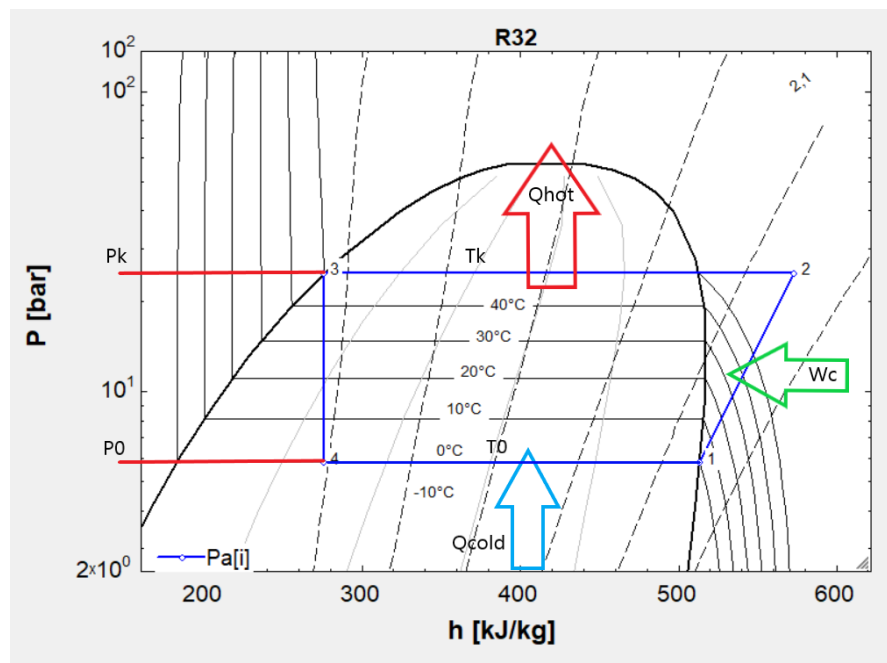


de manera que una importante fracción del fluido mantiene la fase líquida, pero el resto es fase vapor. Este punto en el que la presión vuelve a ser  $P_0$  es el punto 4.

- **Etapas 4-1, Evaporación.**

La última etapa del ciclo es la evaporación, y es precisamente en la que se consigue la producción de frío.

Tras la expansión, el fluido se ha quedado en fase multifásica, y al pasar por el evaporador, que es un intercambiador de calor al igual que el condensador, se absorbe calor del foco frío. Esto es posible gracias a la baja presión a la que está el condensador, que permite que el fluido evapore y por tanto absorba  $Q_{\text{cold}}$ . Dado que el fluido es multifásico al entrar al evaporador, el calor absorbido no se empleará en incrementar la temperatura, sino en aumentar la fracción de vapor hasta conseguir que todo el fluido se haya evaporado, instante en el que nos encontraremos en el punto 1, listos para volver a empezar el ciclo.



**Figura 1.5.1-2:** Ciclo de trabajo de un circuito simple de refrigeración por compresión de vapor, a lo largo de la campana de saturación del fluido refrigerante R32.

## 1.5.2 Semiconductores

Un semiconductor, suele definirse como un material que presenta una conductividad eléctrica a medio camino entre un conductor y un aislante, sin embargo esta definición es un tanto imprecisa, ya que si estos materiales son interesantes, es principalmente porque sus propiedades varían de forma sensible ante factores como el campo eléctrico, la presión o la temperatura.

Los semiconductores, conducen la electricidad a través de cargas libres (electrones o “huecos”) que hay presentes en su estructura molecular, y según la polaridad de estas cargas, pueden clasificarse como tipo N o tipo P. [Fink, Beaty, 1981]

- **Semiconductores tipo N**

Poseen portadores de carga negativos, es decir, electrones que se van desplazando a través del material conduciendo la electricidad.

- **Semiconductores tipo P**

Poseen portadores de carga positivos. Estos portadores de carga, también llamados huecos, son espacios en la red del material en los que hay carencia de electrones, por tanto presentan una carga positiva.

De forma intrínseca, los semiconductores, no son buenos conductores, por lo que hay que añadir impurezas. Estas impurezas, son átomos de otros materiales que confieren al semiconductor su carácter N o P.

De esta manera, si a un semiconductor como el silicio o el germanio, se le añaden átomos de un semiconductor pentavalente como el fósforo o el antimonio, se habla de semiconductor dopado N. Sin embargo, si se añaden átomos otro semiconductor, trivalente como el galio, se habrá constituido un semiconductor con dopado P [Rodríguez, 2001], [Fink, Beaty, 1981], [García, 2012].

Como se verá en el siguiente apartado, las células Peltier están formadas por pares de semiconductores N y P colocados eléctricamente en serie.

### **1.5.3 Célula termoeléctrica o célula Peltier**

#### **1.5.3.1 Qué es una célula Peltier**

Una célula Peltier, es un dispositivo termoeléctrico de base generalmente cuadrada, en el que pueden identificarse dos caras planas paralelas. Estas caras, formadas de un material cerámico, aíslan el conjunto eléctricamente del exterior, mientras permiten una buena conducción del calor, y aportan integridad estructural al conjunto. En el interior de la célula Peltier, hay una gran cantidad de pares termoeléctricos formados por un termoelemento N, y un termoelemento P (que consisten en un semiconductor N y un semiconductor P respectivamente), unidos a través de un conductor metálico, generalmente cobre. Los pares termoeléctricos están conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Un módulo Peltier promedio presenta entre 200 y 600 termoelementos de base cuadrada de entre 1 y 9 mm<sup>2</sup> y una altura de entre 0,5 y 3 mm [Aranguren, 2015].

En la Figura 1.5.2-1 puede observarse la vista de explosión de una célula Peltier con todos sus elementos.

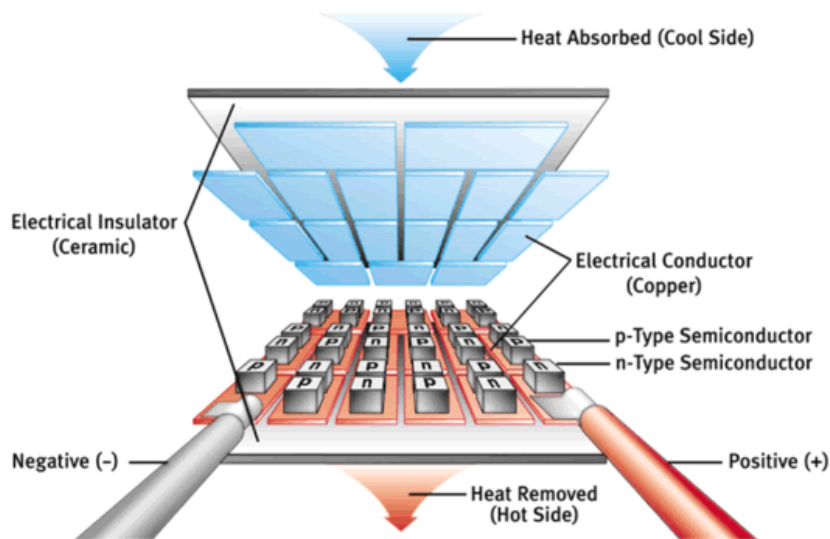


Figura 1.5.3-1: Célula Peltier [Profesionalreview.com, 2018].

Cuando una célula Peltier se alimenta con una tensión continua, cada elemento semiconductor de la celda se polariza, y queda sometido a una diferencia de potencial proporcional a la tensión de entrada. De esta manera, los portadores de carga negativa, es decir, los electrones libres presentes en el material debido a las impurezas, emigran hacia el lado positivo de cada uno de los extremos del termoelemento N debido a la fuerza de atracción entre cargas de signo opuesto. El efecto opuesto ocurre en los termoelementos P, en los que los portadores, huecos, emigran hacia el lado de menor potencial. Esta migración de cargas provoca el calentamiento o el enfriamiento del material. Los lugares con un exceso de portadores de carga negativa, electrones, sufren un ascenso de la temperatura, que a su vez, baja en aquellos lugares en los que hay una ausencia de estas cargas, y por tanto, predominan los huecos [Sandoval, Espinosa, Barahonda, 2013], [Rowe, 2006].

Se ha hablado de que las cargas libres son las responsables del calentamiento o el enfriamiento del material, pero no se ha comentado a qué es debido este fenómeno. Este fenómeno, se debe a que cuando un electrón pasa de un termoelemento dopado positivamente, a uno dopado negativamente, pasa de un nivel energético inferior a un nivel energético superior, absorbiendo por tanto energía, y de esta manera calor. Por otra parte, cuando un electrón pasa de un termoelemento dopado negativamente, a uno dopado positivamente, este electrón pasa a un nivel energético menor, luego libera energía, y por tanto calor [Lucas, 2011]. Ver Figura 1.5.2-2.

Como ya era de suponer, dentro de la célula Peltier, los pares termoeléctricos, están ordenados de forma que las zonas frías coinciden en la cara fría, que absorberá calor, y las calientes con la cara caliente, que generará calor.

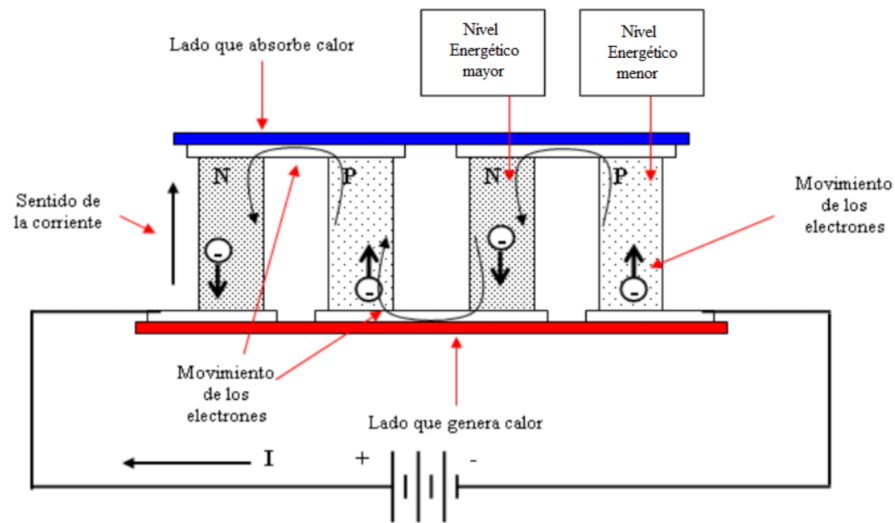


Figura 1.5.2-2: Esquema de movimiento de las cargas en una célula Peltier [Lucas, 2011].

### 1.5.3.2 Fenómenos implicados

En el funcionamiento de las células Peltier, intervienen una serie de fenómenos físicos que rigen el comportamiento de estos dispositivos. Estos fenómenos son los efectos Seebeck, Peltier y Thomson, aunque también intervienen otros más elementales como el efecto Joule.

- **Efecto Seebeck**

El efecto Seebeck es una conversión de energía térmica en energía eléctrica bajo la condición de intensidad de corriente nula. De esta manera, sean X e Y dos metales homogéneos distintos, unidos en los puntos A y B, y sometidos a un gradiente térmico entre las dos uniones, aparecerá entre ellos una diferencia de potencial  $V_0$  proporcional al gradiente térmico impuesto. Esta constante de proporcionalidad, que además no es constante sino que depende de la temperatura, se define coeficiente de Seebeck. [Herranz, 2008]. En la Figura 1.5.2-3 se muestra el esquema de las configuraciones mencionadas.

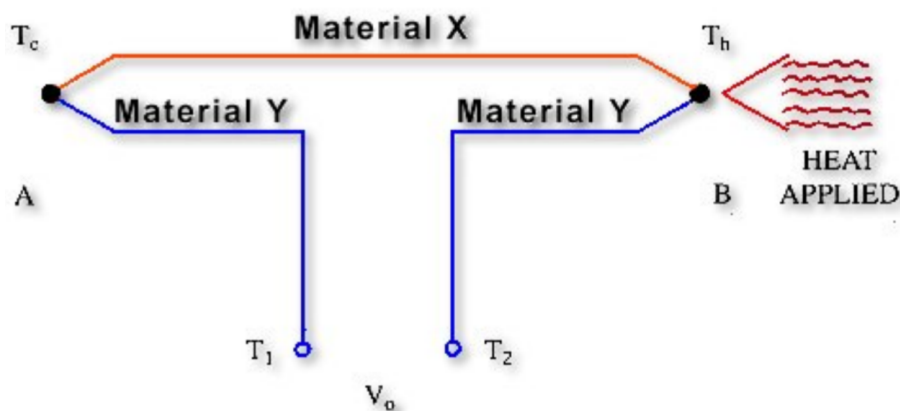


Figura 1.5.2-3: Diagrama efecto Seebeck [monografias.com].

De estas forma, según lo descrito anteriormente, el coeficiente de Seebeck puede expresarse según la expresión (3), o análogamente según la expresión (4).

$$\alpha_{XY} = \frac{\partial V_0}{\partial T} = \alpha_X - \alpha_Y \quad (3)$$

$$V_0 = \int_{T_c}^{T_h} \alpha_{XY} dT \quad (4)$$

Donde:

$\alpha_{XY}$  es el coeficiente de Seebeck entre los dos metales.

$\alpha_X$  es la potencia termoeléctrica del metal X.

$\alpha_Y$  es la potencia termoeléctrica del metal Y.

La potencia termoeléctrica o termopotencia de un metal, es comúnmente llamada coeficiente de Seebeck del metal, si bien esta última designación queda reservada a los casos de unión entre dos metales. Las unidades son V/K (o  $\mu\text{V/K}$ ).

El efecto Seebeck, es el efecto en el que se basa el funcionamiento de los termopares. Por ejemplo, un termopar tipo T (Cobre-constantán), tiene un coeficiente de Seebeck de  $40.7 \mu\text{V/K}$ , y un termopar tipo K (Cromel-alumel), tiene un coeficiente de Seebeck de  $40.5 \mu\text{V/K}$ .

- **Efecto Peltier**

El efecto Peltier es el efecto inverso al efecto Seebeck, y consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos conductores diferentes al pasar una corriente eléctrica por ella, que ha sido generada por la aplicación de una tensión  $V_{in}$ . [Patterson, Sobral, 2007]

La potencia calorífica intercambiada por la unión entre los materiales X e Y, entre los puntos A y B puede obtenerse de la ecuación (5).

$$q' = J \cdot \pi_{XY} = J \cdot \Delta T \cdot \alpha_{XY} \quad (5)$$

Donde:

$q'$  es la densidad de potencia calorífica intercambiada.

$\pi_{XY}$  es el coeficiente de Peltier entre los dos metales.

$J$  es el flujo de corriente eléctrica.

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura absoluta entre los puntos A y B.

El coeficiente de Peltier se define como el calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula a través de la misma.

En la Figura 1.5.2-4 se muestra un esquema de la configuración mencionada.

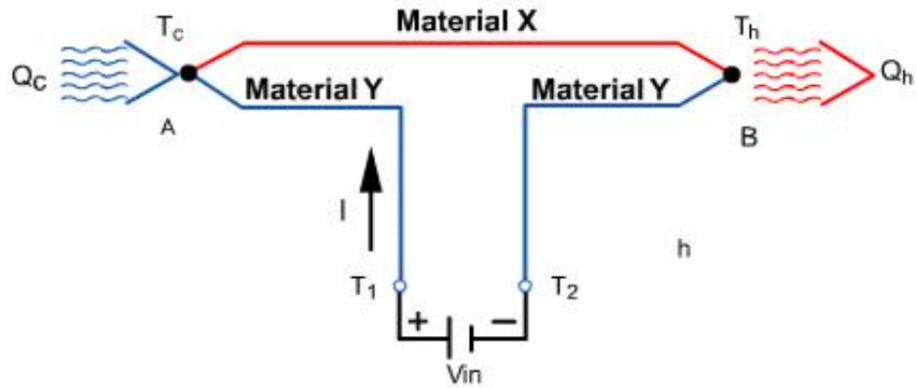


Figura 1.5.2-4: Diagrama efecto Peltier [monografias.com].

La corriente que circula por el circuito, depende exclusivamente de la composición y la temperatura de la unión, y es un parámetro muy importante a medir en los ensayos que se van a realizar, ya que como se comprobará posteriormente, su valor aumenta con la potencia térmica a la que se somete la célula Peltier para una misma tensión de alimentación de la misma.

- **Efecto Thomson**

El efecto Thomson, consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo, sometido a un gradiente de temperatura y por el que circula una corriente [Lorrio, 2010]. En la Figura 1.5.2-5 se muestra un esquema del efecto Thomson.

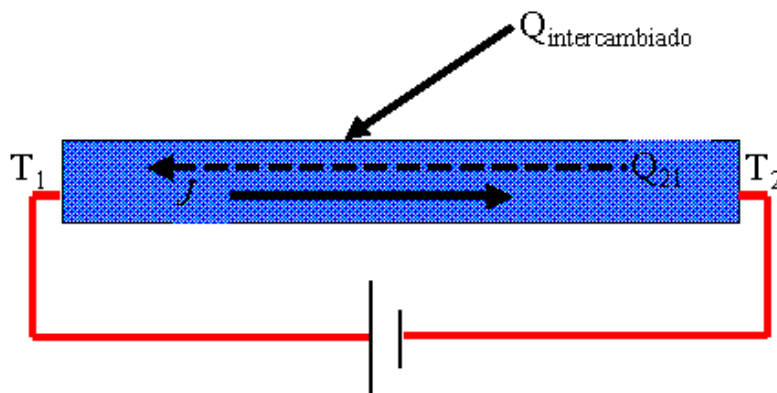


Figura 1.5.2-5: Diagrama efecto Thomson [www.unavarra.es].

El efecto Thomson es reversible, es decir, el flujo de calor cambia el sentido al cambiar el sentido la electricidad. [Herranz, 2008]

El flujo de calor generado por efecto Thomson viene dado por la ecuación (6).

$$q'_{Thomson} = \mu \cdot \nabla T \cdot J \quad (6)$$

Donde:

$q'$  es la densidad de potencia calorífica intercambiada.

$\mu$  es el coeficiente de Thomson.

$J$  es el flujo de corriente eléctrica.

$\nabla T$  es el gradiente de temperatura en el conductor.

- **Efecto Joule**

Una de las más conocidas interacciones entre un fenómeno eléctrico y un fenómeno térmico asociado [Lorrio, 2010]. Este proceso irreversible, tiene lugar al circular una intensidad de corriente eléctrica  $I$ , por un conductor eléctrico de resistencia  $R$ , y tiene como consecuencia la aparición de un flujo transversal de calor en el conductor. Este flujo de calor aparece debido a la conversión de energía cinética en calor a través de los choques que sufren los electrones con los núcleos atómicos del material, o de impurezas del mismo [Lucas, 2011].

La potencia calorífica disipada por efecto Joule viene definida por la ecuación (7).

$$Q_j' = R \cdot I^2 \quad (7)$$

Donde:

$Q_j'$  es la potencia calorífica disipada por efecto joule.

$I$  es la corriente eléctrica.

$R$  es la resistencia eléctrica del conductor.

El efecto Joule, tiene suma importancia en el funcionamiento de las Células Peltier, ya que de no existir este efecto, de forma teórica y según la ecuación (5), la diferencia de temperaturas entre ambos lados de la célula Peltier, aumentaría con la corriente sin ningún tipo de restricción hasta alcanzar valores que en la práctica serían inasumibles. Es por esto que la potencia que consume la Peltier es la suma de la potencia que se disipa por efecto Joule, y la que se emplea para provocar el efecto Peltier, y por tanto el salto de temperaturas entre ambas caras, tal y como se muestra en la ecuación (8).

$$P_{in} = R \cdot I^2 + I \cdot \Delta T \cdot \alpha_{XY} \quad (8)$$

Donde  $P_{in}$  es la potencia con la que se alimenta la célula Peltier.

#### 1.5.4 Heat pipe

Los *heat-pipes* (HP), son dispositivos compactos pero eficientes, que se emplean para transferir grandes cantidades de calor desde un foco caliente a un foco frío dentro de un espacio confinado, en la mayoría de los casos, sin la necesidad de un aporte externo de energía [Samson Shittu, Guiqiang Li, Xudong Zhao, Jinzhi Zhou, Xiaoli Ma, Yousef

Golizadeh Akhlaghi, 2020]. Estos dispositivos se basan en el calor que es capaz de absorber un fluido al evaporarse, y su capacidad para liberarlo a un foco frío cuando este condensa.

Existen una gran cantidad de geometrías y configuraciones de HP, sin embargo, el disipador Heat Pipe Katana 5 que se ha empleado en los ensayos es de geometría cilíndrica, bucle cerrado y funciona por capilaridad. Estos HP, también se emplean para la refrigeración de los procesadores de la mayoría de los ordenadores portátiles que se venden hoy en día, y su versión plana está empezando a utilizarse en teléfonos de última generación. A continuación se describen sus componentes y su funcionamiento.

Como ya se ha comentado, los HP funcionan en base a la evaporación y posterior condensación de un fluido en un espacio confinado. De esta manera, un HP está formado por un conducto de un material altamente conductor térmico, generalmente cobre, que está sellado por ambos extremos, y en su interior, se hallan una pequeña cantidad de fluido refrigerante, y una malla metálica de geometría similar a la del conducto, que está situada a lo largo de las paredes del mismo y deja en su interior espacio para que circule el fluido evaporado. El HP dispone de tres secciones principales: El evaporador, el condensador, y la sección adiabática, que une las dos primeras. En la Figura 1.5.2-6 se muestran las partes de un HP.

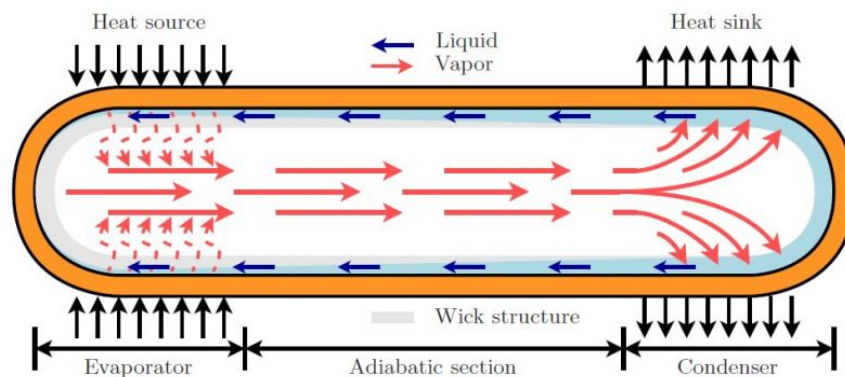


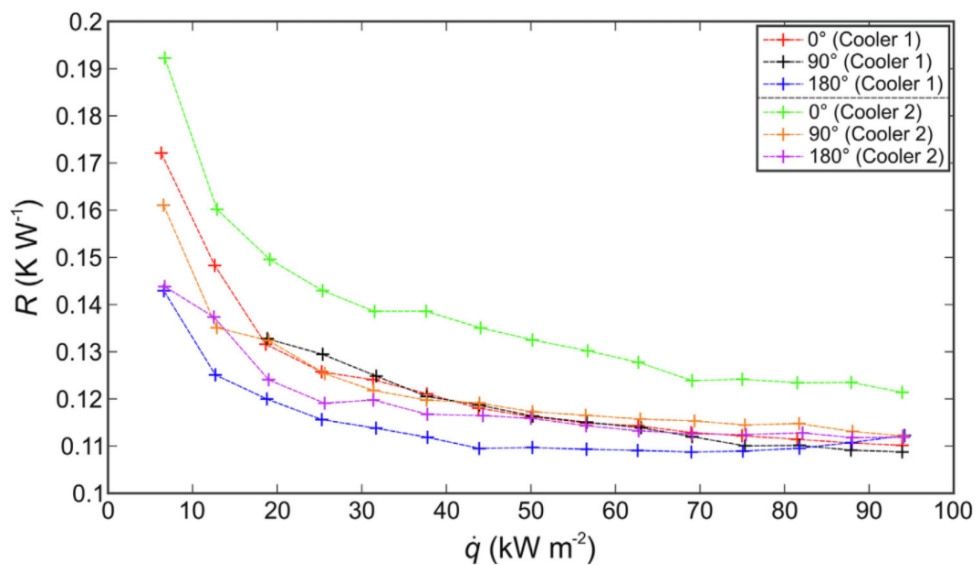
Figura 1.5.2-6: Sección longitudinal esquematizada de un heat pipe [www.heatpipe.nl].

En el evaporador, el fluido evapora absorbiendo calor del foco caliente, y se traslada al condensador por convección, donde se condensa, y libera el calor absorbido al foco frío. Llegados a este punto, el fluido líquido, que entra en contacto con la malla metálica, vuelve a desplazarse al evaporador por el fenómeno de la capilaridad, que se produce cuando la cohesión intermolecular del fluido es menor que la adhesión del fluido con el material de la malla.

Una interesante característica de estos dispositivos es que debido a su principio de funcionamiento, presentan una resistencia térmica que varía con la temperatura [Može, Nemanič, Poredoš, 2020]. Ver Figura 1.5.2-7. Esto es debido a que hay una potencia mínima umbral a partir de la cual el fluido evapora, y por tanto el sistema empieza a



disipar el calor según se ha descrito anteriormente. Por esto, es muy importante seleccionar un HP adecuado para cada aplicación según la potencia que se vaya a disipar.



**Figura 1.5.2-7:** Evolución de la resistencia térmica de dos disipadores HP respecto a la potencia disipada [Može, Nemanič, Poredoš, 2020].

## 1.6. Componentes y materiales del banco de ensayos

En este apartado se comentarán los elementos que componen el banco de ensayos y el sistema de toma de datos. Estos elementos son un conjunto de dispositivos de hardware que integrarán el sistema térmico, las sondas y los dispositivos de medición, y el sistema de adquisición de datos así como las fuentes de alimentación. Cabe destacar que la cámara climática en la que se han realizado los ensayos, no se incluye en este apartado pese a ser imprescindible para llevar a cabo los mismos, ya que no se considera un dispositivo más del banco, sino parte de las instalaciones del taller, siendo las condiciones de temperatura de la misma, un requisito para la realización de los ensayos tal y como se expone posteriormente en el desarrollo de este trabajo.

### 1.6.1 Célula Peltier

La célula Peltier es el dispositivo termoeléctrico que se busca caracterizar. Presenta una forma cuadrada y unas dimensiones de 40 x 40 mm, siendo su espesor de 4mm. Se trata del modelo Marlow TG-12 8L (Figura 1.6.1-1), fabricado por Marlow Industries, y está diseñada de manera que sus soldaduras aguantan picos térmicos de hasta 160°C. En la Tabla 1.6.1-1 se muestran los parámetros de rendimiento de la célula según el fabricante.

Hot Side Temperature (°C)	27°C	50°C
$\Delta T_{max}$ (°C-dry N <sub>2</sub> ):	66	74
Q <sub>max</sub> (watts):	71	78
I <sub>max</sub> (amps):	7.4	7.4
V <sub>max</sub> (vdc):	14.7	16.4
AC Resistance (ohms):	1.6	---

Tabla 1.6.1-1: Parámetros de rendimiento célula Peltier Marlow TG-12 8L .

Esta célula no presenta sellado, lo cual resta fiabilidad a la célula en ambientes susceptibles a la aparición de condensados, motivo por el cual, como se verá posteriormente, se ha tenido especial cuidado a la hora de realizar los ensayos, aislando la célula adecuadamente, y vigilando para que ésta no alcanzara temperaturas excesivamente bajas en la cara fría.



Figura 1.6.1-1: Célula Peltier Marlow TG-12 8L .

## 1.6.2 Fuente de potencia térmica

La fuente de potencia térmica (Figura 1.6.1-1), es el dispositivo encargado de suministrar la carga térmica que la Peltier debe disipar. Está formada por un conjunto de 4 resistencias eléctricas inmersas en un bloque de cobre con la misma forma cuadrada que la célula Peltier y sus mismas dimensiones, si bien algo más gruesa. El hecho de que la superficie en planta de la célula y el bloque de cobre sea la misma no es casualidad, asegura que todo el flujo de calor generado pase a la cara fría del dispositivo termoeléctrico.

El conjunto de resistencias eléctricas, que tras ser medidas con un multímetro presentaron valores de 29, 27, 29 y 29 ohmios, se conectaron de forma que la potencia eléctrica absorbida, y por tanto la potencia térmica generada, fuera de un orden de magnitud tal que se llegara a valores de hasta unos 70W, cercanos al límite de carga térmica admisible establecido por el fabricante a 27°C para la célula Peltier, para que ésta no alcanzara temperaturas excesivamente elevadas.

De esta manera, si las resistencias se conectan en serie, aplicando la ecuación (9), se obtiene una resistencia del conjunto de 114 ohmios, mientras que si se realiza la conexión en paralelo, aplicando la ecuación (10), se obtiene una resistencia del conjunto de 7.118 ohmios.

$$R_{eq(serie)} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_{eq(paralelo)}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (10)$$

Donde :

$R_{eq}$  es la resistencia equivalente del conjunto.

$R_i$  es el valor de resistencia de cada una de las 4 resistencias empleadas.

Por tanto, si se quiere generar una potencia  $P$ , habrá que aplicar una tensión que viene dada por la expresión (12), que se obtiene a partir de la expresión (11), con la que se calcula la potencia de una resistencia a tensión constante.

$$P = \frac{V^2}{R_{eq}} \quad (11)$$

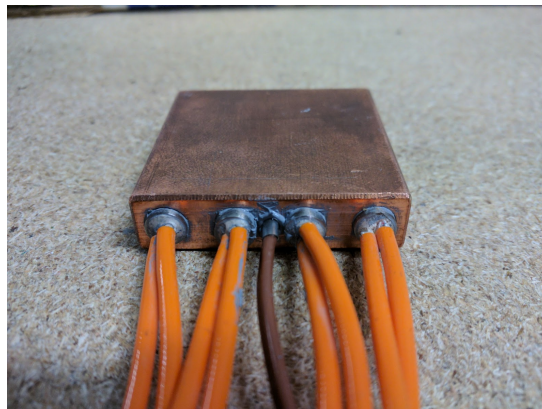
Despejando de (11) se obtiene (12).

$$V = \sqrt{P \cdot R_{eq}} \quad (12)$$

Donde :

$V$  es la tensión de alimentación del conjunto de resistencias.  
 $P$  potencia eléctrica consumida por las resistencias.

En el caso de la conexión en serie, la tensión que hay que aplicar para generar  $P=70W$ , es de 89.33V, mientras que si la conexión se realiza en paralelo, la tensión que hay que aplicar es de 22.32V. En base a este razonamiento, se ha decidido conectar las resistencias en paralelo, ya que 22V es una tensión mucho más segura que los casi 90V que se requieren si se realiza la conexión en serie.



**Figura 1.6.1-1:** Fuente de potencia térmica (Cables de las resistencias en naranja).

### 1.6.3 Disipadores

Son los dispositivos encargados de disipar el calor generado en la cara caliente de la célula Peltier, en este trabajo se han empleado tres disipadores diferentes. Cada uno de ellos emplea una tecnología diferente a la hora de disipar el calor. El primero de ellos disipa el calor por convección forzada, el segundo mediante *heat-pipes* y convección forzada, y el tercero es un disipador pasivo que funciona por convección natural. Los tres disipadores seleccionados presentan una base tal, que pueden colocarse encima de

la célula Peltier de forma que esta asiente de forma plana, firme, y queda completamente cubierta.

### 1.6.3.1 Disipador Alpine Arctic 64 GT

Es un disipador de convección forzada creado por la empresa alemana Arctic Cooling. Está formado por un radiador de aletas de aluminio, y un ventilador de corriente continua que se alimenta a 12V y puede girar a entre 500 y 2000 rpm.

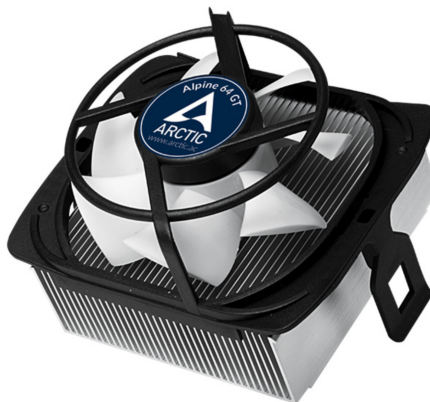


Figura 1.6.3-1: Disipador convección forzada Arctic 64 GT.

### 1.6.3.2 Disipador SCKTN-5000 Katana 5

Este disipador, diseñado por la firma japonesa Scythe Co. Ltd., está formado por un bloque, mitad de cobre cromado y mitad de aluminio, a través del cual pasan tres *heat-pipes* de cobre cromado, que perforan una matriz de aletas de aluminio sobre las cuales se sujeta un ventilador capaz de girar entre 300 y 2300 rpm y alimentado a 12V de corriente continua.



Figura 1.6.3-2: Disipador heat pipe Katana 5.

Como ya se ha comentado anteriormente, los disipadores que emplean tecnologías *heat-pipe*, necesitan de una potencia mínima para trabajar de forma eficiente. De esta

manera, el disipador Katana 5 no se ha seleccionado al azar, sino que se ha seleccionado debido a que presenta 3 *heat-pipes*, un número reducido en comparación a otros disipadores que pueden montar hasta 6 o incluso más, por lo que se asegurará que estos trabajen de forma efectiva como podrá comprobarse en el apartado de resultados, ya que cada uno tendrá que disipar mayor potencia que si hubiera mayor número de los mismos.

### 1.6.3.3 Disipador Alpine AM4 Passive

Diseñado por Arctic Cooling al igual que el primer disipador, es un disipador formado por un conjunto de aletas de aluminio, funciona por convección natural y es por tanto pasivo. Como puede verse en la Figura 1.6.3-3, la separación entre aletas de este disipador es notablemente superior a la de los otros disipadores. Esto es debido a que al no llevar ventilador, se necesita más espacio entre aletas para que pueda así circular el aire fácilmente.

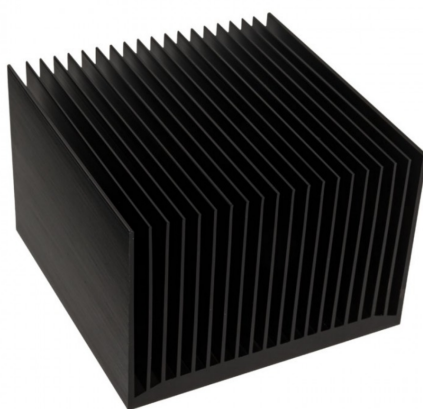


Figura 1.6.3-3: *Disipador Alpine AM4 Passive.*

### 1.6.4 Sondas de temperatura

Las sondas de temperatura que se han empleado en el banco de ensayos, son un conjunto de termopares que estarán ubicados en lugares precisos para poder así tomar lecturas específicas. El funcionamiento de los termopares se basa en el efecto Seebeck ya descrito anteriormente en la sección 1.5.3.2.

Para realizar todas las mediciones necesarias se han empleado un total de 6 termopares, 5 de ellos tipo T (Cobre-constantán) en un encapsulado de 2mm de diámetro, y uno de ellos tipo K (Cromel-Alumel).

El termopar número 1, situado en un orificio que se ha realizado en la base de cada disipador, mide la temperatura de la cara caliente de la célula Peltier. El termopar número 2, situado dentro del bloque de resistencias tal y como puede verse en la Figura 1.6.1-1. Este termopar, que se corresponde con el cable marrón que se muestra en dicha figura, mide la temperatura de la cara fría de la célula Peltier.

Los termopares número 3 y 4, colocados dentro de la matriz de madera, están situados a izquierda y a la derecha de la resistencia y la célula Peltier, y miden la temperatura de la base del banco.

Por último, el termopar número 5 mide la temperatura ambiente y está situado en un encapsulado de malla metálica para que la transferencia de calor por radiación afecte lo mínimo posible a la lectura.

Falta un último termopar, el único de tipo K que se ha empleado, debido a que es de menores dimensiones, y se coloca en la base del disipador *heat-pipe* ya que los termopares tipo T, requieren de un orificio de un diámetro tal, que no sería posible hacer en la base del *heat-pipe*, ya que se correría el riesgo de agujerear sus conductos.

### 1.6.5 Sistema de adquisición

Para obtener las lecturas de temperatura, se empleó la unidad de adquisición de datos Keysight Data logger 34972A, esta unidad dispone de una gran cantidad de entradas analógicas y una resolución de 22 bits. Además, permite monitorizar las lecturas de temperatura desde el ordenador en tiempo real, por lo que puede verse la evolución de temperaturas hasta que se llega al estado estacionario, una función muy útil y que ha permitido realizar cada ensayo de forma segura sin correr el riesgo de detener la medición antes de tiempo.



Figura 1.6.5-1: Keysight data logger 34972A.

### 1.6.6 Dispositivos de medición

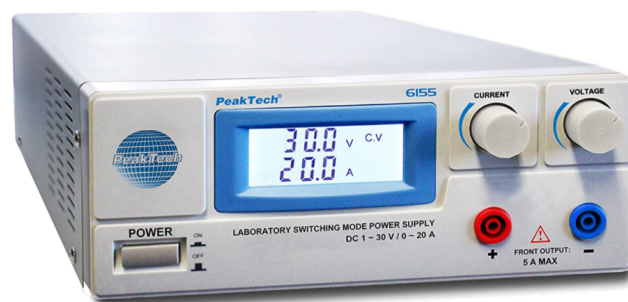
El dispositivo de medición que se ha empleado para realizar las medidas de los valores de tensión e intensidad, con los que eran alimentadas tanto las células Peltier como las resistencias, es el multímetro Peak-Tech P4350. Este dispositivo dispone de una pinza amperimétrica que es capaz de medir corriente continua, por lo que funciona gracias a un sensor de efecto Hall, en lugar de emplear dos bobinas que hacen de transformador como pasa con las de alterna. Tiene una resolución de 1mA, y también es capaz de medir tensión empleando dos cables que van conectados a los bornes negro y rojo que pueden verse en la Figura 1.6.6-1, ubicados en la parte inferior del dispositivo.



**Figura 1.6.6-1:** *Multímetro con pinza amperimétrica PeakTech P4350.*

### 1.6.7 Fuentes de alimentación

Para alimentar la célula Peltier y las resistencias, se han empleado dos fuentes de alimentación PeakTech 6155. Este modelo es capaz de suministrar hasta 30V y 20A, por lo que ha cumplido sobradamente con las necesidades de los experimentos que se han realizado. Además, es fácilmente ajustable, si bien se realiza el ajuste fino de la tensión midiendo con el voltímetro, en lugar de leer directamente el valor de la pantalla de la propia fuente ya que induciría a mucho error.



**Figura 1.6.7-1:** *Fuente de alimentación PeakTech 6155 .*

### 1.6.8 Material de aislamiento térmico

El material que se ha empleado para aislar el banco de ensayos, es una espuma elastomérica flexible basada en caucho sintético, y de color negro. Está fabricada por Armacell, y se trata del modelo AF/Armaflex, de 1 cm de espesor en formato plancha. Ha sido diseñada conforme a la norma EN 14304 para productos aislantes térmicos para equipos en edificación e instalaciones industriales.





**Figura 1.6.8-1:** *Aislante térmico AF Armaflex.*

### 1.6.9 Cola de contacto

Para pegar la espuma aislante al banco de ensayos se ha empleado cola de contacto Armaflex 520, ya que está específicamente diseñada para su uso en la instalación de los aislamientos flexibles Armaflex AF. Tiene un tiempo de secado completo de 36 horas y aguanta temperaturas de hasta 105°C.



**Figura 1.6.9-1:** *Cola de contacto Armaflex 520.*

### 1.6.10 Tablero de fibra de densidad media

El fibropanel de densidad media se obtiene triturando residuos de madera dura o blanda, obteniendo fibras de madera que posteriormente son aglutinadas mediante ceras y resinas. Este material es idóneo para la construcción del banco de ensayos debido a su bajo coste, y su capacidad de soportar temperaturas y presiones que superan con creces los requisitos necesarios para la construcción del banco.



**Figura 1.6.10-1:** Tablero de fibra de densidad media.

### 1.6.11 Pasta térmica

Para minimizar la resistencia de contacto al montar los disipadores, se ha empleado pasta térmica de la marca RS pro. Esta pasta térmica de silicona tiene una conductividad de 5W/mK, y no se endurece con el tiempo. Esta pasta se ha aplicado en todos los disipadores.



**Figura 1.6.11-1:** Pasta térmica RS Pro 5W/mK.

### 1.6.12 Lámina de grafito

La lámina de grafito se ha empleado únicamente en el disipador Katana 5, y presenta una conductividad 4 veces superior a la de la pasta térmica, si bien requiere un apriete mayor.



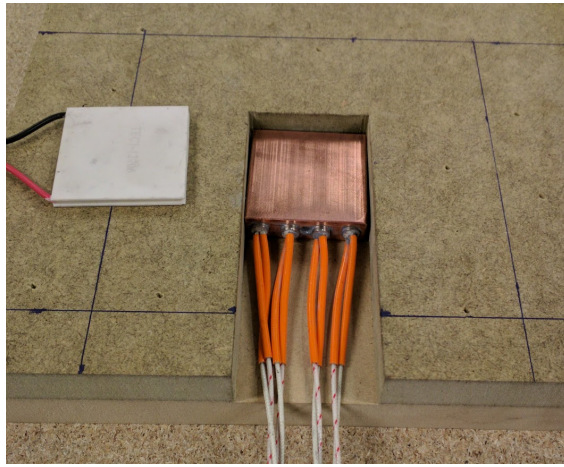
**Figura 1.6.12-1:** Lámina de grafito 20W/mK.

## 1.7. Construcción del banco de ensayos

La pieza fundamental de este proyecto, es el banco de ensayos. En este, se montará la célula Peltier objeto de estudio, y los disipadores correspondientes. Para caracterizar debidamente la célula termoeléctrica con la que se va a trabajar, debe de realizarse en primer lugar un soporte apropiado sobre el cual se puedan montar las diferentes células con las que se va a trabajar. Este soporte debe de aislar los componentes con los que se realiza el estudio, de manera que el intercambio térmico con el exterior sea mínimo, para que las lecturas de temperatura sean lo más exactas posible. Debe de alojar la fuente de calor, la célula Peltier que deberá refrigerar la fuente de calor, el disipador que evacúa el calor de la cara caliente del dispositivo termoeléctrico, y una serie de termopares situados en lugares concretos para poder obtener las mediciones correspondientes.

Se estudiaron diferentes configuraciones para construir el banco de ensayos, y se propusieron diferentes materiales hasta que finalmente se optó por emplear un tablero de MDF (Medium density fibreboard), también conocido como DM para realizar el soporte, debido a que es un material aislante, presenta una resistencia mecánica tal que soporta los esfuerzos generados por el apriete de los disipadores sobre el módulo termoeléctrico, es fácil de trabajar, y tiene unas propiedades térmicas homogéneas en todo su volumen.

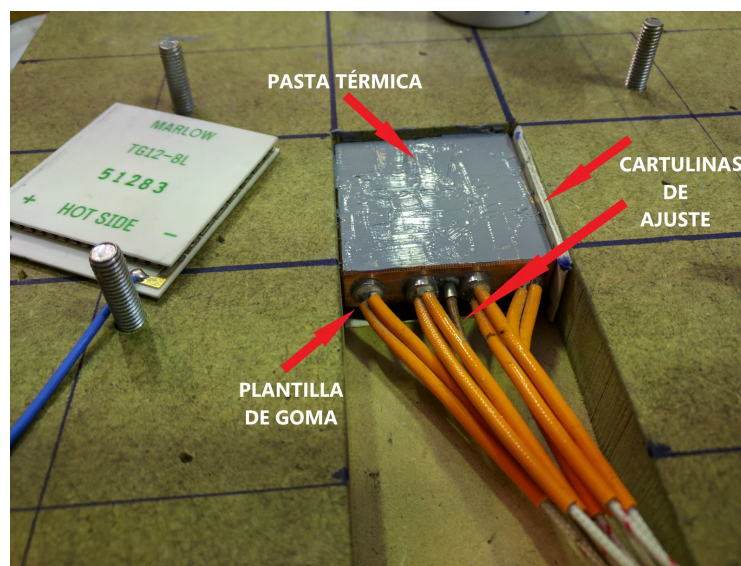
De esta manera, se emplearon dos tableros de DM de un espesor de 2 cm grapados, ya que uno no tenía el espesor suficiente para alojar los componentes, y se encargaron los cortes que fueron necesarios ya que en el taller no se disponía de herramientas preparadas para este fin. Así, los tableros se cortaron de forma cuadrada, con unas dimensiones de 220 x 220 mm . Se encargó también la realización de un surco en el que se deben situar la fuente de calor y la célula Peltier. La profundidad idónea de este surco es una profundidad tal que la superficie caliente del dispositivo termoeléctrico sobresalga ligeramente para que así se pueda situar el disipador de forma que se asegure un contacto óptimo, si bien, se realizó un rebaje coincidiendo con el espesor de un tablero, y posteriormente se emplearon plantillas de goma que también sirven ajustar la altura de los componentes (Ver Plano 1). Posteriormente, deben realizarse orificios en el soporte de DM en los cuales se van a situar los termopares. Estos orificios se sitúan a ambos lados del tablero, en la cara lateral y a media altura del tablero superior. En la Figura 1.7-1, se muestra una imagen del soporte ya preparado con el bloque de resistencias en la ranura.



**Figura 1.7-1:** Soporte de DM preparado y bloque de resistencias ubicado en el surco.

Una vez preparado el soporte, puede colocarse el bloque de cobre. Para conseguir un mejor asentamiento, se cortó una plantilla de goma con las mismas dimensiones que el bloque, y se colocó debajo del mismo. Esto facilita que no haya holgura y los esfuerzos que se generen al colocar el disipador se distribuyan mejor, ya que la plantilla se deforma ajustándose a las posibles irregularidades tanto del bloque como del soporte de madera. También se colocó una cartulina para conseguir un mejor centrado del bloque de cobre y la célula.

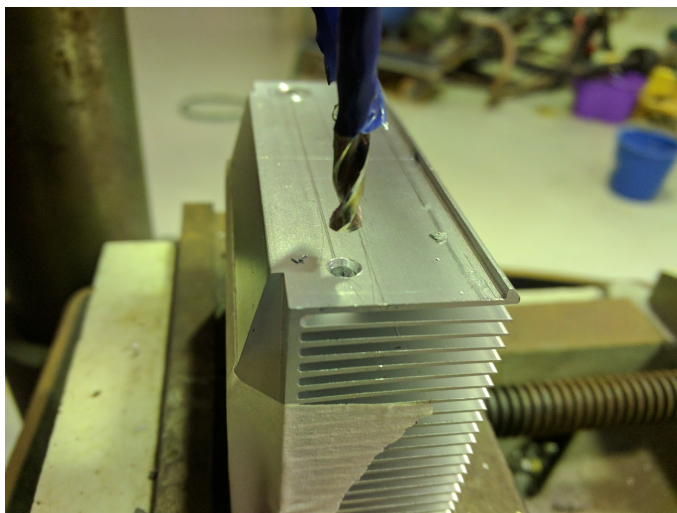
Antes de montar la célula sobre el bloque de resistencias, debe pulirse la superficie de este en contacto con la célula, y posteriormente se aplica una capa fina y homogénea de pasta térmica para reducir así la resistencia térmica de contacto. Se coloca el lado frío de la célula sobre la pasta térmica quedando el lado caliente hacia arriba. Ver figura 1.7-2.



**Figura 1.7-2:** Pasta térmica colocada sobre el bloque de resistencias y célula Peltier.

El siguiente paso, es realizar los agujeros en los cuales se deben situar los tornillos pasantes que sujetan el primer dissipador. Estos agujeros se han realizado con un taladro de columna en el lugar exacto en el que quedan los orificios de las escuadras remachadas al primer dissipador, colocándolo en la posición en la que será montado, y marcando los agujeros con un lápiz o rotulador. Este procedimiento se realiza de forma idéntica para los agujeros en los que se van a sujetar el resto de dissipadores. De esta manera, las escuadras permiten que se pueda atornillar el dissipador a los tornillos pasantes mediante una tuerca. Ver Figura 1.7-5. Más adelante se especifica la ubicación de estas escuadras.

Una vez preparado el soporte, debe prepararse el primer dissipador para su montaje. Para ello se deben realizar 2 orificios en las aletas exteriores del dissipador, uno a cada extremo para colocar los remaches que sujetan las 4 escuadras que van sujetadas con los cuatro tornillos pasantes. Como ya se ha avanzado anteriormente, los orificios en los que van ubicados los tornillos pasantes se han realizado con un taladro de columna al igual que los agujeros de las aletas para conseguir mayor precisión. Ver Figura 1.7-3.



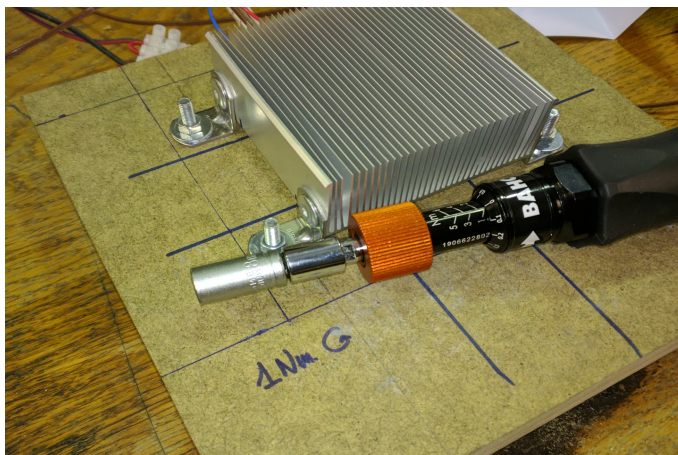
**Figura 1.7-3:** Orificios en los que se deben remachar las escuadras.

Finalmente, también con el taladro de columna, y empleando WD-40 como lubricante y refrigerante al mismo tiempo, para así facilitar la operación, se realiza otro orificio, con una broca de 2,5 mm de diámetro para que encaje el encapsulado del termopar de 2 mm de diámetro, en el que se va a situar un termopar que mide la temperatura del foco caliente. Ver Figura 1.7-4. Este orificio es crítico ya que de no estar correctamente ubicado puede distorsionar considerablemente las medidas de temperatura, por lo que debe centrarse con precisión en mitad del dissipador, y a una profundidad igual a la mitad del valor de la dimensión del dissipador en la dirección de taladrado de la Figura 1.7-4, para que esté alineado con el punto donde estará el centro de la célula Peltier. Se debe introducir previamente una generosa cantidad de pasta térmica en el orificio para que al colocar el termopar el contacto sea óptimo.



**Figura 1.7-4:** Orificio para situar el termopar que mide la temperatura del foco frío (Cara caliente).

Una vez el disipador está preparado, puede colocarse encima de la cara caliente de la célula Peltier. Debe atornillarse en cruz para conseguir que la distribución de esfuerzos sobre la célula sea homogénea. El par de apriete de los tornillos viene dado por el fabricante de la célula Peltier, y se caracteriza por un compromiso entre asegurar la integridad estructural de la célula, que es un elemento frágil por su estructura cerámica, y un buen contacto que asegure una transferencia de calor óptima. En este caso, el par de apriete requerido es de 1 Nm, y se consigue empleando una llave dinamométrica.



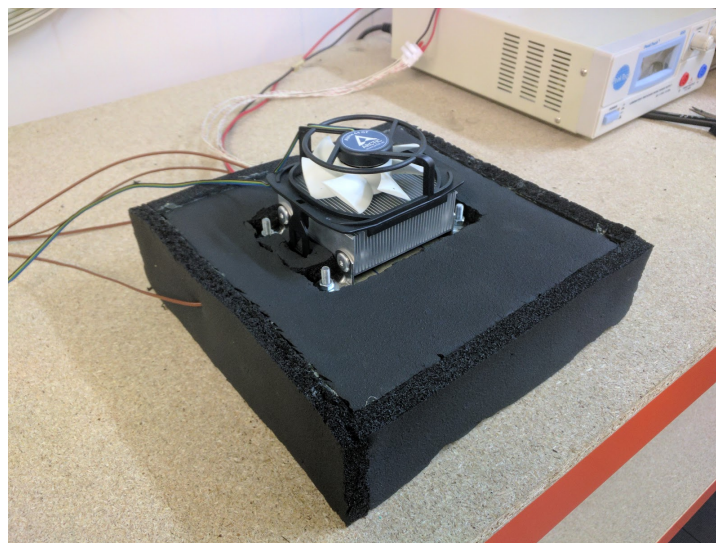
**Figura 1.7-5:** Disposición del conjunto ya montado y llave dinamométrica.

El siguiente paso es forrar el conjunto, de manera que no haya fugas térmicas hacia el exterior, para que así todo el calor sea disipado por la célula Peltier. Para esto, se ha cortado la espuma elastomérica aislante de forma que coincida con las bases superior e inferior del banco de ensayos, y se ha pegado a este con la cola de contacto. En esta operación, hay que tener especial cuidado con que las planchas aislantes estén cortadas de forma que queden bien alineadas con el tablero, ya que de lo contrario, el forraje lateral podría no asentar bien y originar fugas indeseadas.



**Figura 1.7-6:**Forraje del conjunto.

El siguiente paso, es colocar los revestimientos térmicos laterales. Para ello, igual que se ha hecho para colocar los revestimientos superior e inferior, se aplicará una capa de cola de contacto a lo largo de toda la superficie lateral del banco, así como a las 4 porciones de espuma aislante se van a pegar, una a cada lado, se esperará unos instantes para que el adhesivo se seque al tacto, y se colocarán cuidadosamente las porciones de espuma, tratando de alinearlas correctamente ya que de no hacerlo, será difícil separarlas para luego volver a colocarlas. Una vez se hayan situado correctamente, se debe presionar firmemente para conseguir un correcto pegado. En la Figura 1.7-7 se muestra el conjunto ya forrado. El cable marrón izquierdo es uno de los termopares que miden la temperatura de la madera.



**Figura 1.7-7:**Conjunto forrado con el material aislante.

Llegados a este punto, el primer disipador ya está correctamente montado en el banco de ensayos, que ya está listo para realizar las primeras pruebas. Solo falta montar la sonda que mide la temperatura ambiente, que se ha montado como ya se ha comentado anteriormente, en un soporte de maya metálica, para que la lectura de la temperatura del aire ambiente, no quede falseada por las transferencias térmicas debidas a la radiación que emite la luz del laboratorio. En la Figura 1.7-8 se muestra el mencionado soporte con la sonda montada.



**Figura 1.7-8:** Montaje de la sonda que mide temperatura ambiente.

El último paso es conectar los termopares a las entradas analógicas del adquisidor de datos. Para esto, se emplean las entradas 1 a 5 del primer módulo extraíble del adquisidor, y se deben conectar los conductores positivos de los termopares a las conexiones del adquisidor con la inscripción “H”, del inglés “high”, y los conductores negativos a las conexiones con la inscripción “L”, del inglés “Low”.

Tras esto, se conecta el adquisidor por USB al ordenador, y desde el programa “Benchlink data logger” se configuran las entradas en las que se han conectado los termopares, para que puedan leerse los datos, especificando de qué tipo de termopar se trata y el número de la entrada.

Para montar el siguiente disipador, que en este caso es el Katana 5, se ha seguido un procedimiento similar al del primer disipador. Primeramente, se debe realizar un orificio en la base de cobre con una broca de 1,5 mm de diámetro. En este orificio se introduce pasta térmica para asegurar un buen contacto entre el termopar y el disipador. El termopar, que en este caso es tipo K sin encapsulado ya que ocupa menos espacio, se ha soldado por arco eléctrico empleando equipamiento específico, y debe introducirse en el orificio de forma cuidadosa, y sujetarse para que no salga de este debido a movimientos accidentales ya que al no llevar encapsulado cilíndrico, el ajuste no es tan bueno.

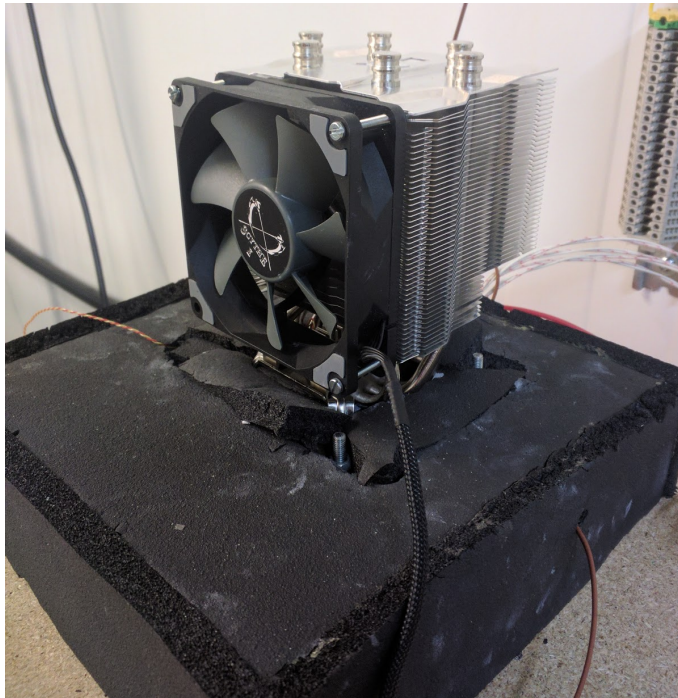




**Figura 1.7-9:** Orificio que mide la temperatura de la cara caliente de la célula Peltier para el disipador heat-pipe Katana 5.

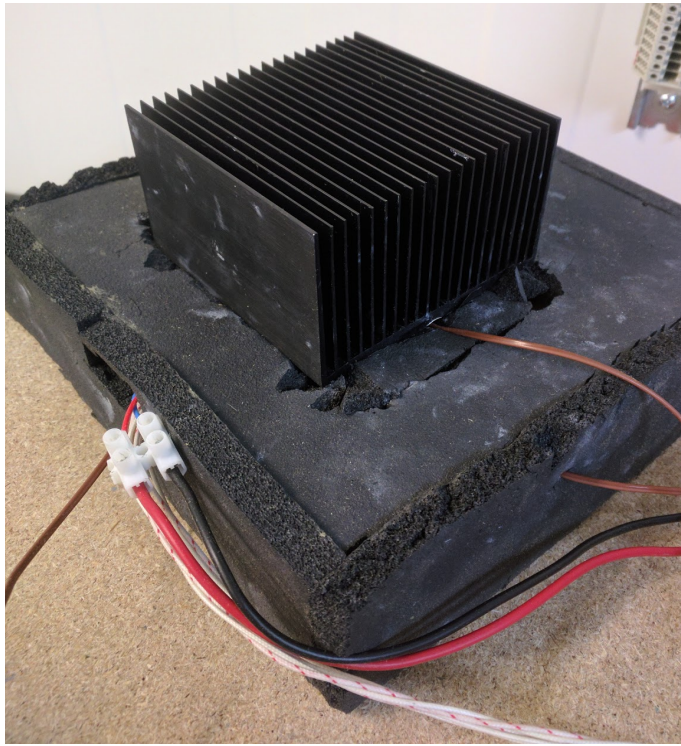
Para sujetar el disipador al banco de ensayos, se han empleado los propios asientos que este dispone, de forma que no ha sido necesario emplear escuadras ni ningún elemento accesorio, al contrario que con el primer disipador. Por tanto, se ha situado el disipador encima de la célula Peltier en la posición exacta en la que debe ir montado, se han marcado las posiciones de los orificios que vienen marcadas por los asientos del disipador, y se han realizado los 4 agujeros, esta vez con un taladro manual, y teniendo sumo cuidado de que este esté perpendicular a la madera del banco.

Una vez el disipador dispone de apoyos, hay que preparar la superficie de contacto, ya que quedan restos de pasta térmica debido a la colocación del primer disipador. Para la limpieza se emplea acetona, ya que su poder disolvente la hace idónea para retirar la pasta térmica, a su vez, sin dañar la célula Peltier ni el disipador. De esta manera, se impregna un trozo de papel de uso industrial con acetona y se frota generosamente hasta que no quede pasta térmica. Una vez ambas superficies están limpias, puede aplicarse la pasta térmica y sujetar el disipador para realizar los ensayos. Otra vez, el par de apriete de los tornillos debe ser de 1 Nm. Como este disipador también se va a ensayar con lámina de grafito, debe limpiarse otra vez y colocar la lámina de grafito, ya cortada con la forma de la base de la célula Peltier, que coincide con la base del disipador, y apretar de nuevo.



**Figura 1.7-10:** *Disipador heat-pipe Katana 5 ya montado.*

El último disipador que se ha montado es el disipador pasivo Alpine AM4, este disipador dispone de unos agujeros roscados pasantes en las esquinas de la parte inferior, por lo que para sujetarlo se ha optado por emplear estos orificios para no tener que realizar ninguna operación adicional. De esta manera, se ha situado el disipador en su posición correcta sobre la célula Peltier, se han marcado los agujeros, y se han realizado los 4 agujeros correspondientes con una broca de un diámetro ligeramente superior al de los tornillos. Como estos no tenían la longitud suficiente para atravesar todo el tablero, se ha realizado un refrentado interior al agujero de un tamaño tal que se pudiera colocar la llave dinamométrica, para poder conseguir el apriete necesario. Para la colocación del termopar que debe medir la cara caliente, se ha realizado un orificio en la base del disipador de forma similar al primer disipador, empleando el taladro de columna y una broca de 2,5 mm de diámetro, para introducir junto a la pasta térmica un termopar tipo T con encapsulado.

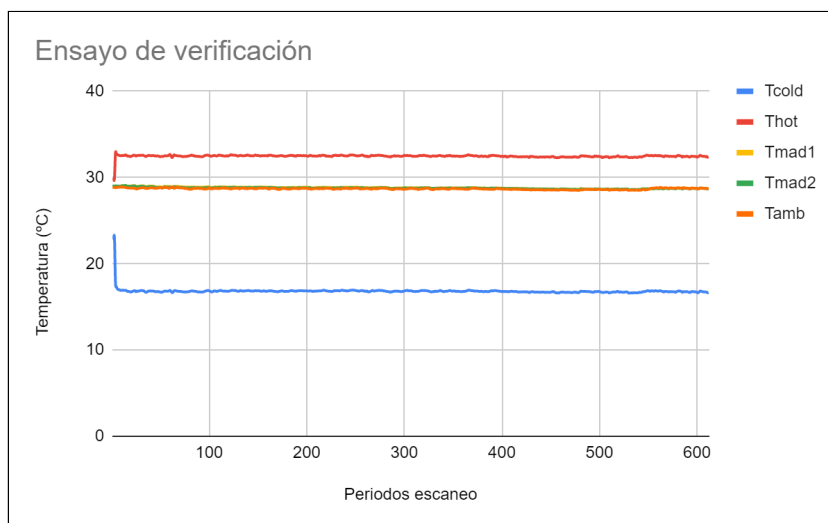


**Figura 1.7-11:** *Disipador Alpine AM4 Passive ya montado.*

## 1.8. Metodología seguida en los ensayos

Para realizar los ensayos, es primordial mantener una temperatura ambiente constante durante todo el proceso, ya que esta tiene una gran influencia sobre el sistema. A menor temperatura ambiente, mayor potencia es capaz de disipar la célula Peltier manteniendo una misma temperatura de cara fría. Por este motivo, los ensayos se han realizado dentro de una cámara climática que es capaz de mantener unas condiciones de temperatura y humedad constantes. En caso contrario, no se podría comparar los resultados obtenidos con los diferentes disipadores. En este estudio, la temperatura ambiente ha estado en todo momento en torno a 29°C.

Una vez el banco de ensayos está listo, la temperatura de la cámara climática se ha estabilizado, y se ha configurado el software para que se puedan tomar las primeras medidas, puede procederse con los ensayos. En primer lugar debe comprobarse que el sistema de adquisición proporciona lecturas coherentes y fiables. Para esto, se ha comprobado que los valores que mide la sonda de temperatura ambiente coinciden con los que marca el controlador de la cámara climática. Tras esto, se ha alimentado la célula Peltier con tensiones de entre 1 y 3V, viendo que el sistema tarda entre 30 y 45 minutos para llegar al régimen estacionario, si bien, la respuesta es inmediata ya que tal y como se incrementa o decrementa la tensión, la temperatura empieza a variar. Otra comprobación que debe de hacerse, es la de verificar que el sistema no tiene fugas térmicas a través del banco. Para comprobar esto, se ha realizado un ensayo en el que se ha tenido el sistema en marcha 24 horas, y tras esto se ha comprobado la evolución de la temperatura del interior del banco de ensayos. Si el grado de aislamiento térmico que ofrece el soporte del banco es el correcto, la temperatura del banco de ensayos debe de mantenerse constante durante todo el proceso, lo cual implica que no hay transferencia térmica entre el conjunto formado por el bloque de resistencias, la célula Peltier y el disipador, es decir, los elementos térmicos, y el propio banco. En este ensayo tan largo se ha empleado un periodo de escaneo de 2 minutos, por lo que cada vez que pasa este tiempo, el adquisidor realiza las lecturas de temperatura. En el resto de ensayos, este periodo es de 10 segundos. En la Figura 1.8-1 se muestra el resultado del primer ensayo.



**Figura 1.8-1:** Ensayo que verifica que no hay transferencias térmicas hacia el banco de ensayos.

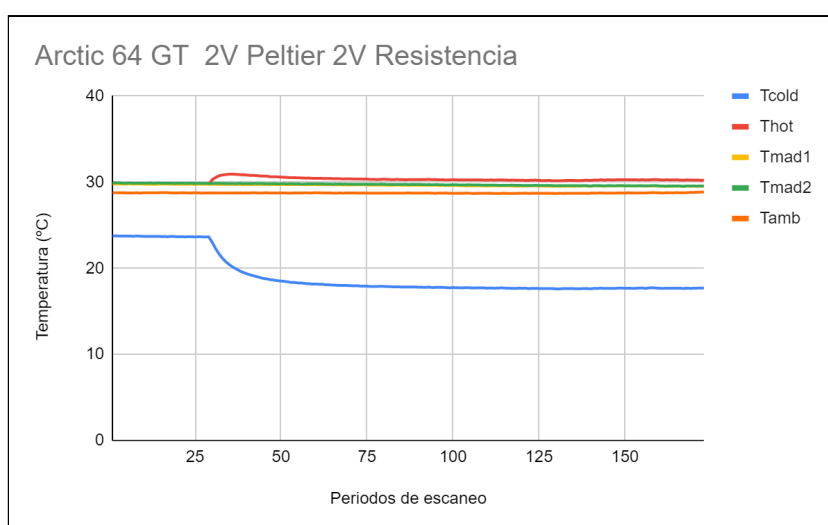
Donde  $T_{cold}$  se corresponde con la temperatura de la cara fría de la célula Peltier,  $T_{hot}$  se corresponde con la temperatura de la cara caliente,  $T_{mad1}$  y  $T_{mad2}$  las temperaturas del cuerpo del banco de ensayos, y  $T_{amb}$  la temperatura ambiente, que como ya se ha comentado anteriormente, se ha mantenido estable en todos los experimentos. Por tanto, tal y como se observa en la Figura 1.8-1, la temperatura interna del banco de ensayos se mantiene constante durante todo el proceso, por lo que se puede pasar a caracterizar el sistema.

Para caracterizar los diferentes sistemas de disipación, la idea es comparar el consumo de la célula y la potencia disipada para una misma temperatura de cara fría. La comparación debe realizarse de esta manera ya que en la práctica, se busca que el foco caliente (cara fría), se mantenga a una temperatura determinada, y bajo estas condiciones, ver qué sistema es capaz de disipar una mayor potencia con el menor consumo.

Teniendo en cuenta estas condiciones, un enfoque que se planteó fue el de mantener con un controlador PID la temperatura de la cara fría a un determinado valor, y ir variando las condiciones de alimentación y potencia disipada, para obtener una gran cantidad de puntos de funcionamiento con una misma temperatura de cara fría. Lo cierto es que este planteamiento es muy interesante, el problema es que el controlador PID trabaja a una frecuencia de 1 KHz, por tanto, con los instrumentos de medida que se dispone no es posible medir el valor eficaz de la tensión que aplica este PID a la célula Peltier, por lo que se hace imposible medir con precisión el consumo de la célula. Por este motivo, se han explorado otros enfoques, hasta que se ha decidido que la forma más conveniente de realizar los ensayos es fijar la tensión de alimentación de la célula Peltier, y para cada tensión de alimentación, realizar un conjunto de ensayos con diferentes potencias de alimentación de las resistencias, en sentido ascendente de potencia, por tanto, se empezará con potencias bajas para que pueda llegarse a temperaturas de entorno a  $10^{\circ}\text{C}$  en la cara fría, y se irá incrementando la carga térmica (Que viene dada por la potencia de alimentación de las resistencias) hasta que se llegue

a valores próximos a los 35°C (que es una temperatura ya elevada para el foco frío en una instalación de refrigeración por compresión de vapor) , o hasta que sature la célula Peltier, es decir, que la temperatura de la cara fría sea superior a la temperatura de la cara caliente. Antes de cada ensayo, se debe ajustar con precisión la tensión de alimentación de la célula Peltier y el bloque de resistencias, y una vez se hayan estabilizado las temperaturas, en estado estacionario, se debe vigilar que no haya variado la tensión, y se debe medir la corriente que consumen la célula Peltier y las resistencias, si bien la medida de corriente que estas segundas consumen, puede calcularse de forma trivial aplicando la ley de ohm a modo de comprobación. La medida de la célula Peltier por otra parte, si es una medida importante en el transcurso de este experimento, ya que determina el consumo de la célula, y además incrementa para una misma tensión al aumentar la carga térmica, por tanto tal y como se ha comentado anteriormente, debe de medirse al acabar cada experimento antes de variar la alimentación de cualquiera de los dos elementos que intervienen. Por último, también hay que medir y tener en cuenta en el cómputo el consumo de los ventiladores que emplean los disipadores. En cualquier caso, este consumo es constante y se sitúa en casi 2 vatios. La alimentación de los ventiladores ya se ha ajustado buscando un compromiso entre poder de ventilación (rpm a las que gira), y consumo, por lo que se ha alimentado a 10.47V, en lugar de a 12V, o incluso a 15V.

En la Figura 1.8-2, se muestra un ejemplo de un ensayo realizado al disipador Arctic 64 GT, alimentando tanto la resistencia como la célula a 2V. Como puede verse, partiendo de una temperatura determinada, se cambian las condiciones de alimentación a las del ensayo, y se espera a que se estabilicen las temperaturas. Una vez estabilizadas, se deja el sistema estable unos minutos para obtener valores de temperatura en estado estacionario, y para obtener las temperaturas finales, se calcula el promedio de los valores que se han leído en estado estacionario.

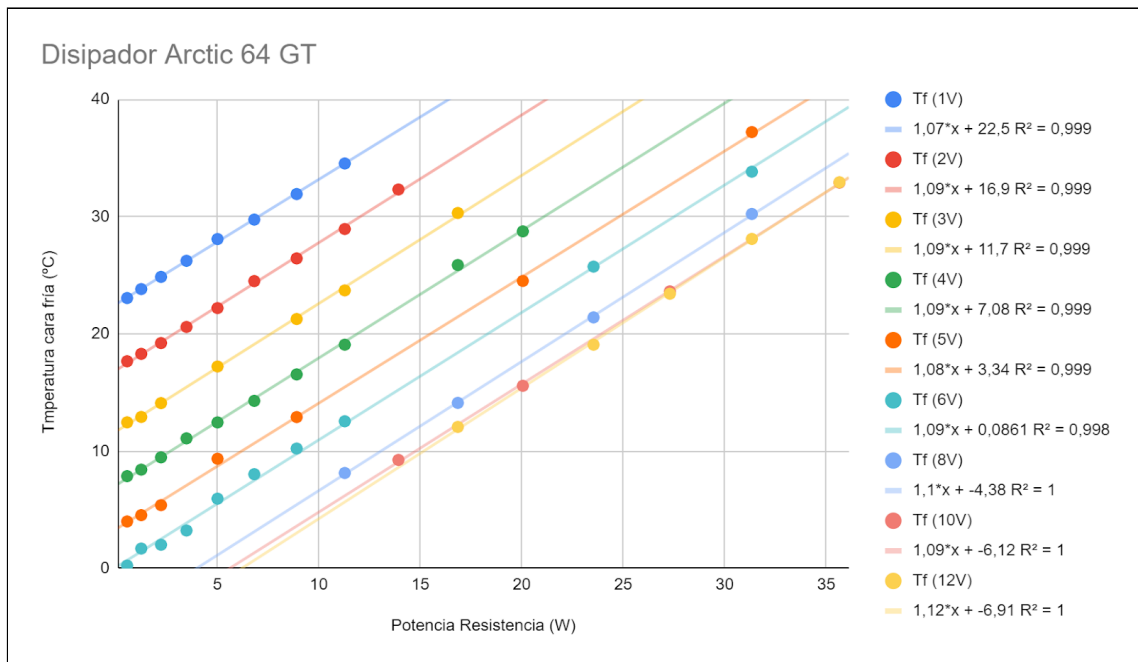


**Figura 1.8-2:** Ejemplo de ensayo con el disipador Arctic 64 GT.

## 1.9. Datos obtenidos

En este apartado, se muestran los datos que se han obtenido de los ensayos, a partir de los cuales se realizan las comparaciones y los estudios posteriores. Estos datos, son dispersiones de puntos en las que cada punto se corresponde con un ensayo siguiendo la metodología descrita anteriormente. Los ensayos se muestran con un mismo color para cada tensión de alimentación de la célula, y se han ajustado a rectas que tienen una bondad de ajuste que en la mayoría de los casos está en torno a 1, si bien el peor ajuste de  $R=0,823$  (Figura 1.9.2-3).

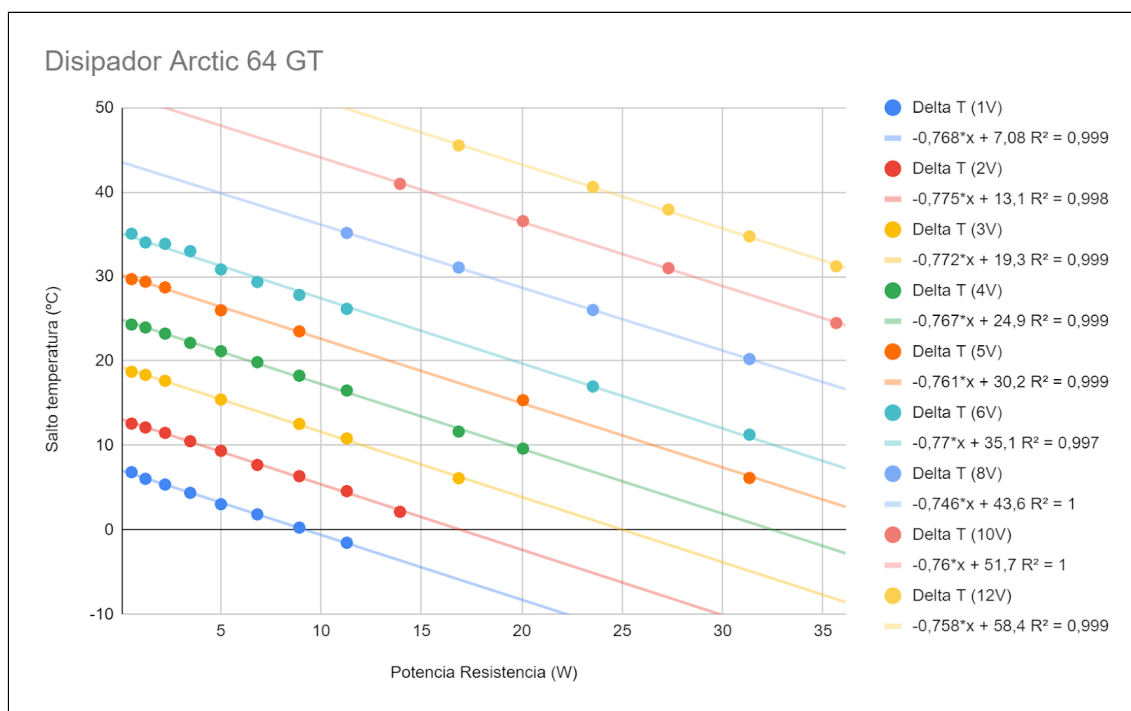
### 1.9.1 Célula Peltier con disipador de convección forzada sobre pasta térmica



**Figura 1.9.1-1:** Evolución de la temperatura de la cara fría con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.

En la figura superior, pueden verse los datos de temperatura obtenidos del conjunto de ensayos realizado al disipador de convección forzada. De esta, puede observarse que la distancia entre rectas paralelas de tensiones diferentes, va disminuyendo de forma progresiva a medida que se aumenta la tensión. Esto es debido a que la célula Peltier no es capaz de enfriar infinitamente, sino que hay un punto en el que por más que se alimente a la Peltier, esta no consigue disminuir la temperatura. Como se ha comentado en el apartado de fundamentos teóricos, en estas células ocurren fundamentalmente dos fenómenos que actúan en dirección contraria, el efecto Joule y el efecto Peltier, lo cual explica que a mayores consumos, mayores pérdidas por efecto Joule, ya que son proporcionales al cuadrado de la intensidad, mientras que el calor (o el frío) generado

por efecto Peltier es proporcional a la intensidad simplemente. Este punto en el que mayor tensión de alimentación, no implica mayor enfriamiento, se sitúa entorno a 10V, y con 12V, la célula ya no es capaz de enfriar más, pese a que si se consume casi 1A más (Ver Figura 1.9.1-3).

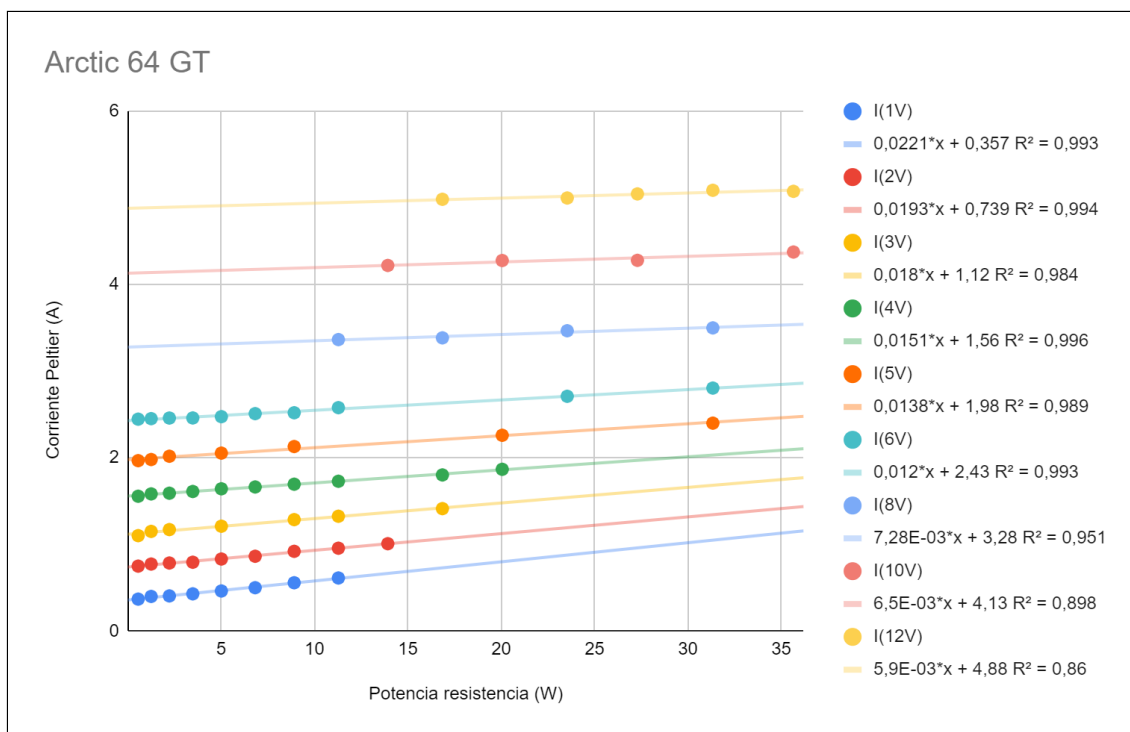


**Figura 1.9.1-2:** Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.

En la Figura 1.9.1-2, se observa el salto de temperatura entre ambas caras de la célula. Como puede apreciarse, el salto de temperatura disminuye con la carga térmica a la que esta es sometida, esto es debido a que a mayor potencia térmica, más aumenta la temperatura del foco frío respecto del caliente, hasta que llega un punto en el que la célula Peltier ya no es capaz de disipar más, por lo que la temperatura de la cara fría sigue subiendo y alcanza valores incluso superiores a los de la cara caliente. En cualquier caso, los procesos termoeléctricos que tienen lugar dentro de la célula, siguen presentes pese a no ser suficientes para disipar el calor.

En el caso de tensión de alimentación igual a 12V, se observa como el salto de temperatura es mayor al salto de temperatura a 10V de alimentación, si bien la temperatura de la cara fría era la misma. Esto implica que la temperatura de la cara caliente a 12V es mayor a la que se consigue a 10V, y se debe a que a 12V, la célula Peltier, consume más corriente, que se convierte en calor por efecto Joule, y se transfiere al ambiente por dicha cara. En este caso, la temperatura ha incrementado casi 10°C debido al mencionado efecto.

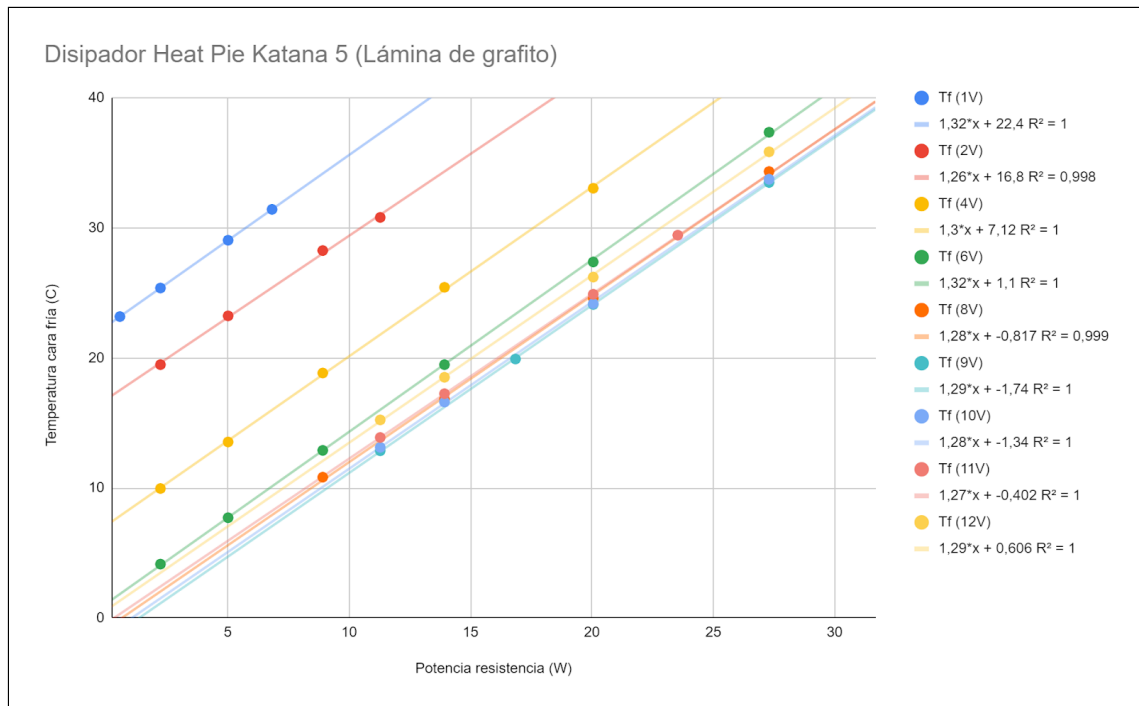




**Figura 1.9.1-3:** Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador de convección forzada.

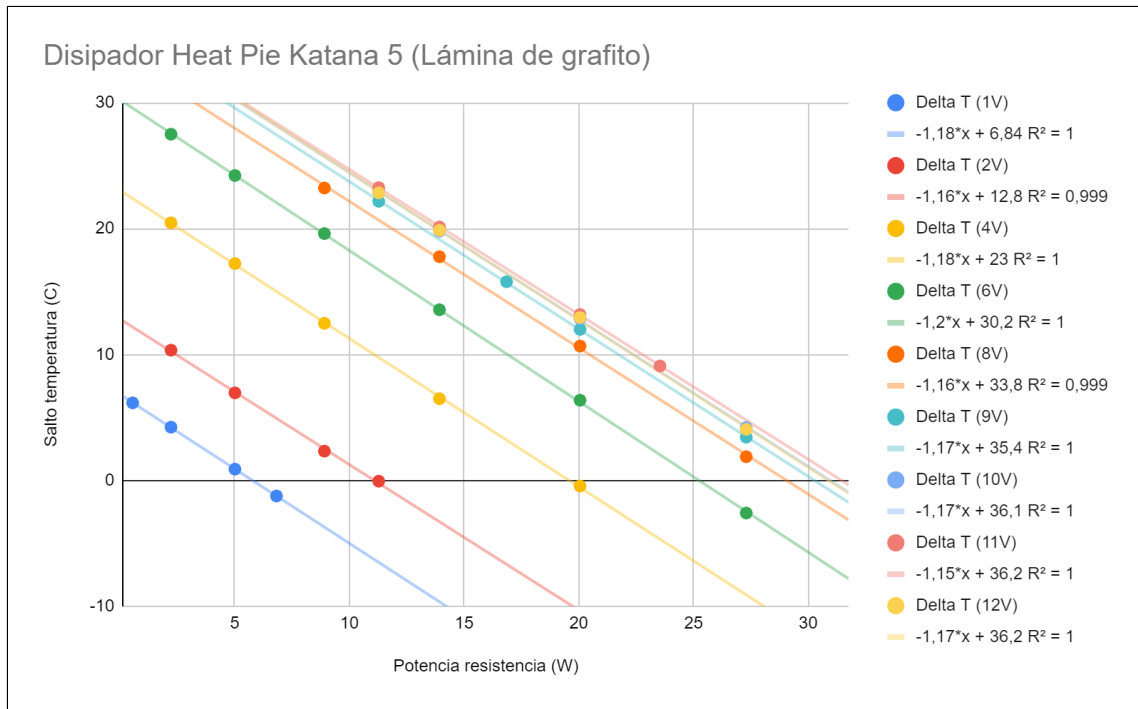
Se ha comentado en numerosas ocasiones, que el consumo de corriente de la célula Peltier, no es constante para una tensión de alimentación determinada, sino que aumenta o disminuye según la potencia térmica aplicada. La Figura 1.9.1-3, demuestra a partir de los ensayos realizados que este hecho, no solo ocurre, sino que debe tenerse en cuenta para los cálculos, ya que los aumentos de consumo pueden dispararse hasta un 50%.

## 1.9.2 Célula Peltier con disipador heat pipe sobre lámina de grafito



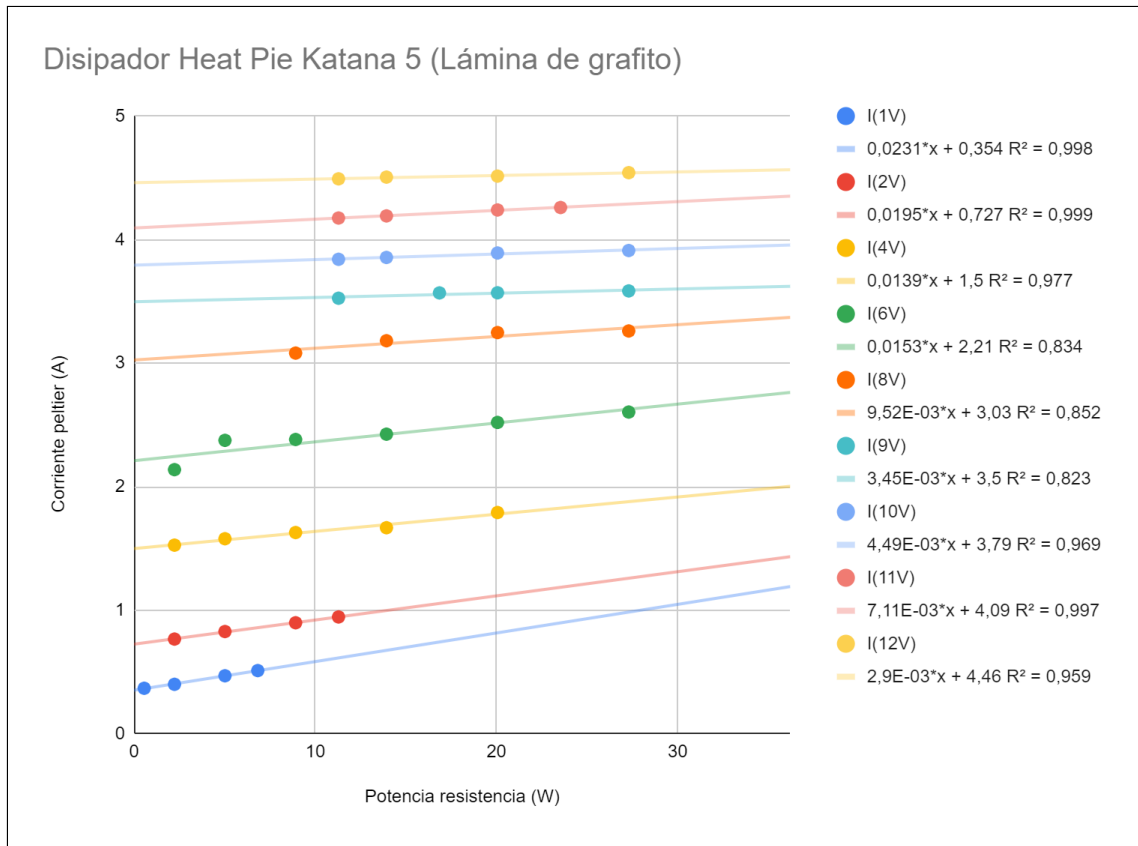
**Figura 1.9.2-1:** Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Lámina grafito).

Este segundo sistema de disipación, está compuesto por el disipador Katana 5, montado en una fina lámina de grafito sobre la célula Peltier. Los resultados obtenidos siguen la línea del primer disipador, si bien, en este caso, la tensión de alimentación a la que la célula no es capaz de enfriar más, está entre 8 y 9V. Este fenómeno se muestra tan patente en este conjunto de ensayos, que puede verse que se consigue una temperatura muy similar con 6 y 12V para una misma carga térmica, pese estar la célula consumiendo 4 veces más en este segundo caso, ya que tanto la tensión como la corriente consumidas son el doble. También queda claro por tanto que el grado de enfriamiento que se consigue no es proporcional a la tensión, sino que la relación es más compleja.



**Figura 1.9.2-2:** Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (lámina de grafito).

Siguiendo el patrón del primer disipador, esa configuración obtiene mayores temperaturas de cara caliente a la máxima potencia ensayada, 12V de Peltier, que a 6V, tensiones que mantienen similares temperaturas de cara fría. A la vista de estos primeros resultados, ya puede afirmarse que el disipador de convección forzada montado sobre pasta térmica, es más efectivo que el disipador Katana 5 montado sobre lámina de grafito, ya que admite mayores potencias de Peltier sin perder capacidad de enfriamiento.



**Figura 1.9.2-3:** Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (lámina de grafito).

A la vista de los resultados de la Figura 1.9.2-3, podría pensarse que al montar este segundo sistema de disipación, se consiguen consumos menores de corriente en la célula Peltier que en el primer caso, ya que el consumo de la célula a 12V en este segundo caso está entorno a 4.5A, mientras que en el primer caso, ronda los 5A para esta misma tensión, si bien, este sería un análisis sesgado, ya que para hacer esta comparación, se debería comparar el consumo de la célula para un mismo grado de enfriamiento, esto es, misma carga térmica y temperatura de cara fría. Teniendo en cuenta esto, en el apartado resultados, puede verse que el primer disipador es claramente superior.

### 1.9.3 Célula Peltier con disipador heat pipe sobre pasta térmica

En la Figura 1.9.3-1, se muestran los resultados obtenidos con la última configuración de disipación, el disipador *heat-pipe* Katana 5, montado con pasta térmica. De estos primeros datos, ya puede deducirse que será la configuración con mayor capacidad de disipación del calor. Alimentando la célula Peltier a 12V, se obtienen temperaturas más bajas que alimentando la célula Peltier a 10V, algo que no ocurre con el primer disipador, y mucho menos con el segundo, y que significa que el sistema es capaz de disipar el calor generado en la cara caliente de forma efectiva, por lo que la cara fría no se ve

afectada por el calor generado en la cara caliente, y se podría seguir incrementando la tensión de alimentación de la célula.

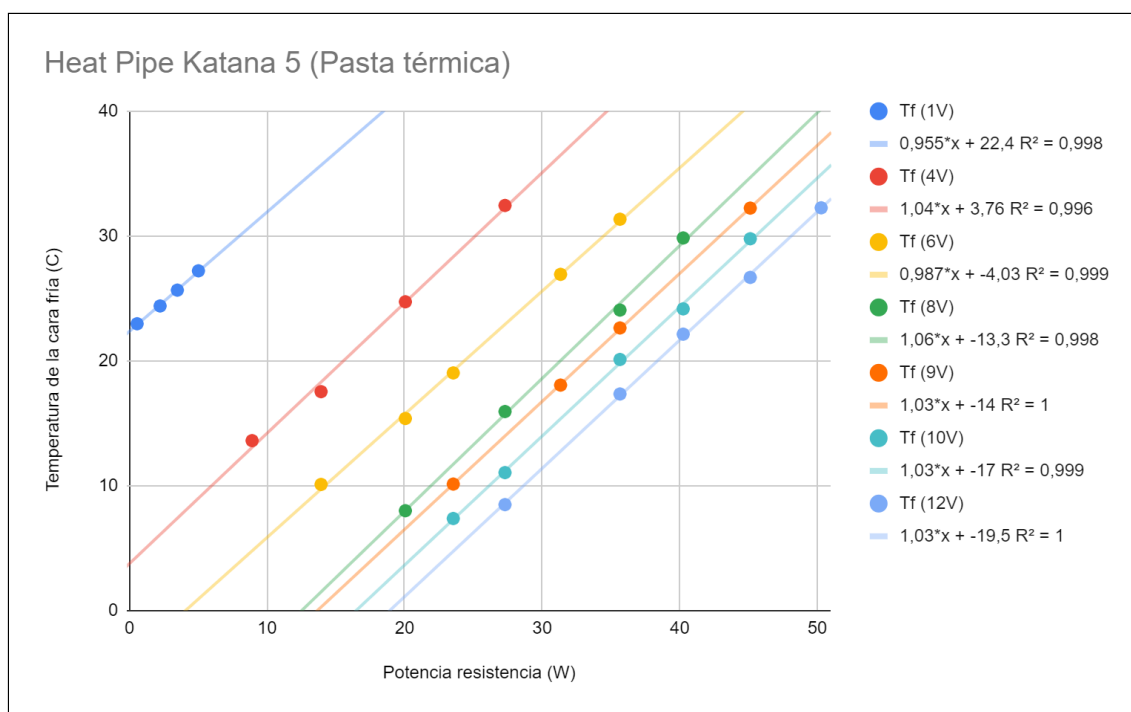


Figura 1.9.3-1: Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).

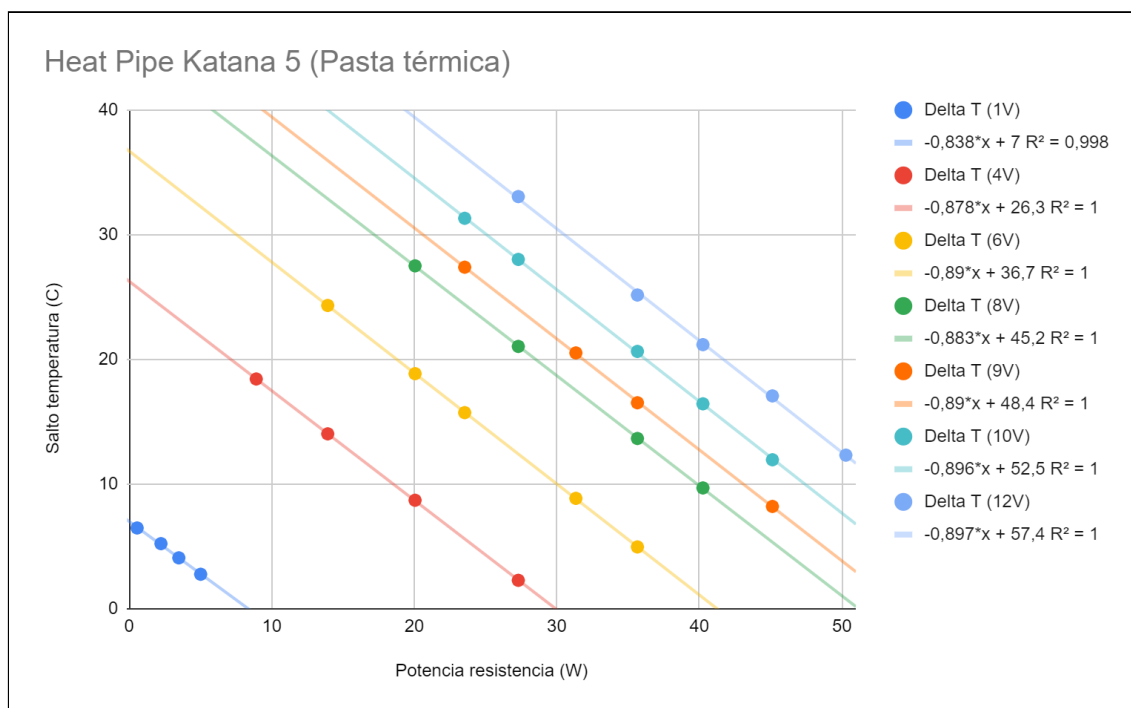
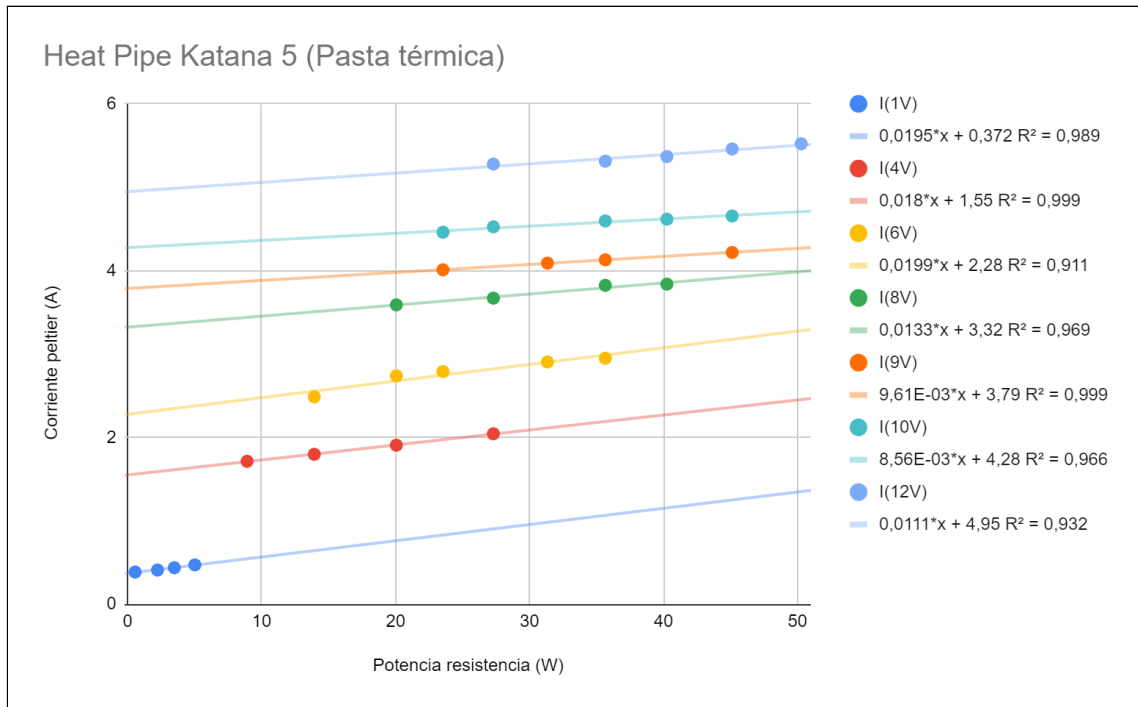


Figura 1.9.3-2: Evolución del salto de temperatura entre las caras fría y caliente, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).

En el caso de este disipador, si se observa la representación del salto de temperatura (Figura 1.9.3-2), puede verse que la célula no satura en ningún caso, mientras que con la configuración anterior, a 6V, una vez se pasan los 25W de carga térmica la célula ya satura. Este es otro indicador claro de que esta última configuración, es probablemente superior al resto, si bien, estas comparaciones, sólo son válidas para las condiciones del punto concreto que se ha comparado.



**Figura 1.9.3-3:** Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador katana 5 (Pasta térmica).

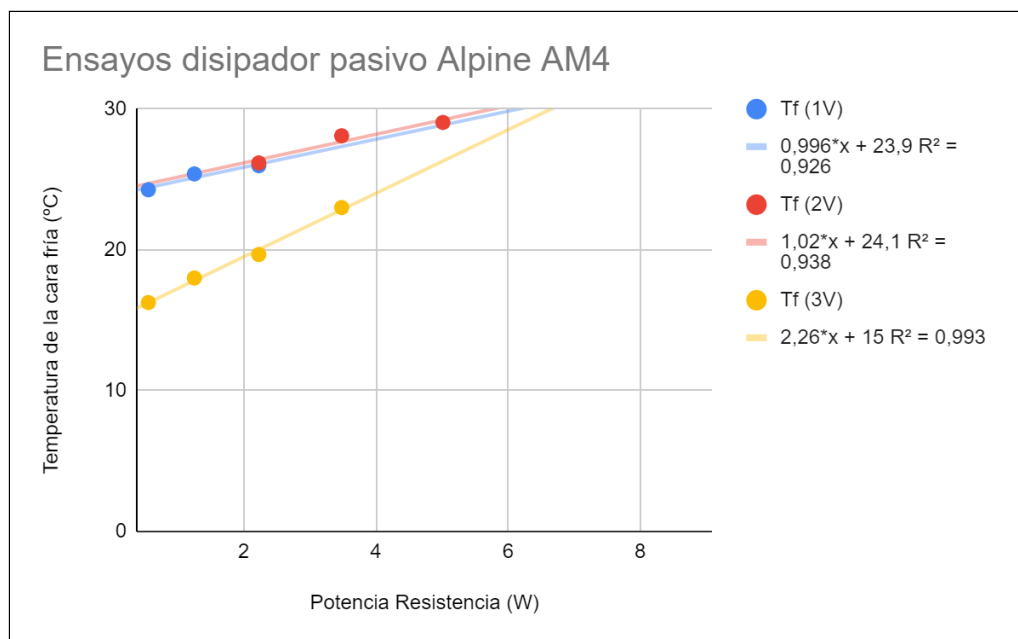
Finalmente, en la Figura 1.9.3-3, puede observarse que los consumos de la célula con este sistema, están en el mismo orden de magnitud que con el resto de disipadores, por lo que esta configuración, a primera vista ya parece superior al resto.

### 1.9.4 Célula Peltier con disipador pasivo sobre pasta térmica

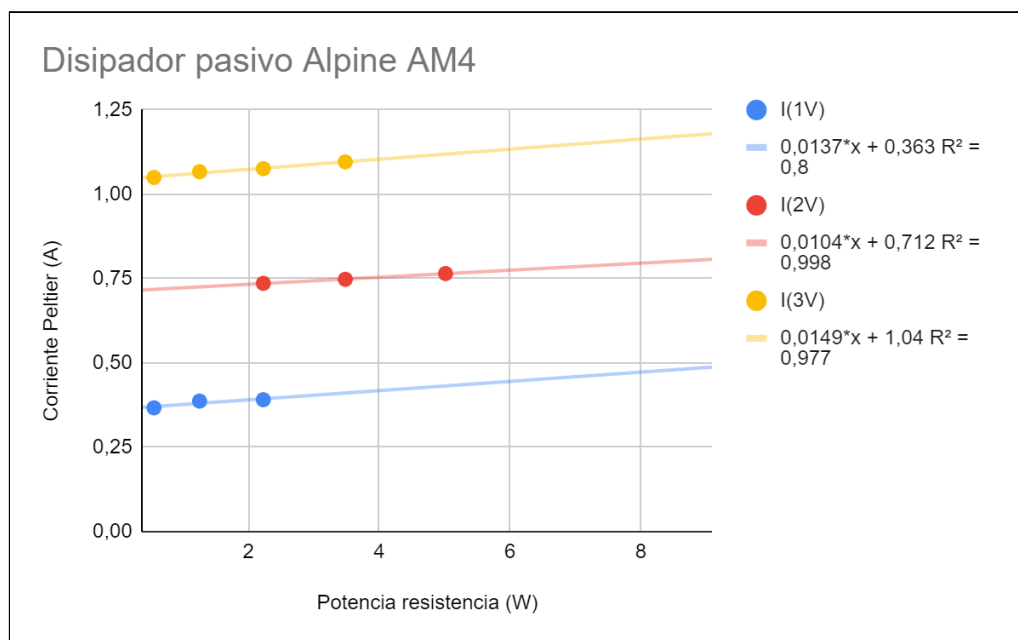
Ya en los primeros ensayos, este disipador ha presentado un comportamiento inferior al resto. Ya con cargas térmicas bajas, se ha empezado a calentar, y no ha sido capaz de disipar el calor de forma suficiente, consumiendo una potencia de Peltier que es considerablemente mayor a la de los otros dos disipadores. Se ha observado que a partir de 6W de potencia, el disipador empieza a calentarse cada vez más, y la temperatura no se estabiliza sino que sigue subiendo alcanzando valores cada vez más altos y por tanto más críticos.

En las figuras 1.9.4-1 y 1.9.4-2, puede verse que este disipador es claramente inferior al resto para las condiciones de trabajo de este ensayo, ya que por ejemplo, si se observa

la potencia que disipa el disipador de convección forzada con una temperatura fría de 20°C a 3V de Peltier, ronda los 7 u 8 vatios, mientras que en este disipador pasivo se están disipando poco más de 2W.



**Figura 1.9.4-1:** Evolución de la temperatura de la cara fría, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador pasivo.

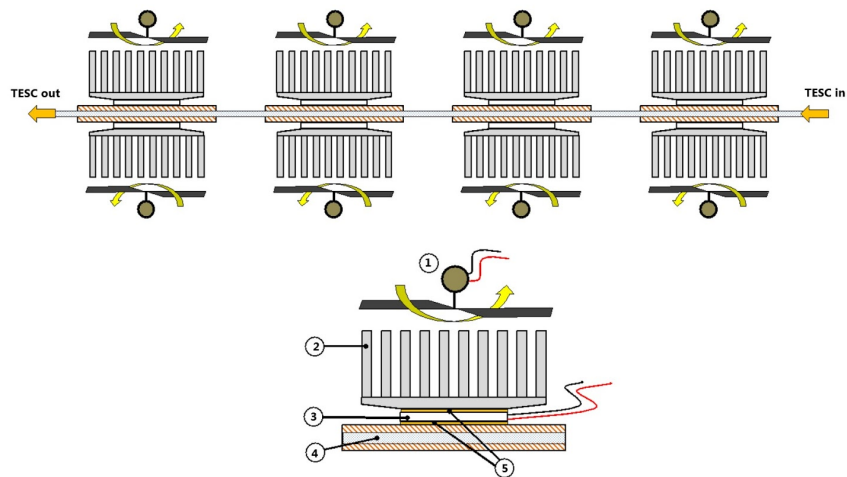


**Figura 1.9.4-2:** Consumo de corriente de la célula, con respecto a la potencia térmica disipada para el disipador pasivo.

Vistos estos datos, se ha excluido el disipador Alpine AM4 pasivo en el estudio, ya que no es viable su uso conjuntamente con la célula Peltier bajo las cargas térmicas que se han aplicado.

## 1.10. Estudio teórico de viabilidad del TESC

Como ya se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos principales de este trabajo, es estudiar la viabilidad de emplear las células Peltier como dispositivos de subenfriamiento en circuitos de compresión de vapor. Para esto, se ha supuesto que las células, están montadas dos a dos sobre un conducto cuadrado de cobre a la salida del condensador del equipo de refrigeración. En la Figura 1.10-1, se muestra un esquema del montaje del TESC, en la parte superior pueden verse 4 unidades de subenfriamiento, y en la inferior los elementos de cada unidad. El elemento número 1 es el ventilador del disipador, el elemento número 2 es el disipador en cuestión, el elemento 3 es la célula termoeléctrica, el elemento 4 es el bloque de cobre, al cual se le ha realizado un orificio de sección cuadrada y dimensiones 32x6mm, por el cual circula el fluido, y la pasta térmica que hace de contacto térmico entre el bloque de cobre y la célula Peltier, y entre esta y la base del disipador, está señalada con el número 5.



**Figura 1.10-1:** Sistema de subenfriamiento termoeléctrico (TESC) [Tomado y adaptado de Sánchez et. al, 2020].

De esta manera, visto en qué consiste el TESC, el estudio consiste en comparar un ciclo teórico en el cual se va a considerar el aporte de este sistema de subenfriamiento, con otros dos ciclos de compresión de vapor, uno simple, y otro con un intercambiador de calor intermedio de subenfriamiento-recalentamiento (IHX). Para esto, se ha empleado el software EES, mediante el cual se ha realizado un programa que simula cada uno de estos ciclos, empleando parámetros de funcionamiento tales, que la simulación sea lo más realista posible. Para los cálculos energéticos realizados, se ha empleado el sistema de referencia del Instituto Internacional del Frío (IIR). Así, se han calculado todos los parámetros para cada uno de los puntos del ciclo; entalpía, presión, temperatura, y finalmente se ha calculado el COP. Este último parámetro, permite comparar los rendimientos de los tres ciclos objeto de estudio para ver cual ofrece un mejor resultado. También se ha estudiado cómo afecta el TESC al caudal de refrigerante



necesario del circuito. Se ha considerado que este circuito funciona entre dos focos, un foco frío a  $-20^{\circ}\text{C}$ , y un foco caliente en torno a  $29^{\circ}\text{C}$ , una temperatura muy próxima a la temperatura ambiente de la cámara climática en los ensayos de las células Peltier. El caudal másico de la instalación del circuito simple se ha fijado en  $0.25\text{ Kg/s}$ , por lo que la potencia de la misma será del orden del KW. Por último, no se han considerado pérdidas de carga en las conducciones, ni transferencias térmicas al exterior a través de las mismas. Los cálculos realizados para este apartado, se encuentran detallados en el Anexo 2.

### 1.10.1 Circuito de compresión simple de vapor

Este circuito, es la versión más simplificada de los dispositivos de refrigeración por compresión de vapor. Sigue las 4 etapas descritas en el apartado de fundamentos teóricos, y su esquema puede verse en la Figura 1.10.1-1. Como puede observarse, dispone de compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. Tiene 4 puntos claramente identificables en la figura, en cada uno de los cuales el fluido presenta un estado termodinámico. Los puntos 2 y 3 se corresponden con la zona de alta presión, y los puntos 4 y 1 con la de baja.

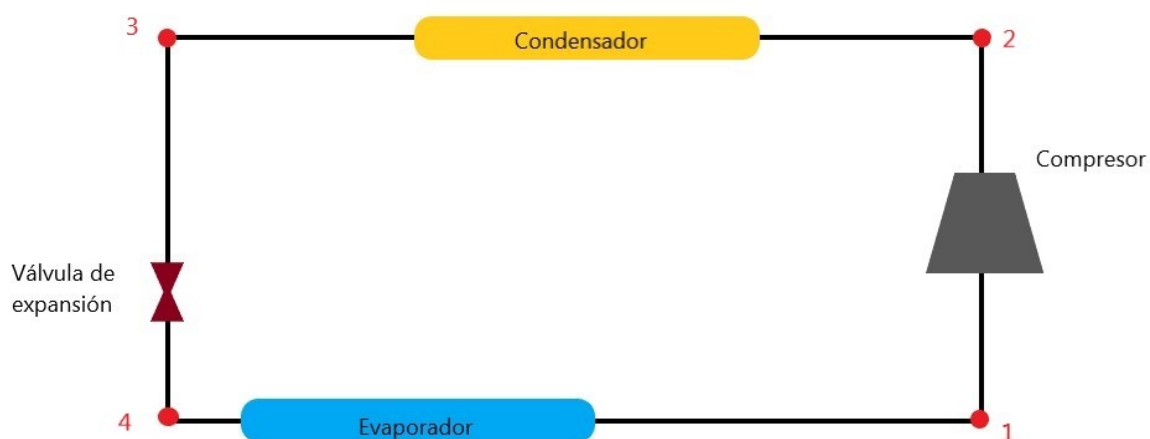
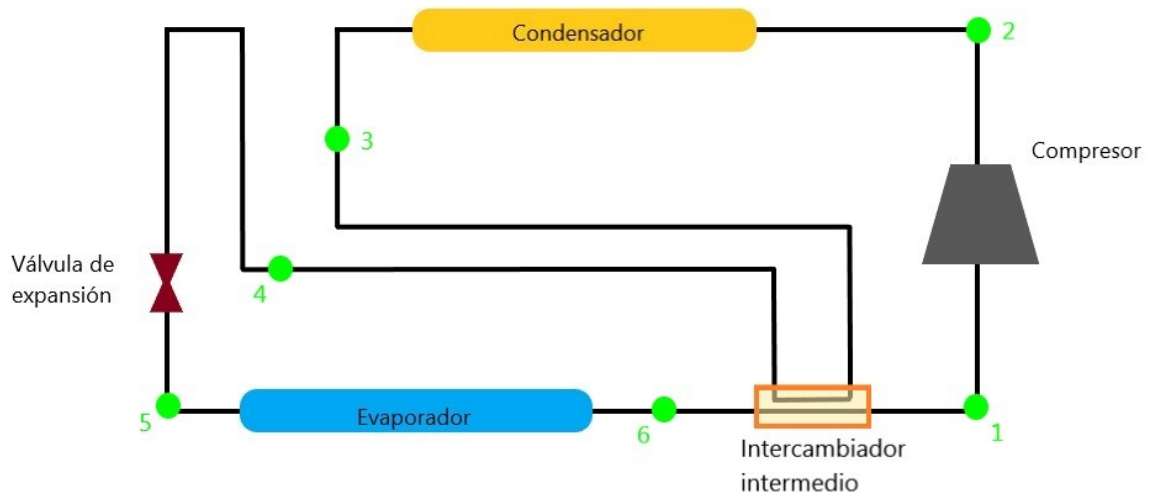


Figura 1.10.1-1: Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor.

### 1.10.2 Circuito de compresión de vapor con IHX

Este segundo circuito es muy similar al circuito simple, la diferencia es que se ha añadido un intercambiador de subenfriamiento-recalentamiento (IHX). El IHX, enfría el fluido a la salida del condensador a costa de calentar el fluido en la línea de aspiración. Esto produce que se entre a menor temperatura a la válvula de expansión, y por tanto al evaporador, por lo que se consigue extraer más calor del foco frío, mejorando así el COP, ya que al conseguir un enfriamiento adicional, se puede reducir el caudal de refrigerante, por lo que se necesita menos trabajo de compresión para extraer la misma cantidad de calor del foco frío, tal y como se demuestra en el Anexo 2. El inconveniente es que al calentar el fluido en la línea de aspiración, este entra al compresor a mayor

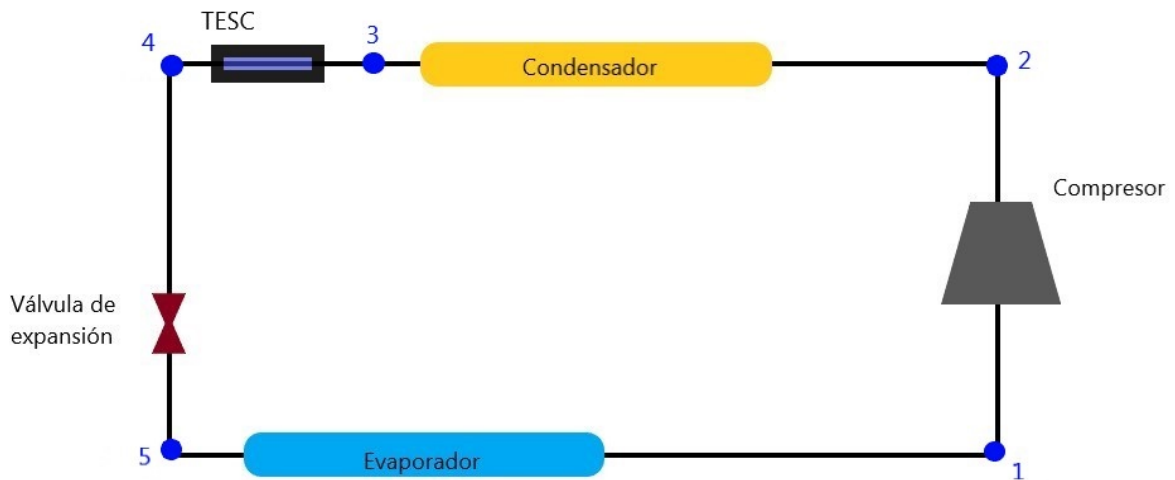
temperatura, algo que afecta negativamente a este elemento ya que produce sobrecalentamientos indeseados. Por este motivo, se emplean para este fin intercambiadores de bajo rendimiento, ya que de lo contrario, se produciría un sobrecalentamiento excesivo. En comparación al primer circuito, este circuito presenta dos puntos adicionales, las dos salidas del intercambiador. En la Figura 1.10.2-1 se muestra un esquema del mencionado circuito.



**Figura 1.10.2-1:** Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor con IHX.

### 1.10.3 Circuito de compresión de vapor con TESC

Este último circuito, monta el sistema de subenfriamiento que se ha mostrado en la Figura 1.10-1. Como puede verse, este sistema va montado a la salida del condensador con el objetivo de reducir la temperatura del fluido para que así este llegue más frío a la válvula de expansión, y por tanto al evaporador, de forma similar a lo que se consigue con el IHX, sin el inconveniente de aumentar la temperatura de aspiración. En lugar de esto, se debe aportar energía adicional para alimentar las células, por lo que en este trabajo, se estudia si el enfriamiento generado y la consiguiente reducción del caudal de refrigerante, asociada a un menor consumo de compresión, compensa el consumo de las células. En la Figura 1.10.3-1, se muestra un esquema del circuito con el TESC. En este caso se observa un punto más que en el circuito simple, y se corresponde a la salida del TESC.



**Figura 1.10.3-1:** Esquema del circuito que sigue el ciclo de compresión simple de vapor con TESC.

Al igual que en los circuitos anteriores, en este caso se han calculado todos los puntos de ciclo marcados, pero la problemática principal se ha presentado al realizar el cálculo de la transferencia de calor entre la célula Peltier y el fluido refrigerante, para poder así hallar el grado de subenfriamiento que se consigue con el TESC. Debido a la forma en la que se han realizado los ensayos, en los cuales la temperatura de la cara fría se mide ya dentro del bloque de cobre, no es necesario calcular la transferencia de calor entre la misma cara fría de la célula y el fluido, en cuyo caso habría que contabilizar la resistencia térmica de contacto entre la célula y el bloque, y la transferencia de calor por conducción dentro del bloque de cobre desde su superficie exterior hasta la interior, por donde circula el fluido, además de la transferencia de calor por convección forzada interna que tiene lugar entre el fluido y la superficie interior del conducto de sección cuadrada de cobre del TESC. De esta manera, solo ha sido necesario realizar el cálculo de la transferencia de calor por convección forzada interna, entre la superficie interna del bloque de cobre, que está a una temperatura que durante todo el estudio se ha llamado temperatura de la cara fría si bien, teóricamente, no está medida exactamente en la cara fría, sino en el interior del conducto de cobre, por ser imposible colocar el termopar con seguridad en contacto con la placa de cerámica de la cara fría con los medios que se dispone, algo que no solo no afectaría al estudio, sino que le otorgaría un grado de complejidad innecesario.

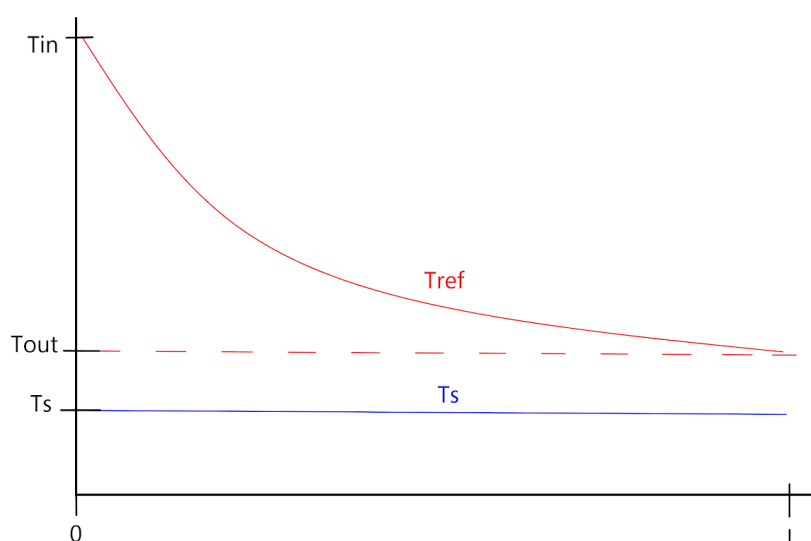
La hipótesis que se ha seguido, a la hora de realizar el cálculo de la transferencia de calor entre la superficie interna del conducto de cobre del TESC y el fluido, es el método de la temperatura superficial constante.

### 1.10.3.1 Método de la temperatura superficial constante

Este método, se basa en la suposición de que la temperatura de la superficie interna del conducto de sección cuadrada del TESC es constante, y se adapta perfectamente a la forma en la que se han realizado los ensayos ya que como ya se ha comentado

anteriormente, la temperatura de la cara fría se mide en el centro del bloque de cobre, por lo que no debería inducir a mucho error considerar que esta temperatura, es constante en toda la mencionada superficie. En cualquier caso, esto es una hipótesis teórica, que pese a tener fundamentos sólidos, requiere de validación experimental ya que se trata de un estudio teórico.

Este método se ha aplicado a cada conjunto de dos células Peltier, es decir, a cada unidad del TESC, calculando la temperatura superficial necesaria para conseguir un subenfriamiento dado en dicha unidad. Dado que todas las unidades se sitúan en serie, cada unidad que se monte conseguirá un enfriamiento adicional. En la Figura 1.10.3-2 se muestra una representación esquemática del salto de temperatura en cada unidad del TESC.



**Figura 1.10.3-2:** Representación esquemática del salto de temperatura en cada unidad del TESC.

Como puede verse en la Figura 1.10.3-2, el salto de temperatura en cada módulo entre el fluido refrigerante ( $T_{ref}$ ) y la superficie del disipador ( $T_s$ ), no es constante, sino que varía de forma logarítmica, por tanto, para realizar los cálculos, se ha empleado un salto de temperatura logarítmico promedio. De la expresión del salto de temperatura logarítmico promedio hay que despejar la temperatura superficial, por lo que hay que realizar un cálculo iterativo ya que no se puede despejar esta temperatura de la expresión de forma directa. Para obtener el coeficiente de convección o película, necesario para calcular la transferencia de calor por convección forzada interna, se ha empleado la correlación de Gniellinski, donde los parámetros termofísicos del fluido, se han calculado a la temperatura media entre la entrada y la salida de la unidad del TESC, dando como resultado un valor promedio del coeficiente de película, que permite calcular la transferencia térmica total de la unidad del TESC (Ver Anexo 2).

Para realizar este estudio, también se ha tenido que seleccionar las condiciones de alimentación de las células del subenfriador termoeléctrico, ya que como se ha visto en los ensayos, tienen un amplio rango de operación. De esta manera, se pueden alimentar las células a potencias elevadas dentro de su rango de alimentación, disipando mayor potencia, pero lógicamente consumiendo mayor potencia, o también se pueden alimentar a potencias más bajas, de forma que se disipe menos potencia, pero también se consume menor potencia. Dado que el rendimiento de la célula es diferente según las condiciones de trabajo, se ha calculado el punto de funcionamiento de la célula que obtiene mayor rendimiento, y se ha intentado que la célula trabaje lo más cerca posible de este punto.

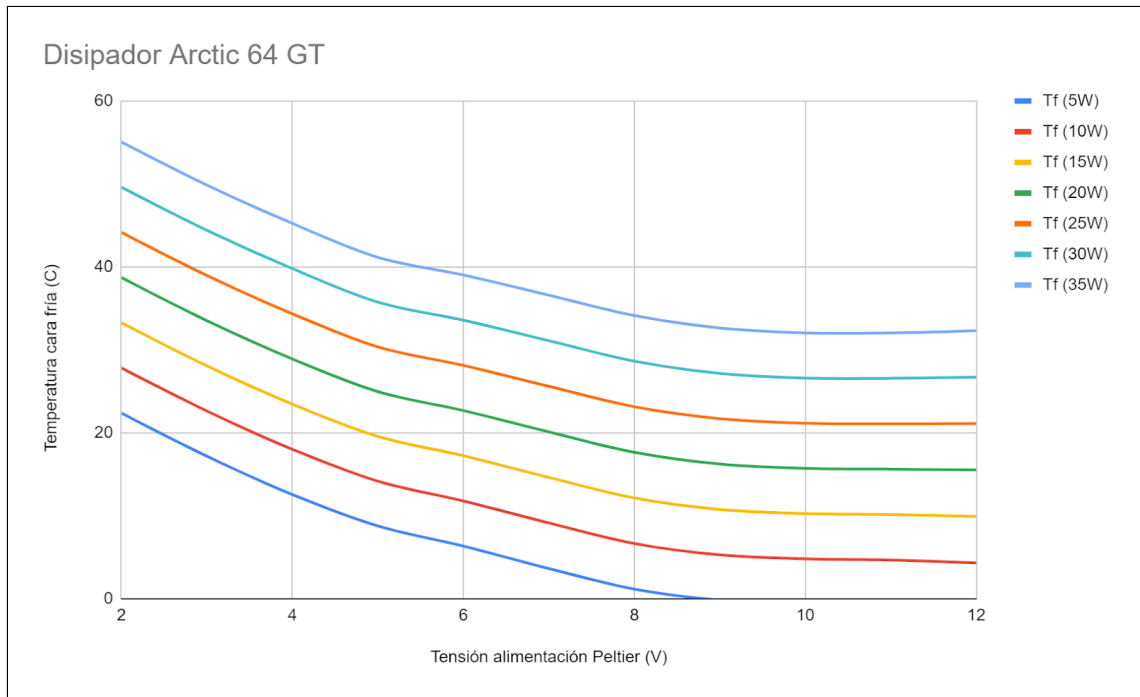
## **1.11. Resultados**

En este apartado, se presentan los resultados del estudio que se ha realizado. En primer lugar, se muestran las curvas de comportamiento que caracterizan cada sistema de disipación. Estas curvas, se han obtenido a partir de interpolaciones polinómicas multidimensionales en base a los datos que se han obtenido en los ensayos. Para realizar las interpolaciones se ha creado un programa con el software de cálculo matemático libre Octave, y se han empleado funciones específicas, que a partir de matrices de datos, creadas a partir de los ensayos, realizan de forma automática la interpolación siguiendo un patrón de tipo polinómico definido a trozos (o spline), ya que como puede verse, la separación entre las rectas de ensayos a diferentes tensiones se va reduciendo a medida que aumenta la tensión, por tanto, para obtener datos intermedios podría inducir a mucho error una interpolación lineal. Este procedimiento ha permitido obtener cualquier punto de funcionamiento dentro del rango de trabajo de los ensayos. El resultado de estas interpolaciones, se muestra como superficies en tres dimensiones, de las cuales, cualquier punto, puede ser un punto de funcionamiento real del sistema. Este procedimiento está detallado en el Anexo 1.

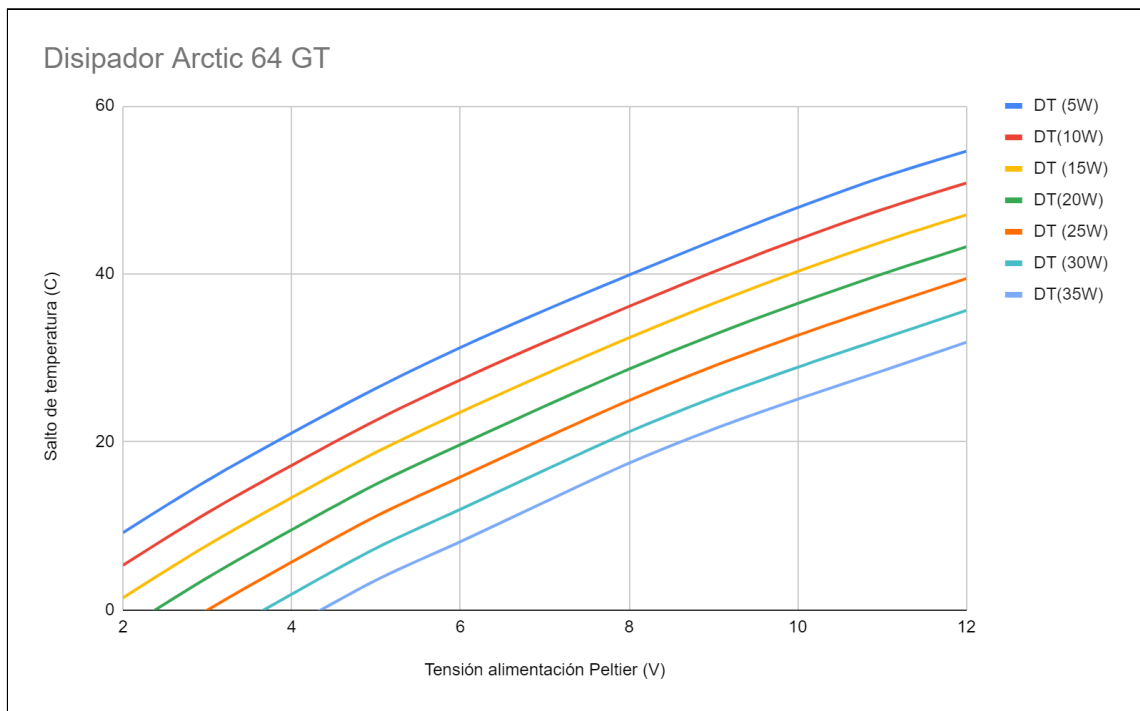
Los últimos puntos de este apartado, se corresponden con los resultados del estudio de viabilidad de la célula Peltier, en conjunto con el mejor de los disipadores, como dispositivo de subenfriamiento en equipos de refrigeración por compresión de vapor, buscando mejorar el rendimiento y la sostenibilidad de los mismos.

### **1.11.1 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador de convección forzada**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con el disipador de convección forzada tras las interpolaciones. Las figuras 1.11.1-1, 1.11.1-2 y 1.11.1-3, corresponden con el comportamiento de la célula Peltier con este primer disipador, y definen todos sus parámetros de funcionamiento. De esta manera, para conocer el consumo de la célula, su temperatura de cara fría, y su temperatura de cara caliente a una tensión de alimentación y carga térmica determinada, bastaría con ir a las gráficas mencionadas y leer los correspondientes valores.



**Figura 1.11.1-1:** Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).

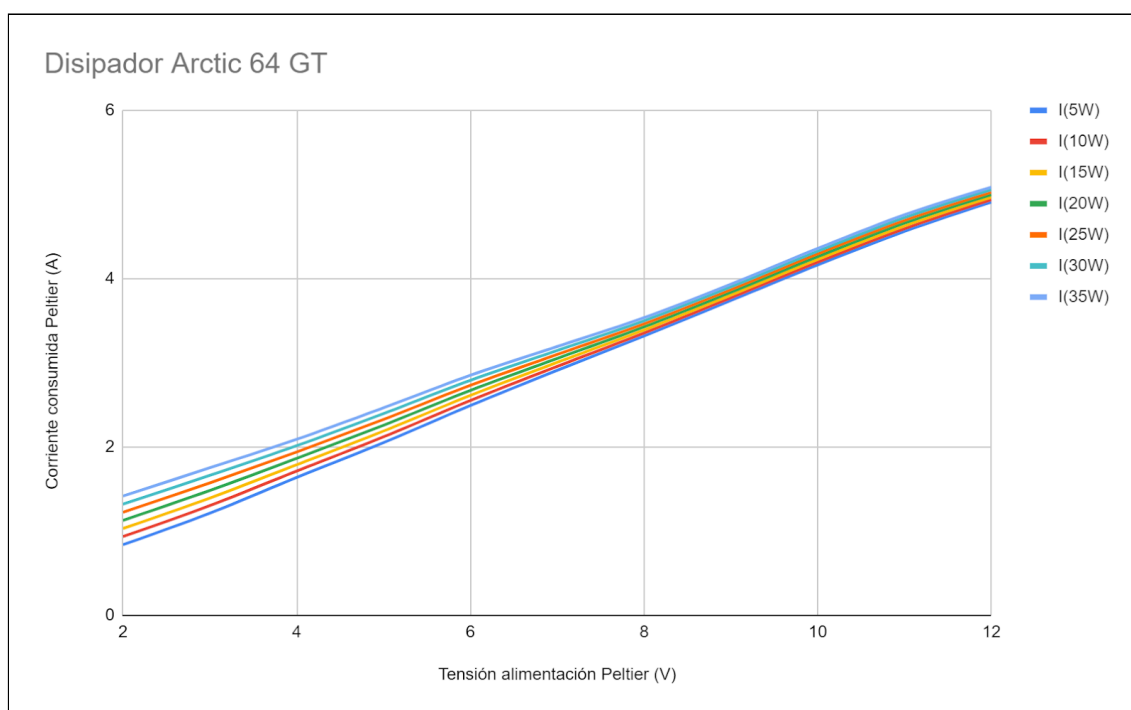


**Figura 1.11.1-2:** Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).

Como es lógico, a mayor tensión de alimentación, mayor capacidad de disipación. En la Figura 1.11.1-1, se observa como la temperatura de la cara fría de la célula, disminuye a mayor tensión para una misma potencia térmica a disipar. Además, se observa como

este descenso no es lineal, sino que tiende a un valor, que es la temperatura mínima que la célula Peltier es capaz de conseguir para una potencia térmica dada, y como se verá posteriormente, depende del sistema de disipación empleado.

En la Figura 1.11.1-2, se observa la diferencia de temperatura entre caras. Con esta diferencia y el valor de temperatura de cara fría, se puede calcular la temperatura de la cara caliente sumando ambos valores. En esta gráfica, se muestra claramente que el salto de temperatura entre caras no es un valor constante característico de la célula, sino que varía dependiendo de las condiciones de carga a las que ésta esté sometida. Puede verse que a mayor potencia térmica, menor es esta diferencia. Esto se debe a que a mayor potencia, más temperatura adquiere la cara fría, acercándose cada vez más a la temperatura de la cara caliente, hasta que la célula finalmente satura.



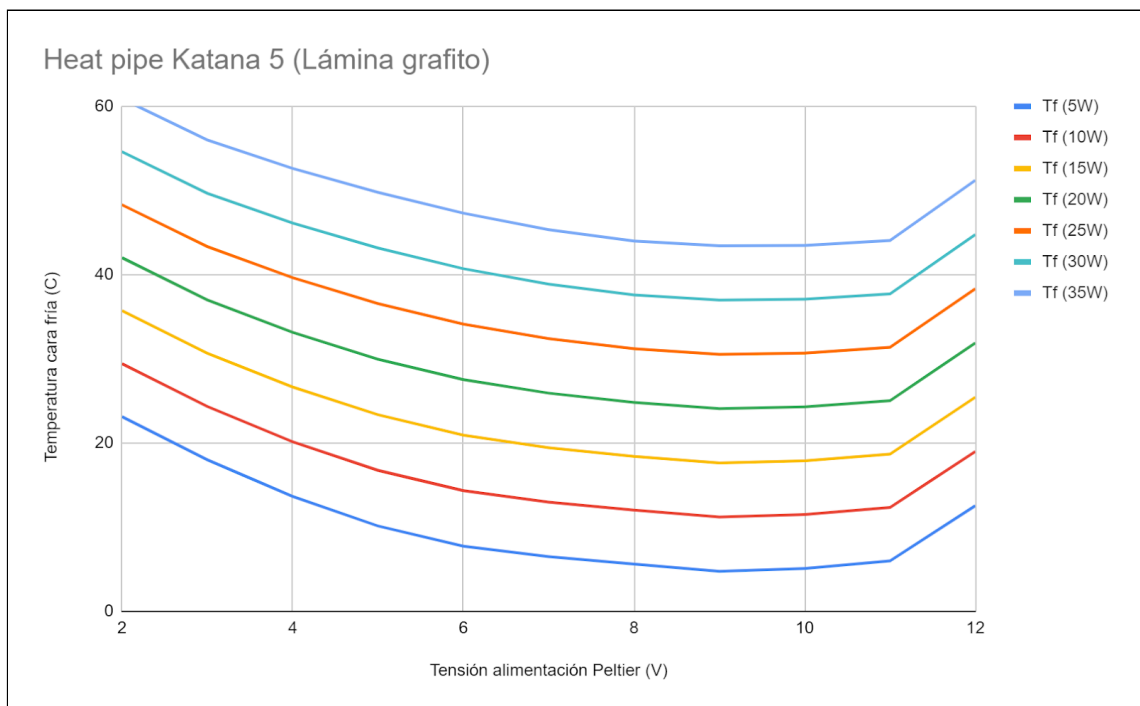
**Figura 1.11.1-3:** Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador convección forzada).

En la Figura 1.11.1-3, se muestra el consumo de la célula en función de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas. De esta gráfica, se puede extraer una conclusión interesante, y es que la resistencia eléctrica de la célula Peltier, es prácticamente constante para una misma carga térmica en todo el rango de tensiones de alimentación, ya que la relación entre la tensión de alimentación y la corriente consumida es de tipo lineal, y la pendiente, que es la constante que relaciona ambas magnitudes, es de valor  $1/R$ , donde  $R$  es la resistencia de la célula Peltier. Sin embargo, si se aumenta la potencia térmica manteniendo la tensión, este valor cambia. Concretamente, según la ley de Ohm, la tensión es el producto entre la intensidad y la resistencia eléctrica, por lo que si la tensión se mantiene y la intensidad ha aumentado, la resistencia debe haber disminuido.

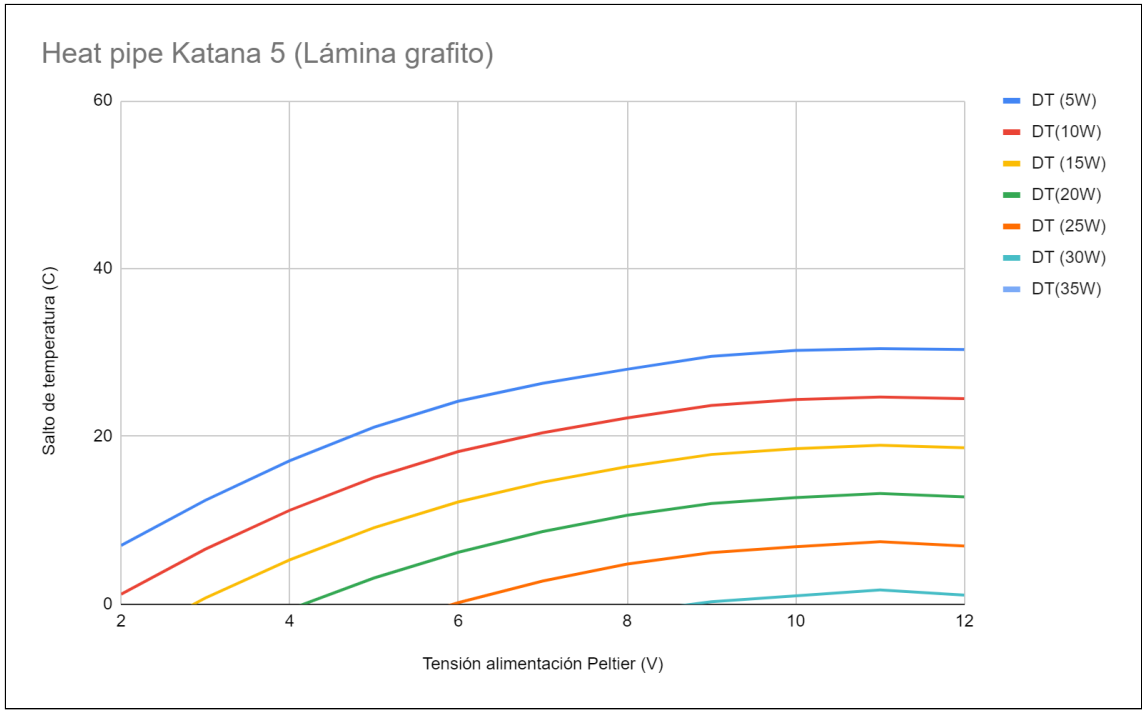


### 1.11.2 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador *heat-pipe* montado con lámina de grafito

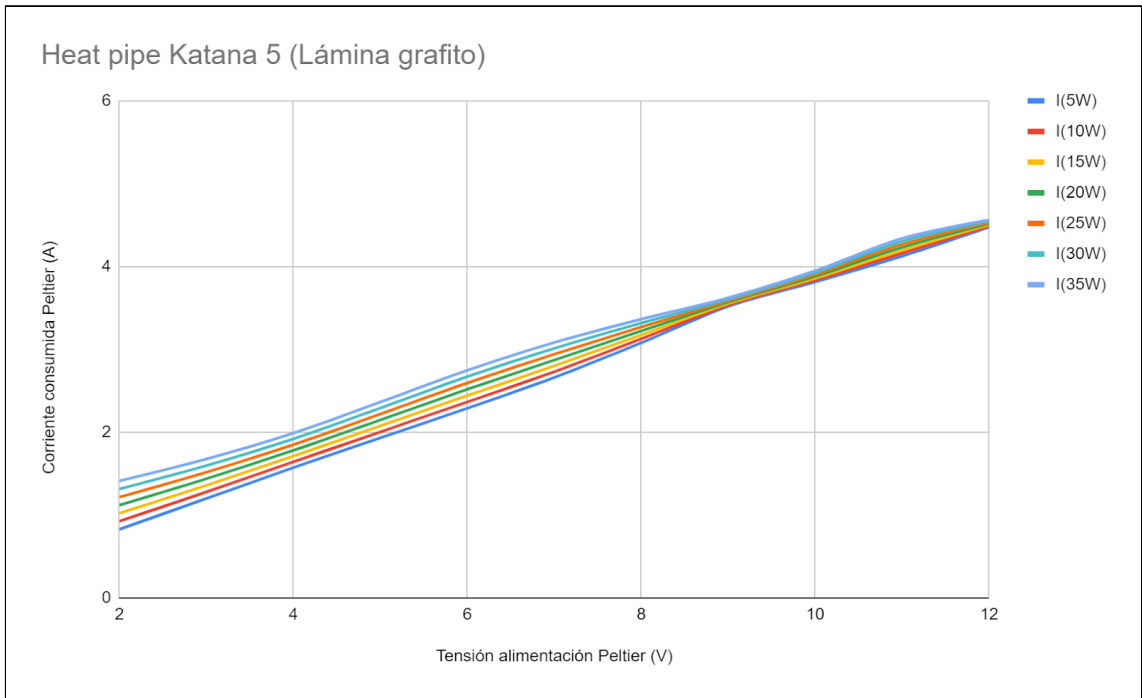
Como ya se ha comentado anteriormente, los resultados de este segundo disipador son menos prometedores que los del primero. En la Figura 1.11.2-1, se muestra la evolución de la temperatura de la cara fría para diferentes tensiones de alimentación y cargas térmicas. En este caso, puede verse claramente algo que no se observaba con el primer disipador, y es la temperatura de cara mínima que es capaz de conseguir la célula para una potencia térmica determinada. Esto se consigue entorno a 9V de alimentación, y a partir de este punto, la célula pierde capacidad de enfriamiento, y se vuelve altamente ineficiente.



**Figura 1.11.2-1:** Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador *heat-pipe*, lámina de grafito).



**Figura 1.11.2-2:** Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, lámina de grafito).



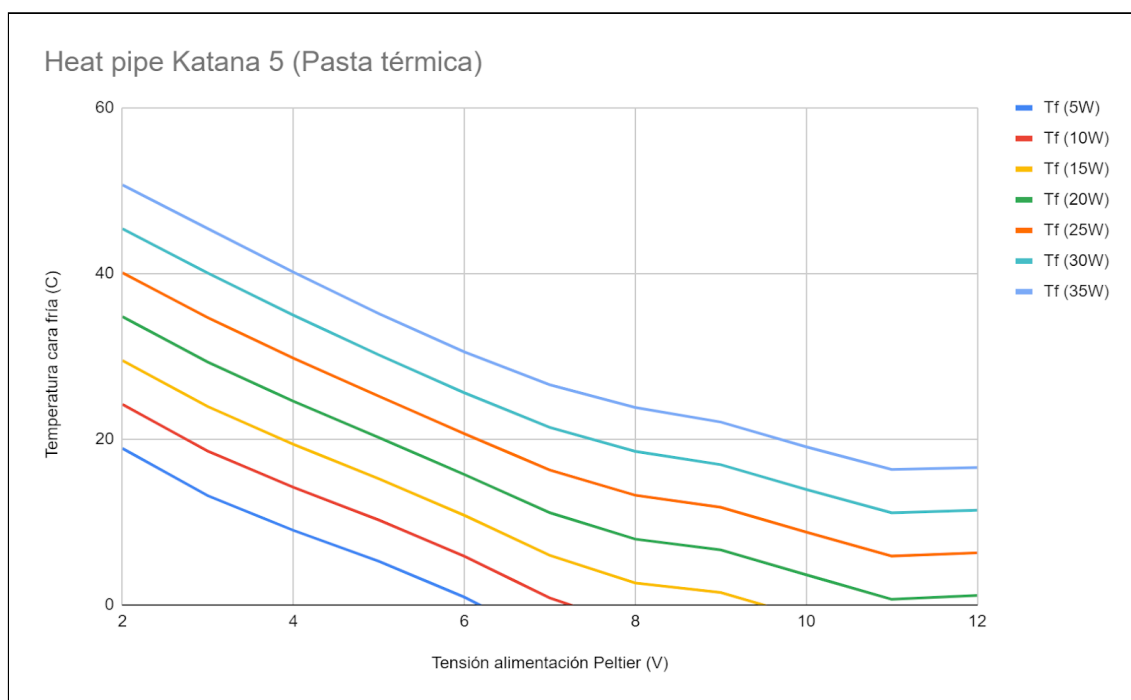
**Figura 1.11.2-3:** Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, lámina de grafito).

Si se observa la Figura 1.11.2-2, puede verse que las diferencias de temperatura entre caras con esta segunda configuración, son menores a las de la primera, lo cual implica que la célula Peltier satura antes, por lo que soporta menos carga térmica.

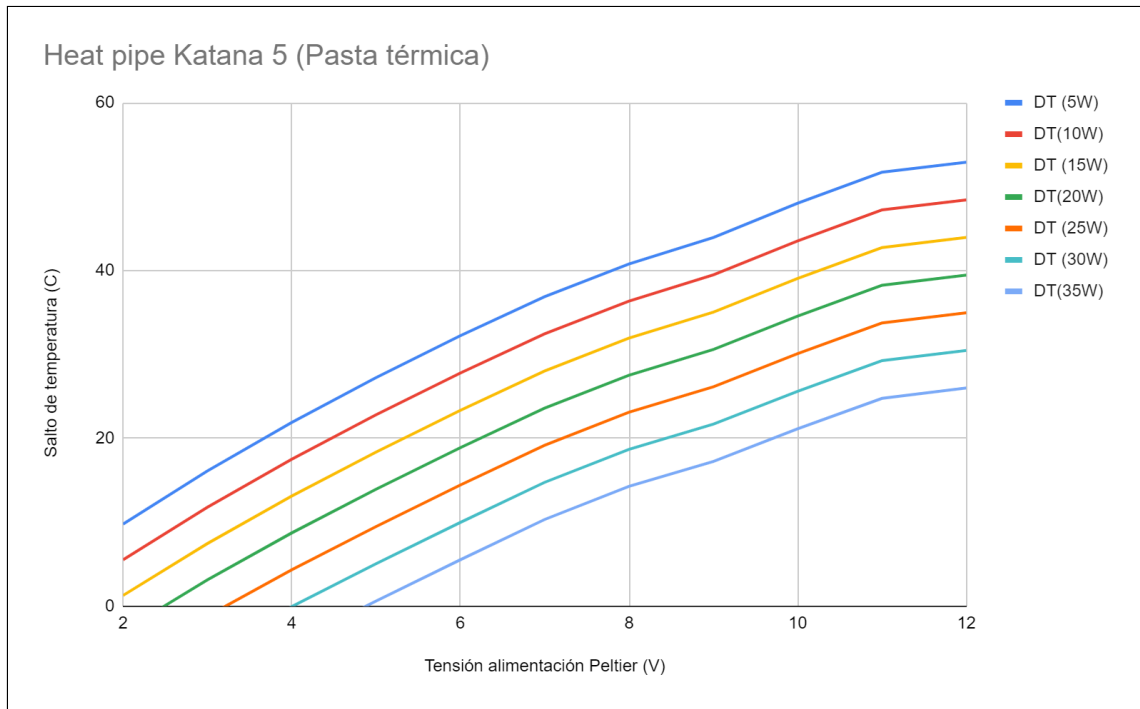
En cuanto al patrón de consumo de corriente con esta segunda configuración, es similar al de la primera, si bien los valores son más bajos, algo que ya se ha observado en los datos obtenidos directamente de los ensayos.

### 1.11.3 Comportamiento de la célula Peltier con el disipador *heat-pipe* montado con pasta térmica

La última configuración que se ha considerado en el estudio, consiste en el mismo disipador Katana 5, pero montado sobre pasta térmica. En la Figura 1.11.3-1, se observa la evolución de la temperatura de la cara fría respecto la tensión de alimentación para las diferentes potencias térmicas. A grandes rasgos, los valores de temperatura parecen inferiores a los de los otros disipadores, algo que ya se había observado de los datos obtenidos directamente de los ensayos, y que significa que este disipador es más efectivo que el resto disipando el calor, si bien esta comparación se realizará con más detalle en siguientes apartados.

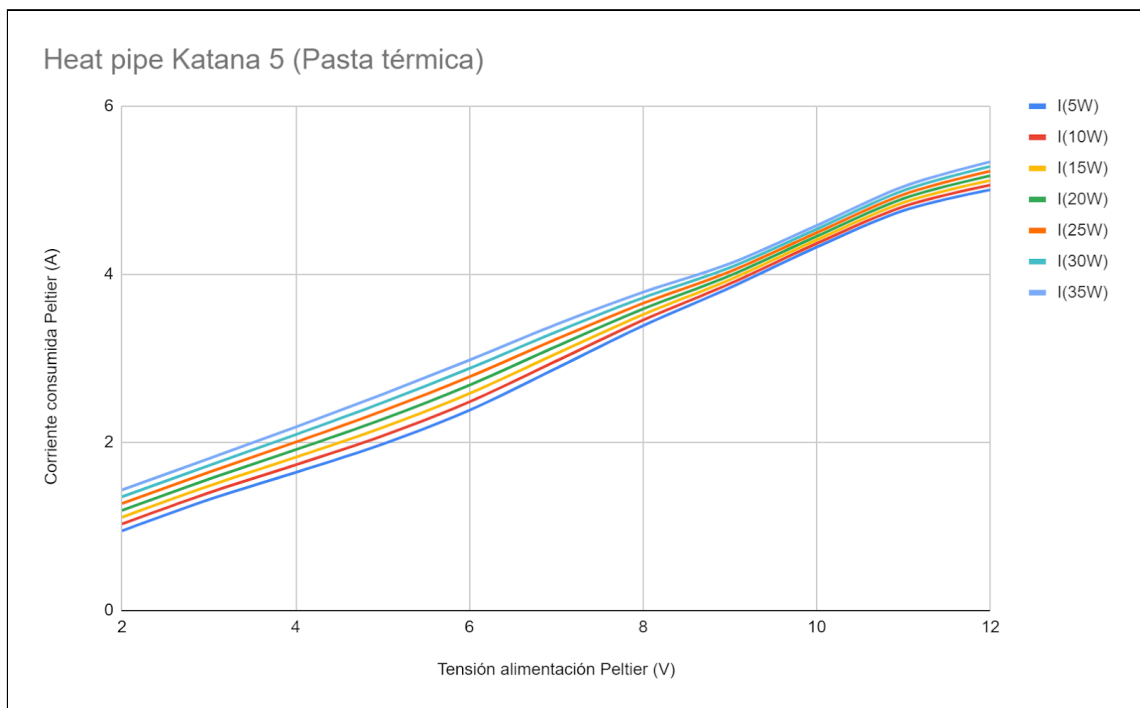


**Figura 1.11.3-1:** Temperatura de la cara fría respecto a la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador *heat-pipe*, pasta térmica).



**Figura 1.11.3-2:** *Diferencia de temperaturas entre caras de la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, pasta térmica).*

El salto de temperatura entre ambas caras por otra parte, sigue un patrón similar al que se ha obtenido del primer disipador. Lo mismo pasa con el patrón de consumo de corriente.



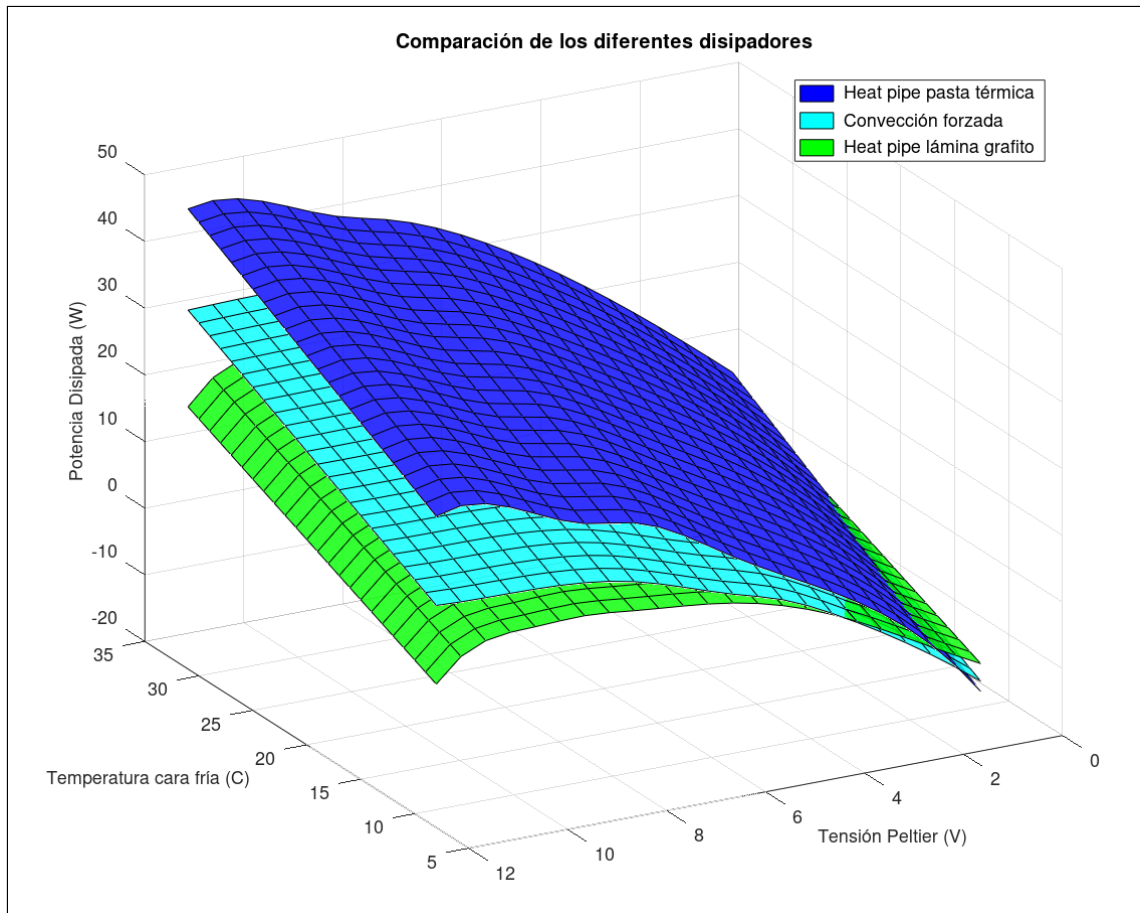
**Figura 1.11.3-3:** *Corriente consumida por la célula respecto de la tensión de alimentación para diferentes cargas térmicas (Disipador heat-pipe, pasta térmica).*

#### 1.11.4 Comparación de las diferentes configuraciones disipadores

Llegados a este punto, se ha comentado qué disipador resulta más efectivo a la hora de evacuar el calor de la cara caliente de la célula Peltier, pero estas comparaciones se han realizado de forma aproximada, y comparando únicamente puntos de funcionamiento concretos, por lo que no se tiene una visión global de qué sistema es realmente mejor que los demás, y si lo es en todo el rango de operación.

Si bien el disipador de convección forzada, presenta un comportamiento lineal, ya que disipa el calor de forma proporcional a su resistencia térmica, que es prácticamente constante en todo el rango de temperaturas en el que se trabaja, las configuraciones con *heat-pipe*, están sujetas al hecho de, como ya se ha descrito anteriormente, su resistencia térmica varía según la carga térmica a la que estén sometidos, ya que poseen un fluido de trabajo que debe de evaporar para disipar el calor de forma óptima, y esto sucede a partir de un umbral mínimo de carga térmica, por lo que es posible que a bajas potencias, el disipador de convección forzada supere a los *heat-pipe*, algo que debe comprobarse para hacer una adecuada selección según las condiciones de funcionamiento.

Para realizar esta comparación de forma precisa, a partir de las interpolaciones, se ha obtenido una superficie de puntos para cada disipador, en la que cada uno de estos puntos es un punto de funcionamiento del sistema. Las superficies de puntos de cada disipador, se han plasmado simultáneamente sobre una misma gráfica para que así, se puedan comparar de forma simultánea todos los puntos de funcionamiento de todas las configuraciones de disipación. En la Figura 1.11.4-1, se muestra el resultado de este procedimiento.



**Figura 1.11.4-1:** Comparación de los tres sistemas de disipación.

Como puede verse, los resultados varían notablemente según el sistema de disipación. Como ya se había intuido, el disipador heat-pipe Katana 5 con pasta térmica (color azul), es la opción que mejor disipa el calor en todo el rango de temperaturas de cara fría. Va seguido del disipador Arctic 64 GT, de convección forzada (color turquesa), y en último lugar queda el mismo disipador Katana 5, montado sobre una lámina de grafito (color verde). A bajas cargas térmicas, las diferencias entre disipadores son bajas, ya que no se requiere de una gran capacidad de disipación para desalojar todo el calor generado, pero a medida que se van incrementando la potencia térmica y la tensión de alimentación de la célula, debe disiparse cada vez más calor de la cara caliente de esta, por lo que aumentan las exigencias para el sistema de disipación, y se hacen más evidentes las diferencias entre las tres opciones. Resulta curioso que haya una pequeña zona que se encuentra entre 2 y 3V de tensión aplicada a la célula, en la que el disipador Katana 5 supera al disipador de convección forzada. Esto resulta extraño porque en todo caso, los *heat-pipes* del disipador Katana 5, que tienen una potencia mínima de activación, deberían funcionar peor a bajas cargas térmicas, y mejor a altas en comparación al disipador de convección forzada, que presentaría un comportamiento más lineal y predecible, sin embargo, en una pequeña región de trabajo, parece que funciona mejor el disipador *heat-pipe*. Esta observación, se considera que se debe al material de la base de cada uno de los disipadores. El disipador de convección forzada está formado de un bloque macizo de aluminio, mientras que el disipador *heat-pipe* tiene

la base de cobre, mucho más conductor que el aluminio, por lo que a bajas potencias térmicas, el calor fluye con mayor facilidad por la pequeña base de cobre, dando mejores resultados que el aluminio, pero cuando se aplica más calor, aumentan las exigencias, el calor se transmite mejor por el cuerpo de los disipadores, y adquiere mayor peso la forma en la que están diseñados.

Por otra parte, también resulta contraintuitivo que el disipador *heat-pipe* funcione peor con lámina de grafito que con pasta térmica, cuando la conductividad de la primera es cuatro veces superior a la de la segunda. Esto puede ser debido a que el apriete, no sea suficiente para asegurar el buen contacto entre la superficie del disipador o la célula, con la lámina de grafito, por lo que la resistencia térmica de contacto sea tan grande en comparación a la de la pasta térmica, que por su carácter viscoso se adapta perfectamente a los contornos, que haga que este segundo método sea más efectivo para esta aplicación en cuestión.

Llegados a este punto, queda claro que el conjunto que presenta mejores características, es el disipador *heat-pipe* Katana 5 montado con pasta térmica. Por este motivo, se escogerá esta configuración para los estudios posteriores, quedando el resto descartadas ya que presentan características inferiores en todo el rango de trabajo.

### **1.11.5 Viabilidad del TESC**

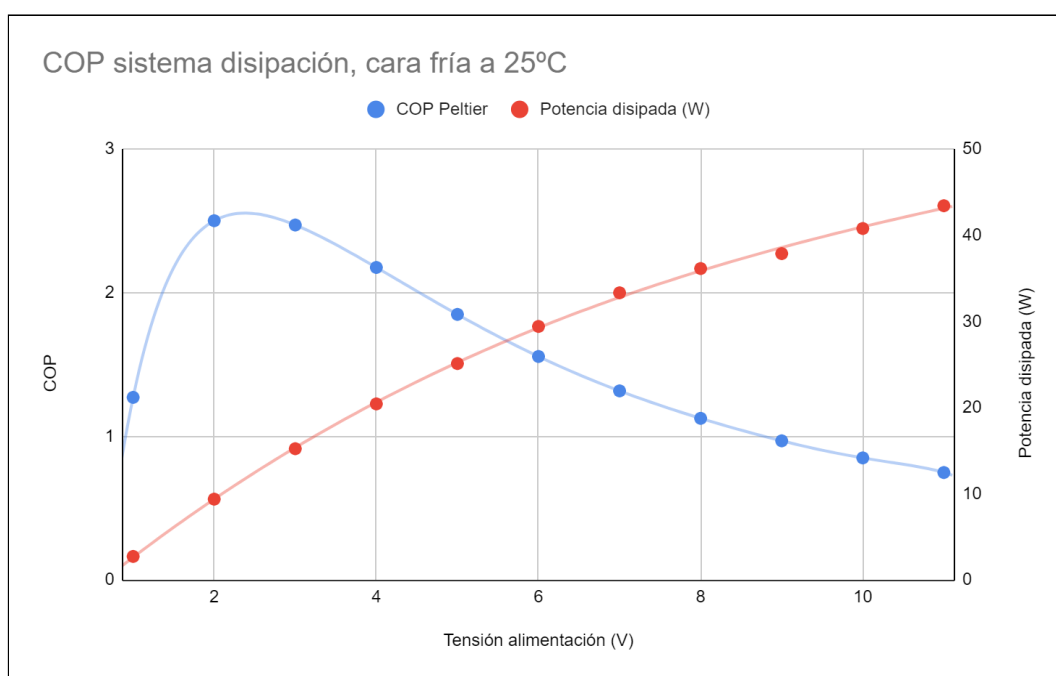
En este apartado, se muestran los resultados obtenidos acerca de la viabilidad del uso de las células Peltier como dispositivos de subenfriamiento.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos de la evolución del COP del conjunto formado por la célula y el disipador Katana 5, según las condiciones de alimentación. Estos datos, permiten conocer las condiciones de funcionamiento en las que la célula trabaja de forma más eficiente, disipando el máximo calor con la mínima energía. El objetivo es trabajar tan cerca de este punto como sea posible. Posteriormente, se muestra cómo afecta la incorporación de los módulos termoeléctricos al COP del circuito simple de compresión de vapor, así como al caudal másico de refrigerante necesario, y se comparará con el circuito que monta un intercambiador intermedio de subenfriamiento-recalentamiento.

#### **1.11.5.1 Punto de trabajo óptimo de las células Peltier**

Para averiguar la zona de trabajo de mayor eficiencia de la célula en conjunción con el disipador, se ha representado el COP de este sistema en función de la tensión de alimentación para una temperatura de cara fría de 25°C, una temperatura que no es aleatoria, sino que se ha seleccionado por ser una temperatura intermedia dentro del rango de funcionamiento de la célula, fácilmente asumible, y que como se ha verificado posteriormente, produce un enfriamiento tal, que la tensión necesaria para que la célula funcione en estas condiciones, es cercana a la tensión óptima de funcionamiento.

En la Figura 1.11.5-1, se muestra la representación del COP y la potencia disipada frente a la tensión de alimentación. De esta manera, se observa que el COP es muy bajo a bajas tensiones de alimentación, esto es debido a que a baja potencia (Entorno a 1W), el consumo del ventilador del disipador (1.7W), es grande en proporción al calor absorbido (y a la potencia consumida) por la célula, por lo que el COP se ve considerablemente mermado. A medida que se llega a los 2V de alimentación, el COP crece rápidamente. Crece la potencia disipada en relación a la consumida, baja la influencia del consumo del ventilador, y al ser la intensidad de alimentación relativamente baja, el efecto Peltier, según el cual el calor absorbido es proporcional a la intensidad, gana terreno al efecto Joule, según el cual el calor generado es proporcional al cuadrado de la intensidad. Sobre los 2,4V se llega al máximo COP, y a partir de ahí, con el incremento de la intensidad y el correspondiente calor generado por efecto Joule, el COP empieza a decrecer gradualmente.

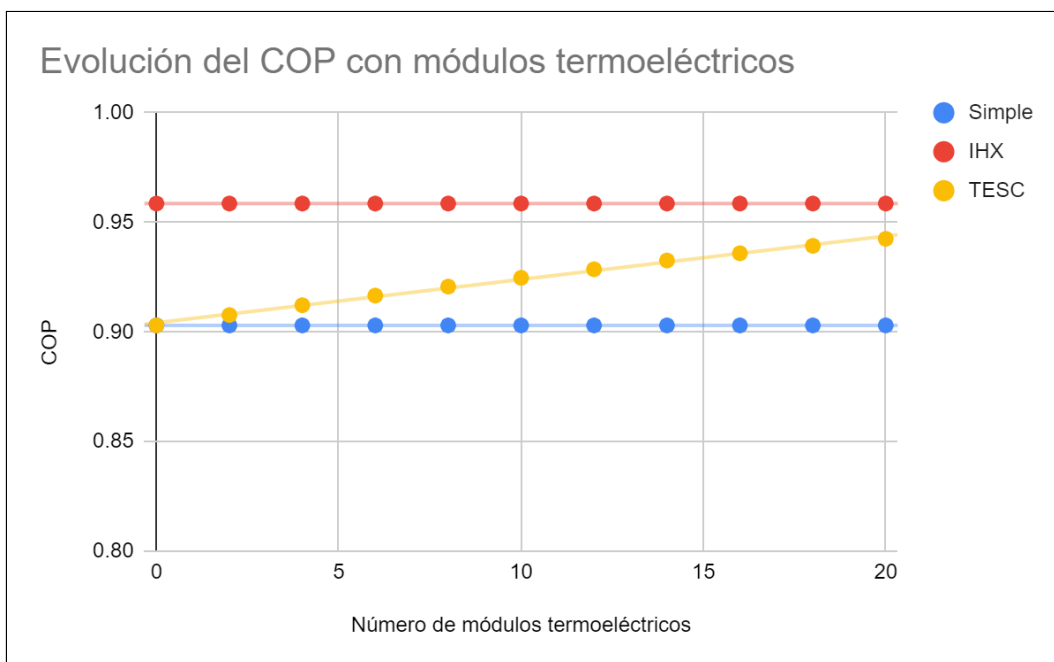


**Figura 1.11.5-1:** Representación del COP de la célula Peltier y la potencia disipada, con el disipador Katana 5.

### 1.11.5.2 Efecto del TESC sobre el COP del circuito

Como ya se ha comentado anteriormente, el COP es el parámetro que define el rendimiento en un equipo de refrigeración por compresión de vapor. Este parámetro por tanto, determina la viabilidad del sistema de subenfriamiento termoeléctrico. Si este parámetro crece de forma apreciable, el TESC es viable, y en caso contrario, no lo es. En la Figura 1.11.5-2, se muestra el COP para los diferentes circuitos con la incorporación de unidades de subenfriamiento termoeléctricas. El circuito simple y el circuito con IHX, no incorporan células termoeléctricas, por lo que su COP es constante.





**Figura 1.11.5-2:** Evolución del COP con la incorporación de módulos termoeléctricos.

Como puede verse en la figura, el COP del circuito con el TESC, aumenta de forma apreciable con la incorporación de módulos termoeléctricos. Este aumento, parece ser lineal, por lo que a primera vista podría pensarse que la colocación de un número infinito de módulos termoeléctricos conllevaría a un COP infinito, sin embargo, este parámetro no tendería nunca a infinito, sino más bien entorno a 2.2, que es el COP con el que está trabajando la célula Peltier en las condiciones del estudio. De esta manera, con 20 módulos termoeléctricos, que se corresponden con 10 unidades de subenfriamiento en serie como ya se ha mostrado anteriormente, se consigue una mejora del COP del 4.4% respecto al circuito simple, si bien el circuito con IHX produce una mejora del 6.15% respecto al mismo circuito simple. Esto parece inclinar la balanza a favor del IHX frente al TESC, sin embargo, el IHX produce un recalentamiento en la línea de aspiración que hace que el compresor trabaje a mayores temperaturas, lo cual implica un deterioro mayor de este componente de la instalación, motivo por el que para este fin, se montan intercambiadores de baja eficiencia (Entre el 15 y el 30%), ya que a mayor eficiencia, mejor sería el intercambio térmico, y mayor el recalentamiento. En este caso, para mejorar el rendimiento en torno a un 1.8% adicional, con el IHX se sale del compresor a unos 200°C, mientras que con el TESC, se sale del compresor a aproximadamente 170°C, es decir, se ha aumentado la temperatura de descarga en un 15%. Dicho esto, queda patente que el uso del TESC aporta beneficios claros en cuanto al rendimiento del circuito, y estos beneficios no se consiguen con el efecto colateral de subir las temperaturas de trabajo del compresor. Además, la naturaleza de este sistema, lo hace un gran candidato para trabajar en conjunto con otros elementos de mejora del rendimiento, como por ejemplo el propio intercambiador de subenfriamiento-recalentamiento.

### 1.11.5.2 Efecto del TESC sobre el caudal de refrigerante del circuito

Otro factor importante en el que incide el uso de las células termoeléctricas como dispositivos de subenfriamiento, es el caudal de refrigerante que necesita la instalación. Dado que la célula Peltier aporta un enfriamiento adicional al sistema, se requiere de un menor caudal refrigerante para un mismo enfriamiento del foco frío, o dicho de otra manera, el calor extraído del foco frío tiene una pequeña componente debida a la aportación del TESC, que se traduce en una reducción del caudal másico necesario para extraer esta misma cantidad de calor.

Conseguir reducciones del caudal másico en una instalación de refrigeración por compresión de vapor, aporta beneficios importantes, como una reducción de las pérdidas de carga a lo largo de los conductos del condensador y el evaporador, lo cual implica menores trabajos de compresión para una misma potencia refrigerante. Además, reducir la cantidad de fluido refrigerante implica menores emisiones directas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que se producen debido a la fuga de estos fluidos. En la Figura 1.11.5-3, se muestra la evolución del caudal de refrigerante necesario de la instalación para el circuito simple, el circuito con el intercambiador de subenfriamiento-recalentamiento, y el circuito con el subenfriador termoeléctrico para un número creciente de módulos termoeléctricos.

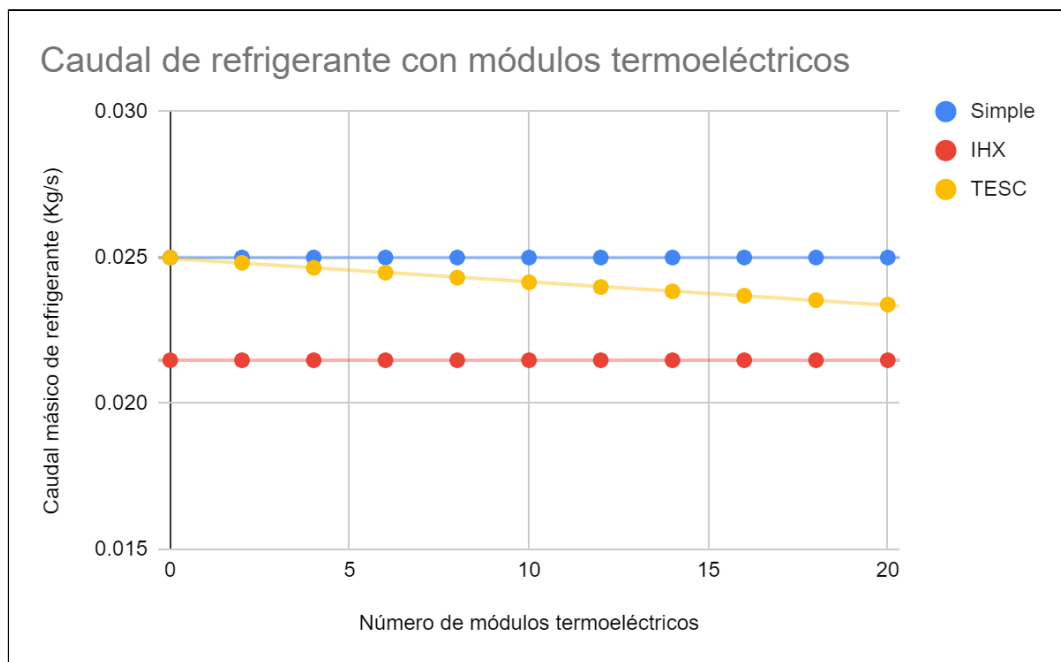


Figura 1.11.5-3: Evolución del caudal de refrigerante con la incorporación de módulos termoeléctricos.

Como puede verse, a medida que se añaden módulos termoeléctricos, el refrigerante necesario disminuye debido al enfriamiento provocado por el TESC. Con 20 módulos termoeléctricos, se consigue una reducción del caudal del 6.44%, un valor, que pese a ser inferior a la reducción del 14.1% que se consigue con el IHX, no es nada despreciable.

## 1.12. Conclusión

Como se ha visto, las células Peltier son dispositivos limpios, compactos, sencillos, y fáciles de regular, que se emplean en una gran cantidad de aplicaciones, tanto destinadas a la generación de electricidad, como a la producción de frío. Estas aplicaciones, engloban a sectores tan dispares como la industria médica, y la industria aeroespacial o la automovilística. Cada vez, se están planteando más posibilidades de uso de estos dispositivos, por lo que el interés científico que suscita su estudio, está creciendo.

En este contexto, este trabajo ha pretendido en primer lugar, mapear estos dispositivos termoeléctricos con diferentes configuraciones de disipación, para poder conocer así su comportamiento bajo una gran cantidad de condiciones de alimentación y carga térmica, algo que constituye un pequeño aporte científico, para todo aquel que desee trabajar con estos dispositivos ya que aporta información útil de forma sencilla, acerca de las características de funcionamiento de los mismos. También se han analizado los datos obtenidos para las diferentes configuraciones de disipación, llegando a la conclusión de que el disipador *heat-pipe* Katana 5, montado con pasta térmica, ofrece mejores resultados que el resto de disipadores, disipando mayor carga térmica, para las mismas condiciones de temperatura y alimentación. Finalmente, se ha estudiado la viabilidad de emplear módulos termoeléctricos como dispositivos de subenfriamiento en circuitos de refrigeración por compresión de vapor, circuitos que cada vez deben ser más eficientes debido a las crecientes restricciones normativas a las que se enfrentan. Para esto, se ha realizado un programa con el software EES, en el cual se ha calculado un circuito simple de compresión de vapor, un circuito simple con un IHX (intercambiador intermedio de subenfriamiento-recalentamiento), y un circuito simple al cual se le ha añadido un dispositivo de subenfriamiento termoeléctrico. En base a este estudio, se ha determinado que la idea de emplear módulos termoeléctricos como dispositivos de subenfriamiento, es prometedora, ya que puede ofrecer mejoras en el COP de más de un 4% a nivel teórico, lo cual se podría traducir en mejoras mayores en la práctica, debido a factores como las pérdidas de carga de la instalación, que irían a cargo del compresor, que consumiría por tanto más potencia, bajando el rendimiento de la instalación, y dejando por tanto a las células termoeléctricas mayor margen de mejora. En comparación al IHX, se ha visto que el sistema de subenfriamiento termoeléctrico aporta mejoras del COP similares, si bien ligeramente inferiores que este primer sistema en el caso de estudio de este trabajo, que ha incluido un total de 20 células termoeléctricas, pero en contrapartida, el sistema de subenfriamiento termoeléctrico no aumenta las temperaturas de compresión, por lo que contribuye de forma positiva a la vida útil de la instalación. Además, al emplear este sistema, también se consigue reducir el caudal de refrigerante de la instalación, algo que puede afectar positivamente a las pérdidas de carga de la instalación, y además hace los equipos más ecológicos por la reducción de las emisiones directas debidas a fugas de fluido refrigerante.

Dicho esto, queda concluir que las células termoeléctricas son dispositivos con un futuro prometedor debido a su potencial en generación de frío, o inversamente, de electricidad, de forma limpia, fiable y sencilla. Como dispositivos de subenfriamiento, no aportan excesiva complejidad al circuito de refrigeración por compresión de vapor, y frente a otros sistemas de subenfriamiento como el IHX, no tienen efectos colaterales como las mayores temperaturas de compresión que estos sistemas producen. Todo esto, está abriendo la puerta a nuevas líneas de investigación, con el fin de conseguir un mundo cada vez más limpio y eficiente.

## 1.13. Referencias

- [1] Koomey JG., 2008. Worldwide electricity used in data centers, Environmental Research Letters Retrieved April 14, 2015 from [http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/3/034008/pdf/1748-9326\\_3\\_3\\_034008.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/3/3/034008/pdf/1748-9326_3_3_034008.pdf)
- [2] Noel West, 2002. Robert Boyle (1627-1691) and the vacuum pump. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0042207X9290155P#!>
- [3] Roger Thévenot, 1979. A History of refrigeration throughout the world.
- [4] William Ramsay, J. MacLehose, 1904. Josep Black, M.D. A discourse.
- [5] Eugene S. Ferguson, Hagley Museum, 1980. Oliver Evans, Inventive Genius of the American Industrial Revolution.
- [6] Charles Frederick Partington, 2017 Rewrite. The British Cyclopedia of Biography: Containing the Lives of Distinguished Men of All Ages and Countries, with Portraits, Residences, Autographs, and Monuments, Vol.2 [https://books.google.es/books?id=A8V2AAAAMAAJ&dq=thomas+jordan+seebeck+biography+and+discoveries&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.es/books?id=A8V2AAAAMAAJ&dq=thomas+jordan+seebeck+biography+and+discoveries&hl=es&source=gbs_navlinks_s)
- [7] Francisco Javier Villasevil Marco, 2011. Desarrollo y caracterización de estructuras termoeléctricas con pellets constituidos por nuevos materiales y geometrías no estándar.
- [8] Leila MACOR 2019, "Florida air conditioning pioneer first dismissed as a crank" Based on data obtained at the gorrie institute.
- [9] Matthew Trainer, 2004. The patents of William Thomson (Lord Kelvin).
- [10] Davide Beretta, Neophytos Neophytou, James M. Hodges, Mercuri G. Kanatzidis, Dario Narducci, Marisol Martin-Gonzalez, Matt Beekman, Benjamin Balke, Giacomo Cerretti, Wolfgang Tremel, Alexandra Zevalkink, Anna I. Hofmann, Christian Müller, Bernhard Döring, Mariano Campoy-Quiles, Mario Caironia, 2018. Thermoelectrics: From history, a window to the future.
- [11] Global design database, 2020. A world-wide collection of industrial designs data; including WIPO Hague registrations and information from participating national offices.
- [12] Ashrae, 2020. History of Refrigeration timeline images. <https://www.ashrae.org/file%20library/about/mission%20and%20vision/ashrae%20and%20industry%20history/completetimeline.pdf>

- [13] Knud Zabrocki, Wolfgang Seifert, Eckard Mueller, 2012. Effective power factor and thermoelectric figure of merit.  
[https://www.researchgate.net/publication/225023205\\_Effective\\_Power\\_Factor\\_and\\_Thermoelectric\\_Figure\\_of\\_Merit](https://www.researchgate.net/publication/225023205_Effective_Power_Factor_and_Thermoelectric_Figure_of_Merit)
- [14] Frank T. Edelman, 2016. The life and legacy of Thomas Midgley Jr.  
[https://www.researchgate.net/publication/323422178\\_The\\_life\\_and\\_legacy\\_of\\_Thomas\\_Midgley\\_Jr](https://www.researchgate.net/publication/323422178_The_life_and_legacy_of_Thomas_Midgley_Jr)
- [15] James M. Calm, 2007. La próxima generación de refrigerantes.  
[http://jamesmcalm.com/pubs/Calm%20JM,%20The%20Next%20Generation%20of%20Refrigerants%20\(in%20Spanish\),%20ACR-Latinoamerica,%202008-2009.pdf](http://jamesmcalm.com/pubs/Calm%20JM,%20The%20Next%20Generation%20of%20Refrigerants%20(in%20Spanish),%20ACR-Latinoamerica,%202008-2009.pdf)
- [16] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2019. 6. La protección de la capa de ozono.  
[https://www.miteco.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-ambientales/4\\_6\\_tcm30-127331.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-ambientales/4_6_tcm30-127331.pdf)
- [17] UN Environment programme, 2020. The montreal protocol on substances that deplete the ozone layer.
- [18] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Gobierno de España. Compromisos de España y de la UE en el marco del Protocolo de Kioto.  
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx#cd-search>
- [19] Y.Lyu, A.R.M.Siddique, S.H.Majid, M.Biglarbegan, S.A.Gadsden, S.Mahmud, 2019. Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719300137#!>
- [20] Johannes Liebl, Stephan Neugebauer, Andreas Eder, Matthias Linde, Boris Mazar & Wolfgang Stütz, 2009. The thermoelectric generator from BMW is making use of waste heat.
- [21] Nesrine Jaziri, Ayda Boughamoura, Jens Müller, Brahim Mezghani, Fares Tounsi, Mohammed Ismail, 2019. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications.
- [22] Ludek Janak, Zdenek Ancik, Jan Vetiska, Zdenek Hadas, 2015. Thermoelectric Generator Based on MEMS Module as an Electric Power Backup in Aerospace Applications.

- [23] IIR, Refrigeration drives sustainable development [online]. Paris, France, 2007, 18p.+ IIR estimation (19/06/2019)
- [24] The Role of Refrigeration in the Global Economy, 29th Informatory Note on refrigerating technologies. IIF-IIR, COULOMB D., DUPONT J. L., PICHARD A. 2016
- [25] IIR, 5th Informatory Note on Refrigeration and Food “The Role of Refrigeration in Worldwide Nutrition”, June 2009, Retrieved May 20, 2015 from [http://www.iifiir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteFood\\_05\\_EN.pdf](http://www.iifiir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteFood_05_EN.pdf) + IIR estimations
- [26] United States Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Occupational Outlook Handbook, 2014-15 Edition, Heating, Air Conditioning, and Refrigeration Mechanics and Installers. Retrieved April 23, 2015 from <http://www.bls.gov/ooh/installation-maintenance-and-repair/heating-air-conditioning-and-refrigeration-mechanics-and-installers.htm>
- [27] D. Astrain, A. Merino, L. Catalán, P. Aranguren, M. Araiz, D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, 2019. Improvements in the cooling capacity and the COP of a transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration plant operating with a thermoelectric subcooling system.
- [28] Donald Fink, H.Wayne Beaty 1981. Manual práctico para ingenieros, Tomo 1.
- [29] Pedro Rodríguez, 2001. Semiconductores.
- [30] Jose Antonio E. García Álvarez, 2012. Qué son los semiconductores. [asifunciona.com](http://asifunciona.com)
- [31] Patricia Aranguren Garacochea, 2015. Estudio y optimización de los sistemas de intercambio de calor en generación termoeléctrica aplicada al aprovechamiento del calor residual.
- [32] Arturo P. Sandoval G., Enrique Espinosa J., Jorge L. Barahona A., 2013. Celdas Peltier: Una alternativa para sistemas de enfriamiento con base semiconductor.
- [33] D. M. Rowe, 2006. Thermoelectrics Handbook: macro to nano.
- [34] Ana Lucas Guerra, 2011. Refrigeración de vacunas mediante una máquina frigorífica por efecto Peltier.
- [35] Rocío Herranz Pindado, 2008. Climatización mediante células Peltier.
- [36] Patterson, G. - Sobral, M. Laboratorio 4 - Dpto. de Física - FCEyN - UBA, 2007. Efecto Peltier.

[37] Jose Javier Lorrio Romera, 2010. Modelización, validación y aplicación de un sistema de auto refrigeración termoeléctrica. Universidad pública de Navarra.

[38] Samson Shittu, Guiqiang Li, Xudong Zhao, Jinzhi Zhou, Xiaoli Ma, Yousef Golizadeh Akhlaghi, 2020. Experimental study and energy analysis of photovoltaic-thermoelectric with flat plate micro-channel heat pipe.

[39] Matic Može, Aljaž Nemanič, Primož Poredoš, 2020. Experimental and numerical heat transfer analysis of heat-pipe-based CPU coolers and performance optimization methodology.

[40] D. Sánchez, P. Aranguren, A. Casi, R. Cabello, D. Astrain, R. Llopis, 2019. Experimental enhancement of a CO<sub>2</sub> transcritical refrigerating plant including thermoelectric subcooling.



## **2. Anexos**



# Índice de los anexos

Anexo 1: Interpolaciones	100
A.1.1 Disipador de convección forzada Arctic 64 GT	102
A.1.2 Disipador heat pipe con lámina de grafito	104
A.1.3 Disipador heat pipe con pasta térmica	105
Anexo 2: Cálculos térmicos y termodinámicos de los circuitos de refrigeración por compresión de vapor	107
A.2.1 Circuito simple	108
A.2.2 Circuito con intercambiador intermedio (IHX)	110
A.2.3 Circuito con sistema termoeléctrico de subenfriamiento (TESC)	112
A.2.3.1 Cálculo de los puntos del ciclo termodinámico para el circuito con el TESC	112
A.2.3.2 Cálculo del salto de temperatura en el TESC	113
Anexo 3: Fichas técnicas	118
A.3.1 Ficha técnica célula Peltier	118
A.3.2 Ficha técnica Arctic 64 GT	120
A.3.3 Ficha técnica SCKTN-5000 Katana 5	121
A.3.4 Ficha técnica Alpine AM4 Passive	122
A.3.5 Ficha técnica Keysight Datalogger 34972A	123
A.3.6 Ficha técnica fuente alimentación PeakTech 6155	125
A.3.7 Ficha técnica multímetro con pinza amperimétrica PeakTech P4350	127
A.3.8 Ficha técnica aislamiento térmico flexible AF/Armaflex	129
A.3.9 Ficha técnica cola de contacto Armaflex	130
A.3.10 Ficha técnica pasta térmica RS pro 5W/m2K	131

## Anexo 1: Interpolaciones

En este apartado se muestra el procedimiento que se ha seguido para interpolar los datos obtenidos en los ensayos. Este paso es de suma importancia, ya que los valores que se obtienen sirven para caracterizar los conjuntos de disipación objeto de estudio.

Los datos obtenidos en los ensayos, son dispersiones de puntos con tres coordenadas, temperatura, tensión, y potencia. Por este motivo, la interpolación debe realizarse no en dos sino en tres dimensiones. Además, se ha observado que la tendencia de estos, en el caso de la temperatura de cara fría y del salto térmico, no es lineal, por lo que las interpolaciones se han realizado siguiendo un patrón polinómico definido por trozos, también llamado *Spline*. Las funciones *Spline*, se emplean ampliamente para realizar interpolaciones por ser válidas para trabajar tanto en una, como en varias dimensiones, y tener un bajo coste computacional en comparación con otras funciones. El programa que se ha empleado para realizar este procedimiento es el programa libre GNU Octave, que dispone de la función *interp()*, que permite interpolar matrices de datos. Como se está trabajando en tres dimensiones, a esta función se le deben introducir como parámetros, los datos de los ensayos, en tres matrices diferentes una para cada mapa de coordenadas. También hay que pasar como parámetros dos matrices adicionales que se deben crear, con datos dentro del rango de los ensayos, para que Octave interpole la tercera matriz. De esta manera, por ejemplo, para el cálculo de la potencia disipada a partir de la tensión y la temperatura de la cara fría, se deben introducir las 3 matrices obtenidas a partir de los datos obtenidos en los ensayos, de tensión, potencia disipada y temperatura de cara fría, y dos matrices que tengan datos de tensión y potencia de puntos cuya temperatura de cara fría se desee calcular. Con estos datos, se aplica la función *interp()*, añadiendo '*Spline*' en el campo correspondiente como parámetro, y se obtiene la matriz con los valores de temperatura de cara fría.

En cuanto a las matrices de los datos de los ensayos, se han creado con dos bucles for anidados, de manera que el bucle interno va recorriendo las columnas de una matriz de ceros previamente creada, y dispone de un condicional para cada tensión de alimentación, para que según la tensión de alimentación, se aplique una de las funciones que se han ajustado a partir de los datos. Estas funciones son rectas que se pueden observar en las figuras del apartado 1.9. El bucle externo por otro lado, va recorriendo las matrices fila a fila. A continuación, se muestra un fragmento de código que permite crear las matrices de datos de tensión de alimentación, temperatura de cara fría y potencia disipada a partir de los datos de los ensayos.

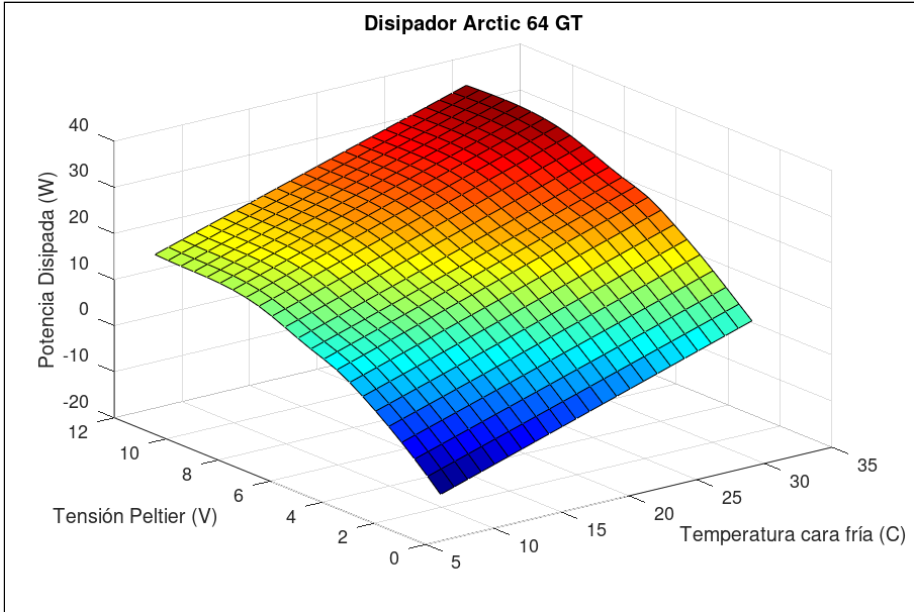
```

3 %ARCTIC 64 GT
4
5 %Creamos vectores con los datos de los experimentos
6 %De los experimentos se ha obtenido una dispersión de puntos en 3D
7 xldata=7:30; %Temperatura cara fría
8 yldata= [1 2 3 4 5 6 8 10 12]; %Tensión alimentación peltier
9
10 %Matrices de datos de tensión y temperatura
11 [Yldata,Xldata]=meshgrid(yldata,xldata);
12
13 Zldata=zeros(size(Xldata));
14
15 for i=1:rows(Xldata)
16     for j=1:columns(Xldata)
17         if (Yldata(i,j)==1)
18             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)-22.5)/1.07;
19         elseif (Yldata(i,j)==2)
20             Zldata(i,j)=(Xldata(i,j)-16.9)/1.09;
21         elseif (Yldata(i,j)==3)
22             Zldata(i,j)=(Xldata(i,j)-11.7)/1.09;
23         elseif (Yldata(i,j)==4)
24             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)-7.08)/1.09;
25         elseif (Yldata(i,j)==5)
26             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)-3.34)/1.08;
27         elseif (Yldata(i,j)==6)
28             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)-0.861)/1.09;
29         elseif (Yldata(i,j)==8)
30             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)+4.38)/1.1;
31         elseif (Yldata(i,j)==10)
32             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)+6.12)/1.09;
33         elseif (Yldata(i,j)==12)
34             Zldata(i,j)= (Xldata(i,j)+6.91)/1.12;
35     else printf ("Error, datos de ensayo incorrectos")
36     endif
37     j=j+1;
38 endfor
39 i=i+1;
40 endfor

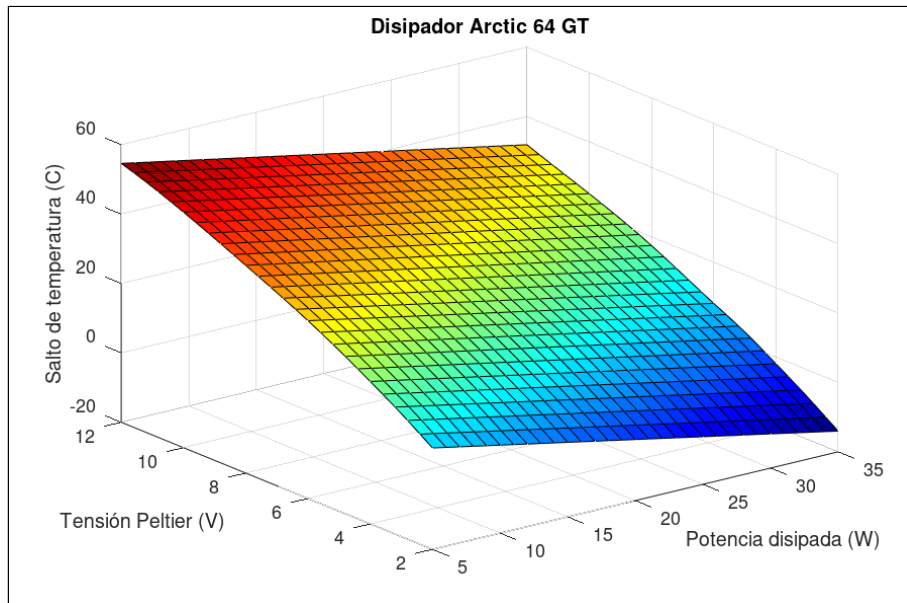
```

En los siguientes apartados de este anexo, se muestran los mapas de valores obtenidos por interpolación de los diferentes parámetros (Temperatura de cara fría, salto de temperatura y corriente consumida), a partir de la tensión de alimentación de la célula y la potencia disipada, para cada uno de los sistemas de disipación.

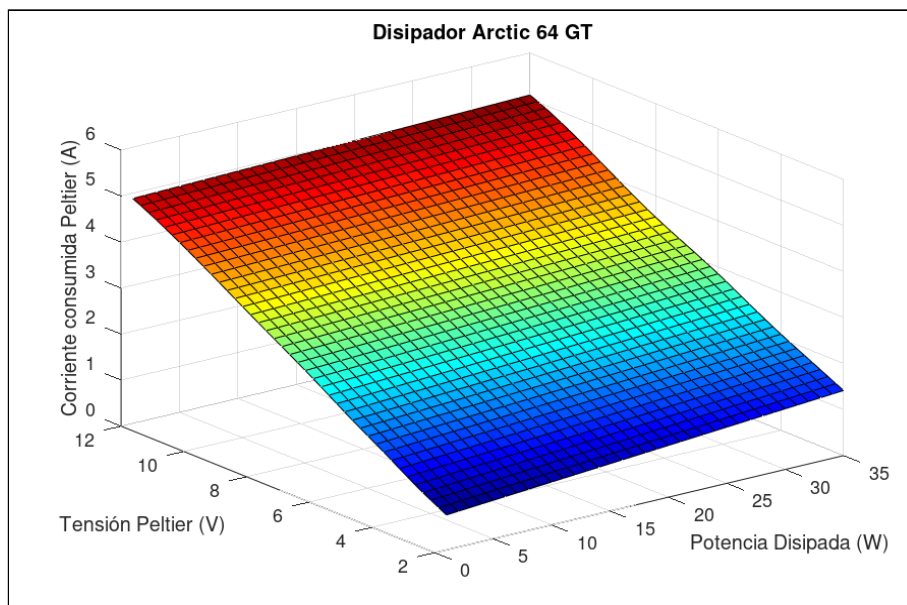
### A.1.1 Disipador de convección forzada Arctic 64 GT



**Figura A.1.1-1:** Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador convección forzada Arctic 64 GT.



**Figura A.1.1-2:** Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador convección forzada Arctic 64 GT.



**Figura A.1.1-3:** Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador convección forzada Arctic 64 GT.

## A.1.2 Disipador heat pipe con lámina de grafito

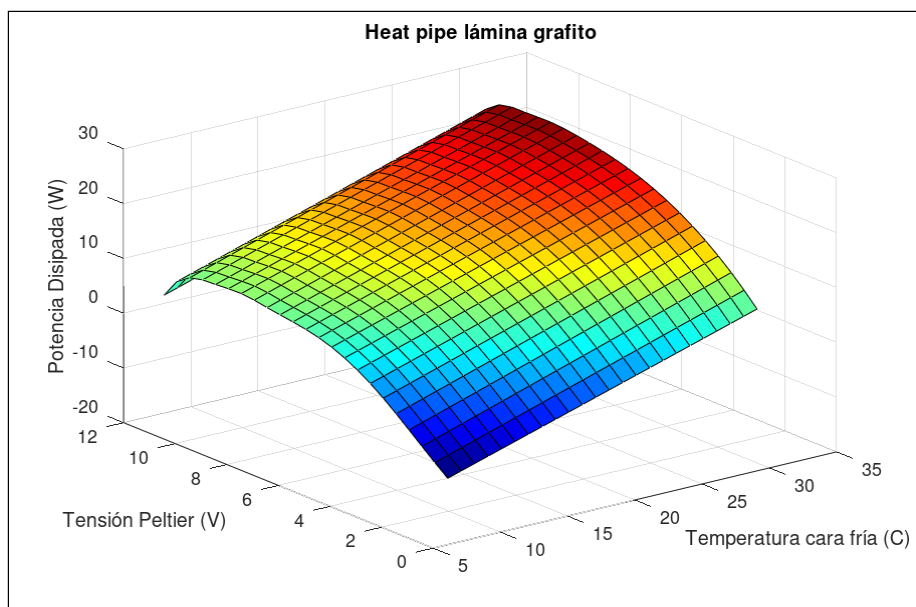


Figura A.1.2-1: Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador katana 5, grafito.

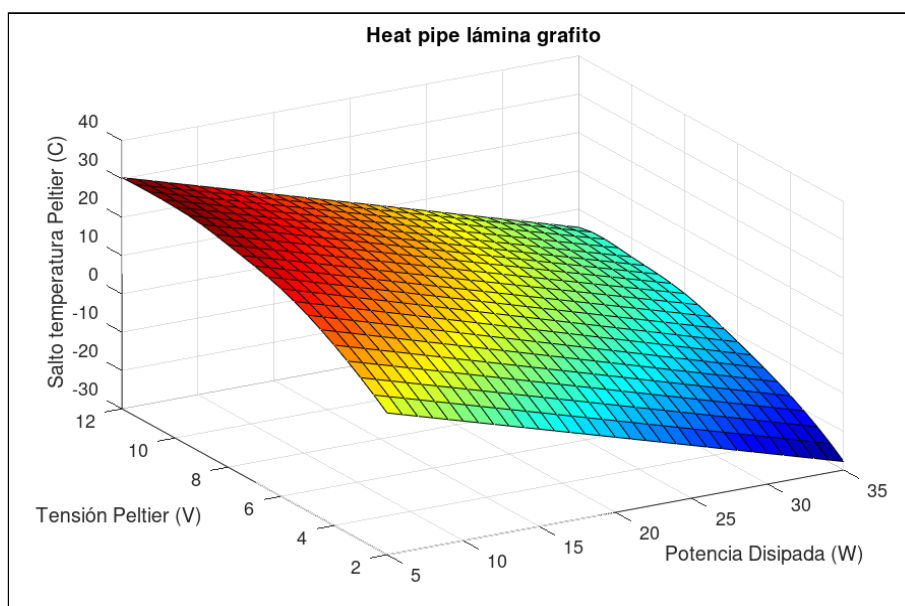


Figura A.1.2-2: Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador katana 5, grafito.



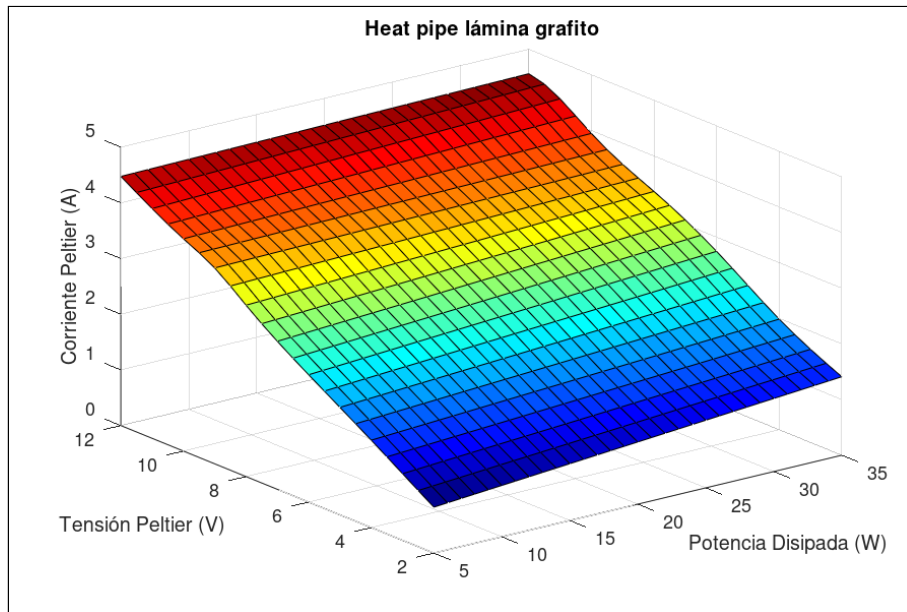


Figura A.1.2-3: Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador katana 5, grafito.

### A.1.3 Disipador heat pipe con pasta térmica

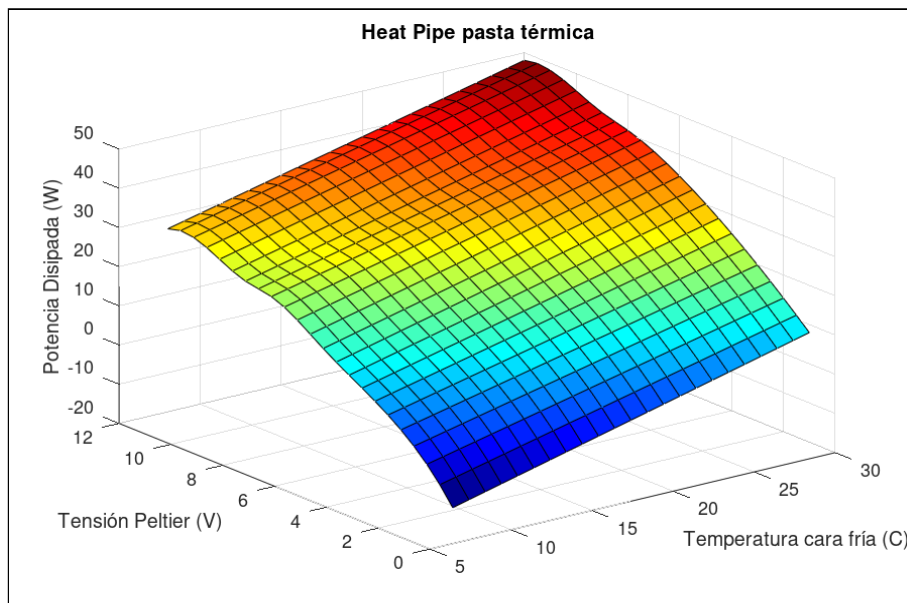
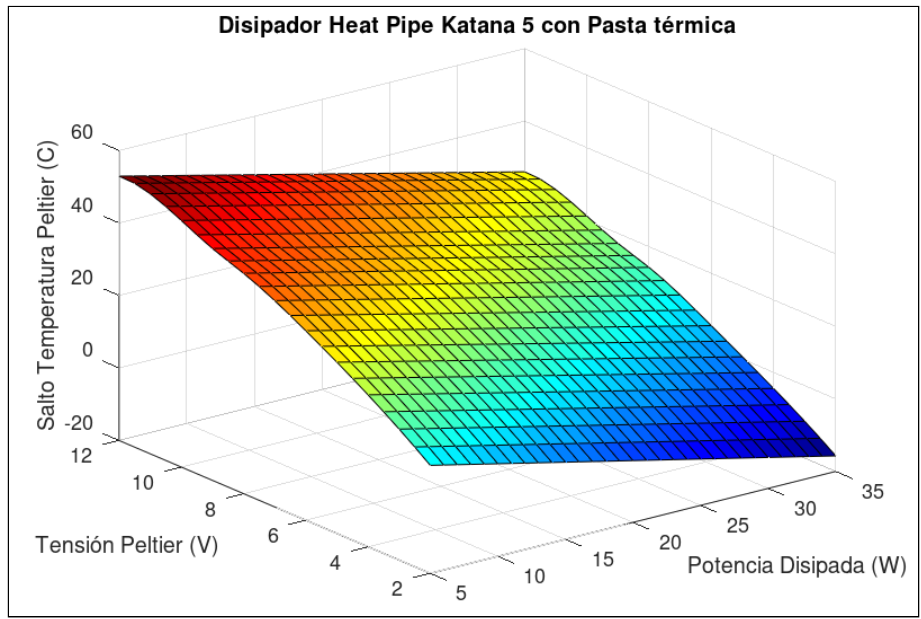
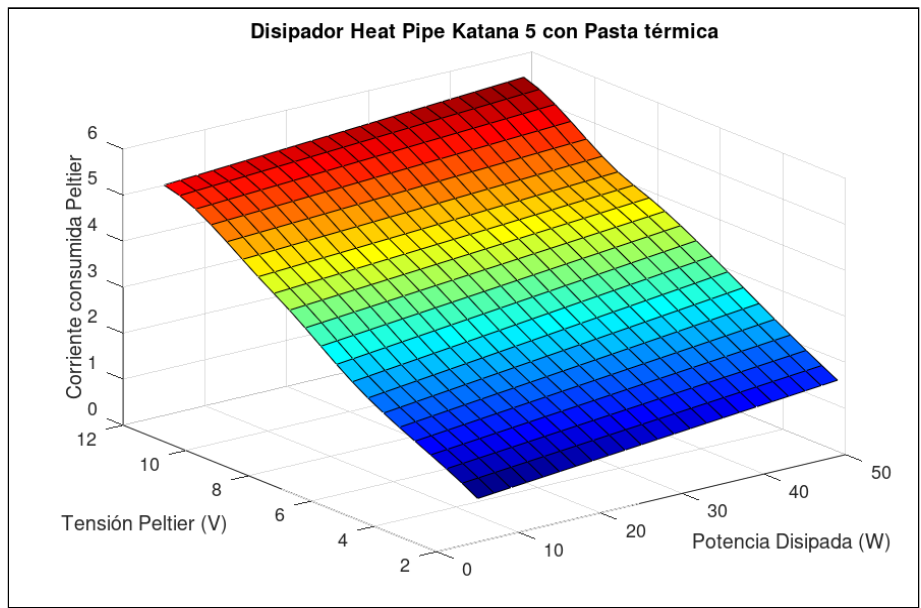


Figura A.1.3-1: Mapa de valores interpolados de potencia disipada, disipador katana 5, pasta térmica.



**Figura A.1.3-2:** Mapa de valores interpolados del salto de temperatura entre caras, disipador katana 5, pasta térmica.



**Figura A.1.3-3:** Mapa de valores interpolados de consumo de corriente, disipador katana 5, pasta térmica.

## Anexo 2: Cálculos térmicos y termodinámicos de los circuitos de refrigeración por compresión de vapor

En este anexo se detallan los cálculos realizados para el estudio teórico acerca de la viabilidad de las células termoeléctricas como dispositivos de subenfriamiento en equipos de refrigeración por compresión de vapor. Como ya se ha expuesto en la memoria, se han estudiado tres circuitos, un circuito simple, un circuito simple al que se ha añadido un intercambiador intermedio de subenfriamiento-recalentamiento, y un tercer circuito, que también se basa en un circuito simple, pero integra el sistema de subenfriamiento termoeléctrico. Para todos los circuitos, se han realizado los cálculos termodinámicos que permiten averiguar las condiciones de los puntos principales, para así calcular las potencias y los trabajos de los diferentes elementos, pero además, para el circuito con el TESC, se ha tenido que calcular la transferencia de calor entre el fluido refrigerante y la superficie interna de este dispositivo.

Para llevar a cabo el estudio, como se ha comentado en la memoria, se ha partido de un ciclo de refrigeración con R32, que opera entre dos focos, un foco frío entorno a  $-20^{\circ}\text{C}$ , y un foco caliente en torno a  $29^{\circ}\text{C}$ , una temperatura muy similar a la temperatura ambiente de los ensayos de la célula Peltier. Por esto, se ha tomado una temperatura de condensación de  $45^{\circ}\text{C}$ , y una temperatura de evaporación de  $-25^{\circ}\text{C}$ . Ambas temperaturas son iguales para todos los circuitos, ya que de lo contrario, la comparativa no sería válida. Como las temperaturas de condensación y evaporación son las mismas en todos los circuitos, también lo serán las presiones de condensación y evaporación.

El caudal másico de refrigerante que circula por la instalación se ha supuesto en  $0.025\text{ Kg/s}$ , ya que es un caudal másico próximo al que circula por congeladores industriales de una potencia frigorífica del orden de varios kilovatios. Se ha supuesto un refrigerador de este tamaño para que así, el impacto en el ahorro eléctrico sea considerable. De esta manera, la idea es que todos los circuitos tengan la misma potencia frigorífica, para que así la comparación sea equilibrada, por lo que en los circuitos con IHX y TESC, se espera una bajada del caudal másico refrigerante, ya que parte de la potencia frigorífica, viene de la mano de estos dispositivos accesorios, por lo que no hace falta tanto caudal para la misma potencia frigorífica.

Para ajustarse a condiciones más reales, se ha considerado que los compresores de la instalación no son ideales isentrópicamente, sino que tienen un rendimiento isentrópico que viene definido por la ecuación (A1), y un rendimiento mecánico-eléctrico de 0.7.

$$\eta_{is} = 1 - 0.055 \cdot t_c \quad (\text{A1})$$

$$t_c = \frac{P_{desc}}{P_{asp}} \quad (\text{A2})$$

Donde:

$\eta_{is}$  es el rendimiento isentrópico del compresor.

$t_c$  es la tasa de compresión del compresor.

$P_{desc}$  es la presión de descarga del compresor.

$P_{asp}$  es la presión de aspiración del compresor.

### A.2.1 Circuito simple

Para calcular el circuito simple, partiendo de las temperaturas de condensación ( $T_k$ ) y evaporación ( $T_0$ ), se han calculado las respectivas presiones ( $P_k$  y  $P_0$ ), teniendo en cuenta que dentro de la campana de saturación del fluido refrigerante, el título de vapor (Fracción de vapor que tiene el fluido) está entre 0 y 1, por lo que empleando la función *pressure* de EES, y entrando como parámetros el fluido (R32), la temperatura ( $T_k$  o  $T_0$ ), y el título de vapor (por ejemplo 0.5), se han calculado tanto  $P_k$  como  $P_0$ . De esta manera, la presión de los puntos 2 y 3, es igual a  $P_k$ , ya que entre estos no hay ningún elemento que cambie la presión, y la presión de los puntos 1 y 4, es igual a  $P_0$ , ya que ambos están a la presión de evaporación. Con esta información, puede calcularse el punto 1, ya que se sabe que está en estado de vapor saturado, por lo que su título de vapor es 1. También puede calcularse el punto 3, cuyo título de vapor es cero por encontrarse en condiciones de líquido saturado.

El punto 4 queda dentro de la campana de saturación, a la presión de evaporación, y se sabe que su entalpía es igual a la del punto 3, ya que la expansión que tiene lugar en la válvula es isoentálpica.

Falta calcular el punto 2, para esto se emplea un punto adicional llamado 2s, que corresponde a la descarga ideal del compresor, un punto con la misma entropía que 1, y que se encuentra a  $P_k$ . Como se conocen la presión y la entropía del punto 2s, se puede calcular la entalpía de este punto empleando la función *enthalpy* de EES. Una vez se conoce el punto 2s, sustituyendo la expresión (A1) en la definición del rendimiento isentrópico, expresión (A3), puede despejarse la entalpía del punto 2 ( $h_2$ ), por lo que ya se conocen los estados termodinámicos de todos los puntos del circuito.

$$\eta_{is} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (A3)$$

Donde:

$h_i$  es la entalpía del punto i.

Por último, queda calcular las potencias caloríficas cedidas a cada foco, el trabajo de compresión y el COP. La potencia absorbida del foco frío viene determinada por la expresión (A4), la cedida al foco caliente por la expresión (A5), el trabajo de compresión por la expresión (A6), y el COP por la expresión (A7).

$$Q'_{cold} = Q'_0 = m'_{ref} \cdot (h_1 - h_4) \quad (A4)$$

$$Q'_{hot} = Q'_k = m'_{ref} \cdot (h_2 - h_3) \quad (A5)$$

$$W'_{c(E)} = m'_{ref} \cdot (h_2 - h_1) \cdot \frac{1}{\eta_{me}} \quad (A6)$$

$$COP = \frac{Q'_0}{W'_{c(E)}} \quad (A7)$$

Donde:

$m'_{ref}$  es el caudal másico de refrigerante.

$Q'_0$  es el calor absorbido por el evaporador.

$Q'_k$  es el calor cedido por el condensador.

$\eta_{me}$  es el rendimiento mecánico-eléctrico del compresor.

$W'_{c(E)}$  es la potencia eléctrica consumida por el compresor.

En la Figura A.2-1, se muestra el ciclo termodinámico del circuito simple, en el diagrama de presión-entalpía del fluido refrigerante con el que se ha realizado el estudio.

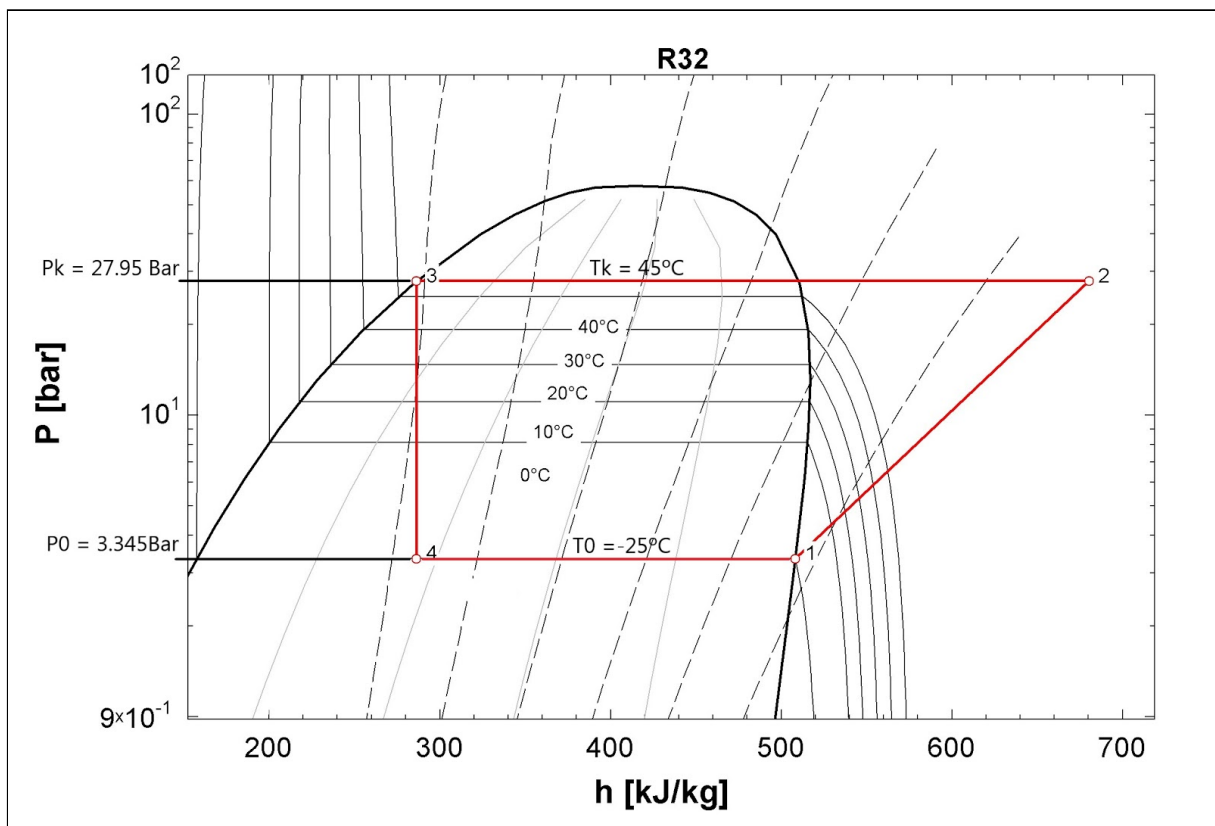


Figura A.2-1: Circuito simple, ciclo termodinámico.

## A.2.2 Circuito con intercambiador intermedio (IHX)

El circuito con IHX se calcula de forma similar al primer circuito. Los puntos 2, 3 y 4 están a la presión de condensación  $P_k$ , y los puntos 1, 5 y 6 están a la presión de evaporación  $P_0$ . Los puntos 6 y 3 pueden calcularse de forma directa, ya que se conoce su presión, su temperatura y su título de vapor. El título de vapor del punto 6 es la unidad, y el del punto 3 es cero. Con estos datos y la eficiencia del intercambiador, que se ha supuesto en 0.25, ya que como se ha comentado en apartados anteriores, estos intercambiadores suelen tener eficiencias bajas, puede calcularse el punto 4, despejando de la expresión (A8) (Eficiencia del intercambiador).

$$\varepsilon_{IHX} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_6} \quad (A8)$$

Donde:

$T_i$  es la temperatura del punto  $i$ .

El punto 5 tiene la misma entalpía que 4 por tratarse de una expansión isoentálpica, por lo que con  $P_0$  y  $h_4$  se calcula el punto 5.

Llegados a este punto, quedan por calcular el punto 1 y el punto 2. El punto 1 se corresponde con una de las salidas del IHX, por lo que se ha calentado debido a la transferencia térmica del fluido que pasa de 3 a 4. El calor transferido viene determinado por la expresión (A9).

$$Q' = m'_{refX} \cdot (h_3 - h_4) = m'_{refX} \cdot (h_1 - h_6) \quad (A9)$$

Donde:

$Q'$  es el calor transferido entre la corriente de fluido que pasa por el intercambiador de 3 a 4 y la corriente que pasa de 6 a 1.

$m'_{refX}$  es el caudal másico de refrigerante del circuito con IHX.

La entalpía es el producto del calor específico y la temperatura. En estos casos, el calor específico suele considerarse constante, por lo que tanto este como el caudal de refrigerante se simplifican de la expresión (A9), quedando la expresión (A10).

$$T_3 - T_4 = T_1 - T_6 \quad (A10)$$

De la expresión (A10) se obtiene la temperatura del punto 1. Con la temperatura y la presión, que ya se conoce y es igual a la presión de evaporación, puede calcularse la entalpía de este punto. Debe aclararse que la simplificación que se ha realizado de suponer un calor específico constante no aporta error apreciable para el cálculo del COP, ya que en cualquier caso modificaría el calor cedido por el condensador al ambiente, pero no afecta al calor absorbido por el evaporador, y afecta mínimamente al



### **A.2.3 Circuito con sistema termoeléctrico de subenfriamiento (TESC)**

El circuito con el sistema termoeléctrico de subenfriamiento, parte de un circuito simple al que se le añade el TESC, por lo que dispone de un punto adicional respecto a dicho circuito. El cálculo de los estados termodinámicos de los diferentes puntos se realiza igual que en el primer caso, la complejidad de este circuito radica en el cálculo de la transferencia térmica entre la superficie del TESC y el fluido.

#### **A.2.3.1 Cálculo de los puntos del ciclo termodinámico para el circuito con el TESC**

Las presiones de condensación y evaporación son las mismas que en los casos anteriores ya que las temperaturas de condensación y evaporación también lo son. De esta manera, los puntos 2, 3 y 4 están a la presión de condensación, y los puntos 1 y 5 a la de evaporación. El punto 1 puede calcularse de forma directa, ya que se sabe que está en estado de vapor saturado, por lo que su título de vapor es 1. También puede calcularse el punto 3, cuyo título de vapor es cero por encontrarse en condiciones de líquido saturado. Para calcular el punto 2, igual que en el primer caso, se emplea un punto adicional llamado 2s, que corresponde a la descarga ideal del compresor, un punto con la misma entropía que 1, y que se encuentra a  $P_k$ . Como se conocen la presión y la entropía del punto 2s, se puede calcular la entalpía de este punto. Una vez se conoce el punto 2s, sustituyendo la expresión (A1) en la definición del rendimiento isentrópico, expresión (A3), puede despejarse la entalpía del punto 2 ( $h_2$ ). El cálculo del punto 4, una vez se ha establecido el salto térmico en el TESC (cálculo detallado en el siguiente apartado), es sencillo, ya que se tiene la presión, y la temperatura se calcula como la temperatura del punto 3 menos el salto térmico del TESC. Una vez calculado el punto 4, el punto 5 queda dentro de la campana de saturación, a la presión de evaporación, y se sabe que su entalpía es igual a la de 4, ya que la expansión que tiene lugar en la válvula es isoentálpica. Con la presión y la entalpía, se dispone la información necesaria para calcular el punto 5.

En la Figura A.2-3, se muestra el ciclo termodinámico del circuito con TESC, en el diagrama de presión-entalpía del fluido refrigerante con el que se ha realizado el estudio.



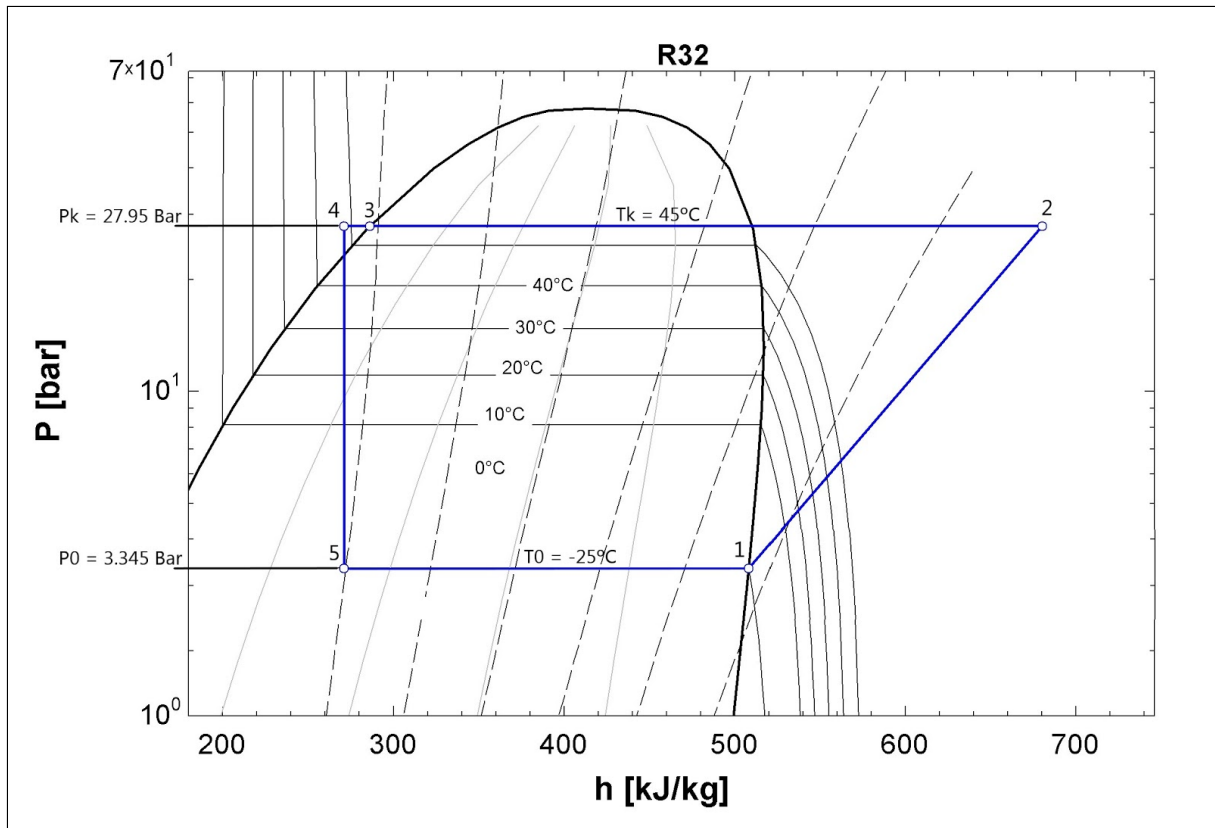


Figura A.2-3: Circuito con TESC, ciclo termodinámico.

### A.2.3.2 Cálculo del salto de temperatura en el TESC

El TESC, es un dispositivo que como ya se ha descrito anteriormente, dispone de varias unidades dispuestas en serie, montadas sobre un conducto de cobre de sección cuadrada. Cada unidad, está formada por dos células Peltier con sus correspondientes disipadores, tal y como se puede ver en la Figura 1.10-1. Para poder emplear este sistema, es necesario saber la temperatura superficial interior del conducto de cobre, y la potencia que disipa cada módulo termoelectrónico, lo que permite calcular las condiciones de alimentación de cada uno de estos.

Dado que el objetivo de este estudio, es determinar si el TESC es viable en equipos de refrigeración por compresión de vapor, se han ido añadiendo unidades de subenfriamiento una a una hasta poder ver una tendencia clara del efecto de estas en el COP. Para la primera unidad que se ha añadido, se ha intentado producir el máximo enfriamiento posible, es decir, teniendo la temperatura de entrada, que es la temperatura del punto 3, se ha establecido una temperatura de salida, es decir, la temperatura del punto 4, y se ha calculado la temperatura superficial interna del conducto de cobre, que es igual a la temperatura de la cara fría de las células Peltier de esta unidad, por la forma en la que se han realizado los ensayos (Midiendo la temperatura de la cara fría dentro del bloque de cobre), ya que para abordar este cálculo en el que la transferencia de calor se da por convección forzada interna, se ha seguido la hipótesis de la temperatura superficial constante. También se ha calculado la potencia que disipa cada

célula Peltier de la unidad del TESC, a partir de la expresión (A13). Para poder aplicar esta expresión, debe calcularse primero el caudal másico de refrigerante que circula por la instalación. El caudal se obtiene igualando las expresiones (A12) y (A4).

$$Q'_0 = m'_{refX} \cdot (h_1 - h_5) \quad (A12)$$

$$Q'_{Pelt} = \frac{1}{2} \cdot Q'_{1SC} \quad (A13)$$

$$Q'_{1SC} = m'_{refT} \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (A14)$$

Donde:

$Q'_{Pelt}$  es la potencia que disipa una célula Peltier de la unidad de subenfriamiento.

$Q'_{1SC}$  es la potencia que disipa una unidad de subenfriamiento del TESC.

$h_{in}$  es la entalpía a la entrada de la unidad del TESC.

$h_{out}$  es la entalpía a la salida de la unidad del TESC.

$m'_{refT}$  es el caudal másico de refrigerante del circuito con TESC.

En este caso en el que solo hay una unidad de subenfriamiento, la entalpía de entrada es igual a la del punto 3 y la de la salida es igual a la del punto 4.

Como la transferencia térmica tiene lugar por convección, la potencia térmica transferida viene dada por la ecuación (A15).

$$Q_{Conv}' = h_c \cdot A_s \cdot \Delta T_{lm} \quad (A15)$$

$$A_s = 2 \cdot a \cdot L + 2 \cdot b \cdot L \quad (A16)$$

$$\Delta T_{lm} = - \frac{(T_s - T_{out}) - (T_s - T_{in})}{Ln\left(\frac{T_s - T_{out}}{T_s - T_{in}}\right)} \quad (A17)$$

Donde:

$h_c$  es el coeficiente de convección o película.

$A_s$  es el área de la superficie interna de la unidad del TESC, coincide con el área interior del conducto de cobre entre las dos células Peltier.

$L$  es la longitud del conducto entre las células de la unidad de subenfriamiento.

$a$  es el ancho de la sección cuadrada del conducto de cobre.

$b$  es el alto de la sección cuadrada del conducto de cobre.

$\Delta T_{lm}$  es el salto de temperatura logarítmico medio entre la superficie de la célula y el fluido refrigerante.

$T_s$  es la temperatura superficial del conducto del subenfriador.

$T_{in}$  es la temperatura de entrada al subenfriador.

$T_{out}$  es la temperatura de salida del subenfriador.

Llegados a este punto, antes de proceder al cálculo de la temperatura superficial del conducto del subenfriador, falta calcular el coeficiente de convección  $h_c$ . Para calcular este parámetro, hay que calcular primero el número de Nusselt, a partir de una correlación válida en función del número de Reynolds y el número de Prandtl, y ya con el número de Nusselt, despejar este coeficiente de la ecuación (A18).

El primer paso por tanto, es calcular el número de Reynolds, que viene definido por la expresión (A19), y el número de Prandtl, que viene definido por la expresión (A20).

$$Nu = \frac{h_c \cdot Dh}{k} \quad (A18)$$

$$Re = \frac{v_{ref} \cdot Dh}{\nu} \quad (A19)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (A20)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot A_t}{P} \quad (A21)$$

$$v_{ref} = \frac{q_{vol}}{A_t} \quad (A22)$$

$$q_{vol} = m'_{refT} \cdot v \quad (A23)$$

$$A_t = a \cdot b \quad (A24)$$

Donde:

$Nu$  es el número de Nusselt.

$D_h$  es el diámetro equivalente (o hidráulico) de la sección del conducto, por ser esta de forma cuadrada.

$k$  es la conductividad del fluido refrigerante.

$Re$  es el número de Reynolds.

$v_{ref}$  es la velocidad del fluido refrigerante.

$\nu$  es la viscosidad cinemática.

$Pr$  es el número de Prandtl.

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

$C_p$  es el calor específico del fluido refrigerante.

$A_t$  es el área transversal del conducto de cobre de la unidad de subenfriamiento.

$P$  es el perímetro de la sección transversal del conducto de cobre de la unidad de subenfriamiento.

$q_{vol}$  es el caudal volumétrico que circula por el TESC.

$v$  es el volumen específico del fluido refrigerante.

Todos los parámetros termofísicos como la viscosidad cinemática, la viscosidad dinámica y la conductividad, se han evaluado a la temperatura media entre la entrada y la salida de la unidad de subenfriamiento empleando funciones propias del programa EES. También se han calculado de esta manera el volumen específico y el calor específico.

Una vez calculados los números de Reynolds y Prandtl, que han resultado ser de 7746 y 1.861 respectivamente, hay que buscar una correlación válida que permita calcular el valor de Nusselt. Estos tres parámetros son adimensionales, por lo que no tienen unidades. Para estos valores de Re y Pr, la correlación más apropiada por la exactitud que aporta, es la correlación de Gniellinski (1976), que viene definida por la expresión (A25). Esta correlación, es válida para valores de Re entre 3000 y  $5 \cdot 10^6$ , y para valores de Pr entre 0.5 y 2000, y no tiene restricciones en cuanto a la relación longitud-diámetro como pasa con otras correlaciones como la de Dittus-Boelter.

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot (f/8)^{0.5} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot [1 + (D_h/L)^{2/3}] \quad (A25)$$

$$f = [0.79 \cdot \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (A26)$$

Una vez calculado el Nu con la expresión (A25), igualando las ecuaciones (A14) y (A15), se puede calcular la temperatura superficial del conducto del TESC. Dado que la temperatura superficial se encuentra dentro de una expresión (A17), que contiene un logaritmo neperiano, y dentro de este hay una fracción en la que  $T_s$  se encuentra tanto en el numerador como el denominador, no es posible despejar  $T_s$  directamente, sino que hay que proceder de forma iterativa.

Visto el procedimiento a seguir, según el salto térmico que se busque obtener en la unidad de subenfriamiento, se requerirá de mayor o menor potencia de alimentación para la célula Peltier, por lo que variará el rendimiento de esta, afectando al COP global. Se ha visto que a mayor salto térmico en el módulo de subenfriamiento, peor es el funcionamiento de las células, que empieza a aportar beneficios claros en el COP con saltos térmicos entre la entrada y la salida de entre 0.4 y 0.8°C. Para estas condiciones, la temperatura superficial del conducto de la unidad de subenfriamiento necesaria, es de entorno a 25°C, por lo que se ha buscado el punto de mayor COP a esta temperatura. El resultado es la Figura 1.11.5-1. Siguiendo este planteamiento, se ha decidido colocar 10 unidades (o módulos) de subenfriamiento en serie, de forma que en cada unidad de subenfriamiento se baje la temperatura del fluido en 0.7°C. En estas condiciones, cada célula Peltier disipa entorno a 17W, y debe mantener una temperatura de cara fría (medida según las condiciones del ensayo) de entre 28 y 23°C. 28°C para los módulos de subenfriamiento de la primera unidad de subenfriamiento, y 23°C para los módulos de la décima. Esto implica alimentar las células a entre 2.8 y 3.4V, tensiones de alimentación próximas a la tensión de máximo COP según la Figura 1.11.5-1.

En este caso, las potencias cedidas y absorbidas se calculan de forma similar al circuito simple, sin embargo, el cálculo del COP debe incluir el consumo eléctrico del TESC. El COP de este circuito viene definido por la expresión (A27).

$$COP = \frac{Q'_0}{W'_{c(E)} + n \cdot P_{vent} + \sum_{i=1}^{n/2} (2 \cdot V_i \cdot I_i)} \quad (A27)$$

Donde:

$n$  es el número de células termoeléctricas montadas en el TESC.

$P_{vent}$  es el consumo del ventilador de cada disipador.

$V_i$  es la tensión de alimentación de la célula  $i$ .

$I_i$  es la corriente de alimentación de la célula  $i$ .

Dado que se han montado 10 unidades de subenfriamiento, formadas cada una por 2 células Peltier tal y como se muestra en la Figura 1.10-1,  $n$  es igual a 20.

## Anexo 3: Fichas técnicas

En este anexo se muestran las fichas técnicas de los componentes principales del banco de ensayos.

### A.3.1 Ficha técnica célula Peltier



**marlow industries inc.®**

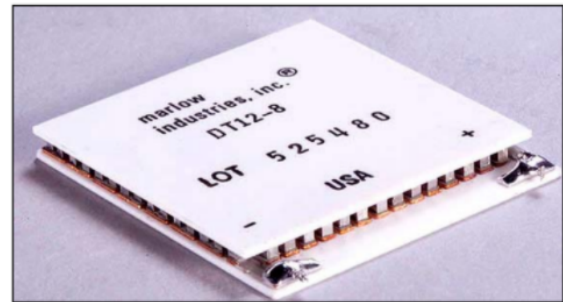
Subsidiary of II-VI INCORPORATED

#### Thermoelectric Cooler

DT12-8

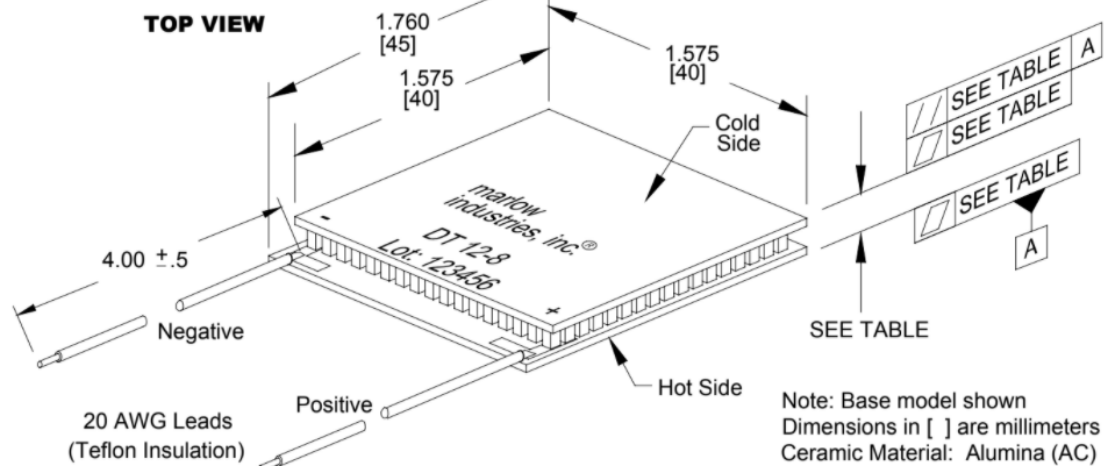
#### Performance Values

Hot Side Temperature (°C)	27°C	50°C
$\Delta T_{max}$ (°C-dry N <sub>2</sub> ):	66	74
Q <sub>max</sub> (watts):	71	78
I <sub>max</sub> (amps):	7.4	7.4
V <sub>max</sub> (vdc):	14.7	16.4
AC Resistance (ohms):	1.6	---



#### Mechanical Characteristics

	Height	Flatness	Parallelism
Lapped	.139 ± .001[0.03]	.001[0.03]	.002[0.05]
Unlapped	.143 ± .005[0.13]	.002[0.05]	.003[0.08]



#### Ordering Options

Model Number	Description
DT12-8-01	Base Model
DT12-8-01L	Lapped Model
DT12-8-01S	Sealed Model
DT12-8-01LS	Lapped and Sealed Model

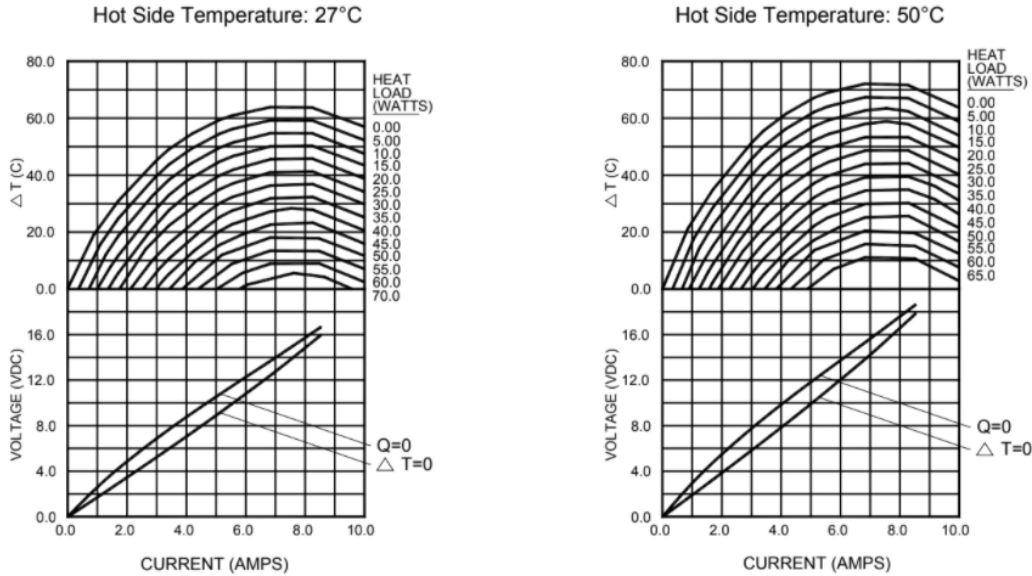
#### Features

- Solid state reliability
- Built with high temperature solder with the ability to withstand higher assembly processing temperatures for short periods of time (<160°C)
- Superior nickel diffusion barriers on elements
- High strength for rugged environment
- Porched configuration for improved leadwire strength
- RTV sealing option available to improve reliability in condensing environment
- Lapped option available for multiple module applications.

102-0152, Rev G

Performance Curves

Environment: One atmosphere dry nitrogen



For performance information in a vacuum or with hot side temperatures other than 27°C or 50°C, consult one of our Applications Engineers.

Installation

Consult Marlow Industries' Thermoelectric Installation Guide or reliability report for more details. For additional information, please contact one of our application engineers for technical support.

Operation Cautions

Maximum storage and operation +150°C.  
For maximum reliability, storage and operation below 85°C is recommended. Excessive power cycling and powering through thermostatic (on/off) control is not recommended.



**Marlow Industries, Inc.**  
10451 Vista Park Road  
Dallas Texas 75238-1645  
TEL: 214-340-4900  
FAX: 214-341-5212  
Internet: [www.marlow.com](http://www.marlow.com)

**Marlow Industries Europe**  
Aberdeen House, South Road  
Haywards Heath  
West Sussex RH164NG UK  
TEL: +44 (0)1444-443404  
FAX: +44 (0)1444-443334

**Marlow Industries Asia**  
1-1-8-401  
Uehara, Shibuya-ku  
Tokyo, Japan 151-0064  
TEL: +81 (3) 5454-5280  
FAX: +81 (3) 5454-5281

## A.3.2 Ficha técnica Arctic 64 GT

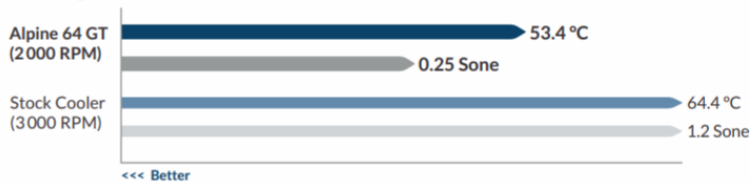
# Alpine 64 GT

## AMD® CPU Cooler for Progressive Users

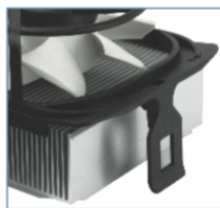
The **Alpine 64 GT** is quiet, efficient and cost-effective. It incorporates an 80 mm PWM fan, an optimised heatsink as well as pre-applied MX-2 for efficient heat transfer from the CPU. Together with the patented fan holder and low noise impeller, the **Alpine 64 GT** operates in extreme quiet even spinning at full speed.

Specifications	
Fan	80 mm, 500–2000 RPM (Controlled by PWM)
Bearing	Fluid Dynamic Bearing
Noise Level	0.25 Sone
Current/Voltage	0.16 A/12 V DC
Max. Cooling Capacity	70 Watts
Dimensions	100(L) x 84(W) x 64(H) mm
Net Weight	295 g
Socket Compatibility	AMD® AM4, AM3(+), AM2(+), FM2(+), FM1

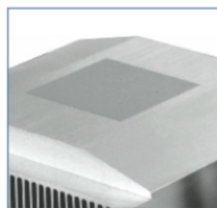
### Cooling Performance and Noise Level on AMD® Quad-Core™ A10-5700



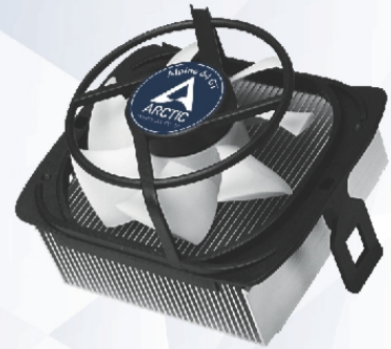
Virtually Silent Fan



Easy Installation



Pre-Applied MX-4





### A.3.3 Ficha técnica SCKTN-5000 Katana 5

**Overall Weight:**

560 g / 19.75 oz (including fan)

**Accessory:**

Metal Assembly Clip (Intel), Metal Assembly Clip (AMD), Thermal Grease, Installation Guide

**Material of Base Plate:**

Nickel-plated copper 38 x 38 mm ([more information](#))

**Fan Specifications****Dimensions of Fan:**

92 x 92 x 26 mm / 3.62 x 3.62 x 1.02 inch

**Noise Level:**

7.3 - 28.83 dBA

**Air Flow:**

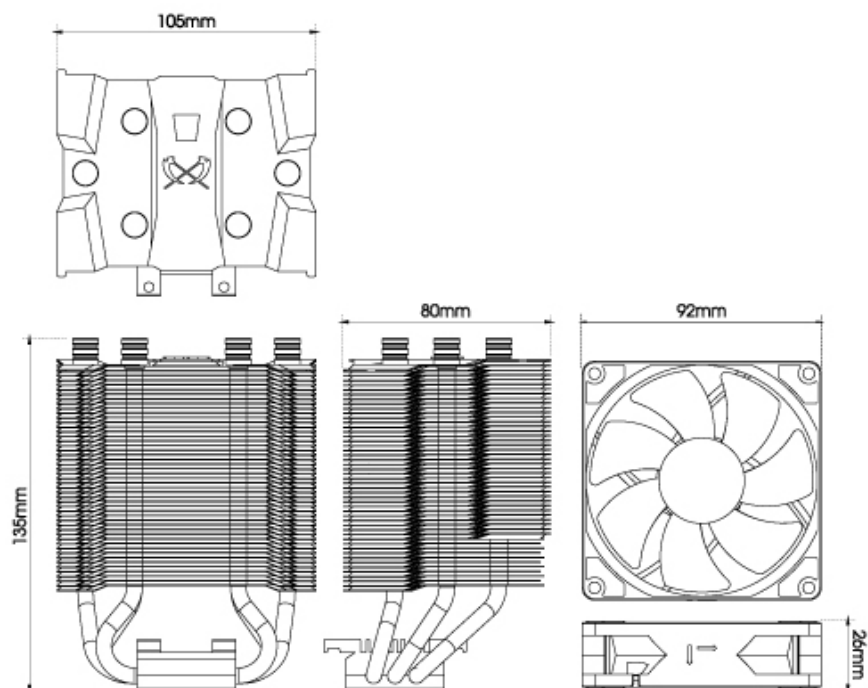
11.46 - 83.04 m<sup>3</sup>/h = 6.75 - 48.878 CFM

**Fan Speed:**

300 - 2,300 rpm (regulated via PWM)

**Static Pressure:**

7.35 ~ 22.46 Pa / 0.75 ~ 2.29 mmH<sub>2</sub>O



## A.3.4 Ficha técnica Alpine AM4 Passive

# Alpine AM4 Passive

## Silent CPU Cooler for AMD AM4

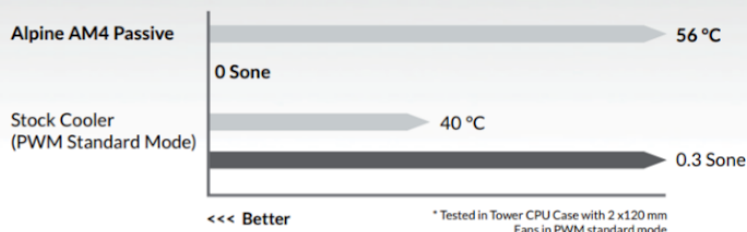
The ARCTIC Alpine AM4 Passive is a passive and thus completely silent cooling solution for the AMD® AM4 Platform.

The micro-porosity resulting from the heatsink surface treatment optimises the heat exchange between the aluminum and the surrounding air, thus the cooling performance in passive mode is greatly improved.

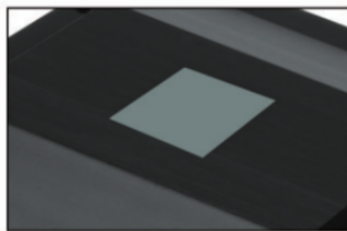
### Specifications

Material	Aluminium
Surface Finish	Black Anodising
Thermal Compound	MX-2 (pre-applied)
Maximum TDP	47 W
Dimensions	99 (L) X 99 (W) X 70 (H) mm
Noise Level	0 Sone
Weight	557 g
Compatibility	AMD® AM4

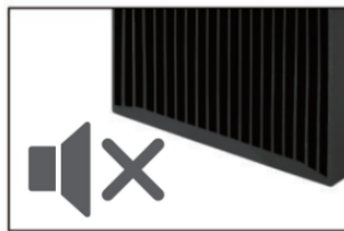
### Cooling Performance and Noise Level for AMD® APU A12 9800E (Full Load)\*



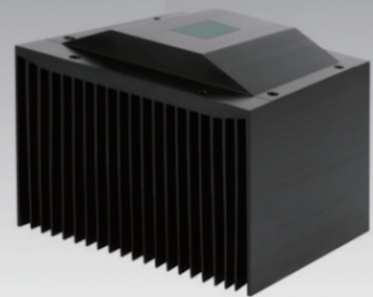
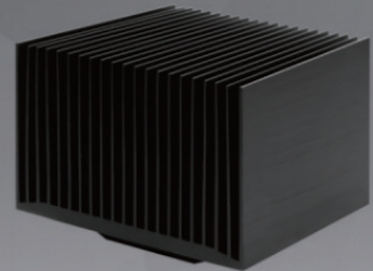
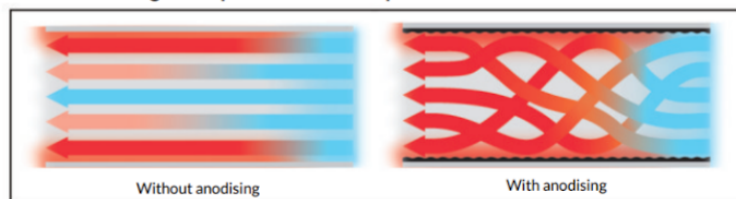
### Pre-applied MX-2 Thermal Paste



### For Absolute Silence



### Black Anodising for Improved Heat-dissipation



## A.3.5 Ficha técnica Keysight Datalogger 34972A

### Measurement characteristics<sup>7</sup>

<b>DC voltage</b>		
Measurement Method	Continuously Integrating Multi-slope III A-D converter	
A/D linearity	0.0002% of reading + 0.0001 % of range	
Input resistance	Selectable 10 MΩ or > 10,000 MΩ	
100 mV, 1 V, 10 V ranges	10 MΩ ± 1%	
100 V, 300 V ranges	< 30 pA at 25 °C	
Input bias current	300 V all ranges	
Input protection		
<b>True RMS AC voltage</b>		
Measurement method	AC coupled True RMS – measures the AC component of the input with up to 300 Vdc of bias on any range	
Crest factor	Maximum of 5:1 at Full Scale	
Additional crest factor errors (non-sinewave)	Crest Factor 1-2	0.05 % of reading
	Crest Factor 2-3	0.15 % of reading
	Crest Factor 3-4	0.30 % of reading
	Crest Factor 4-5	0.40 % of reading
Input impedance	1 MΩ ± 2% in parallel with 150 pF	
Input protection	300 Vrms all ranges	
<b>Resistance</b>		
Measurement method	Selectable 4-wire or 2-wire Ohms	
Offset compensation	Current source referenced to LO input	
Maximum lead resistance	Selectable on 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ ranges	
Input protection	10% of range per lead for 100 Ω and 1 kΩ ranges. 1 kΩ on all other ranges	
Input protection	300 V on all ranges	
<b>Frequency and period</b>		
Measurement method	Reciprocal counting technique	
Voltage ranges	Same as AC Voltage function	
Gate time	1 s, 100 ms, or 10 ms	
Measurement timeout	Selectable 3 Hz, 20 Hz, 200 Hz LF limit	
<b>DC current</b>		
Shunt resistance	5Ω for 10 mA, 100 mA; 0.1 Ω for 1 A	
Input protection	1 A 250 V fuse on 34901A module	
<b>True RMS AC current</b>		
Measurement method	Direct coupled to the fuse and shunt. AC coupled True RMS measurement (measures the ac component only)	
Shunt resistance	5 Ω for 10 mA; 0.1 Ω for 100 mA, 1 A	
Input protection	1 A 250 V fuse on 34901A module	
<b>Thermocouple</b>		
Conversion	ITS-90 software compensation	
Reference junction type	Internal, Fixed, or External	
Open thermocouple check	Selectable per channel. Open > 5 kΩ	
<b>Thermistor</b>		
	44004, 44007, 44006 series	
<b>RTD</b>		
	$\alpha = 0.00385$ (DIN) and $\alpha = 0.00391$	

### Measurement noise rejection 60 (50) Hz<sup>1</sup>

dc CMRR	140 dB
ac CMRR	70 dB
<b>Integration time</b>	
200 plc/3.33s (4s)	110 dB <sup>3</sup>
100 plc/1.67s (2s)	105 dB <sup>3</sup>
20 plc/333 ms (400 ms)	100 dB <sup>3</sup>
10 plc/167 ms (200 ms)	95 dB <sup>3</sup>
2 plc/33.3 ms (40 ms)	90 dB
1 plc/16.7 ms (20 ms)	60 dB
< 1 plc	0 dB

### Normal mode rejection<sup>2</sup>

### Operating characteristics<sup>4</sup>

Single channel measurement rates <sup>5</sup>		
Function	Resolution <sup>8</sup>	34970A/34972A readings/sec
dcV, 2-wire resistance	6½ digits (10 plc)	6 (5)
	5½ digits (1 plc)	54 (47)
	4½ digits (0.02 plc)	500
Thermocouple	0.1 °C (10 plc)	6 (5)
	0.1 °C (1 plc)	52 (47)
	(0.02 plc)	280
RTD, thermistor	0.01 °C (10 plc)	6 (5)
	0.1 °C (1 plc)	49 (47)
	1 °C (0.02 plc)	200
acV	6½ Slow (3 Hz)	0.14
	6½ Med (20 Hz)	1
	6½ Fast (200 Hz)	8
	6½ <sup>6</sup>	100
Frequency, period	6½ digits (1 s gate)	1
	5½ digits (100 ms)	9
	4½ digits (10 ms)	70

1. For 1 kΩ unbalance in LO lead.
2. For power line frequency ± 0.1%.
3. For power line frequency ± 1% use 80 dB or ± 3% use 60 dB.
4. Reading speeds for 60 Hz and (50 Hz) operation.
5. For fixed function and range, readings to memory, scaling and alarms off, AZERO OFF, USB datalogging OFF.
6. Maximum limit with de fault settling delays defeated.
7. Isolation voltage (ch-ch, ch-earth) 300 Vdc, ac rms.
8. 6½ digits = 22 bits, 5½ digits = 18 bits, 4½ digits = 15 bits.

## 34972A



USB

USB memory port to log/  
transfer data to a USB flash drive

Built-in LAN and USB for instant connection to a PC

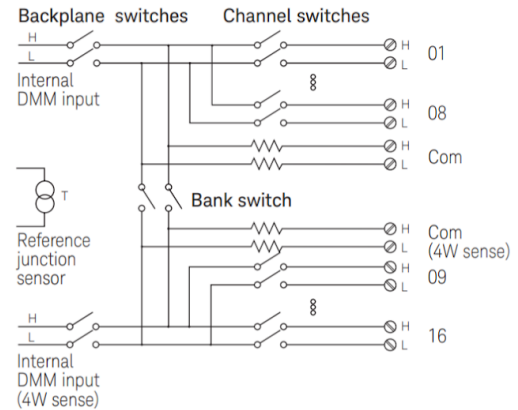
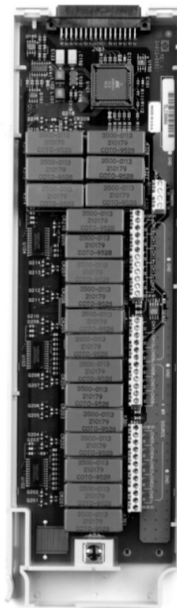
## 34902A

### 16-Channel High-Speed Multiplexer

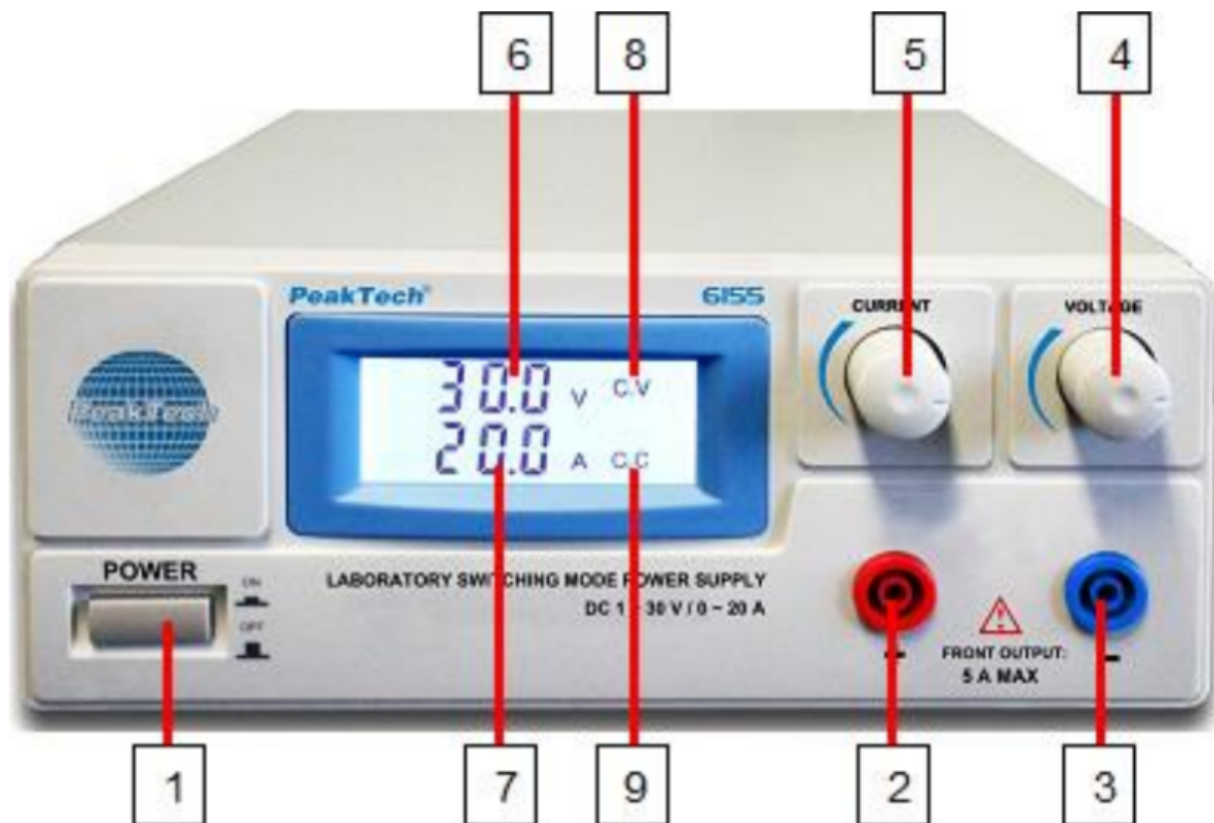
- Scanning up to 250 ch/s
- Two- and four-wire scanning
- Built-in thermocouple reference junction

The Keysight 34902A employs reed relays to achieve scan rates up to 250 channels per second. Use this module for high-throughput automated test applications as well as high-speed data logging and monitoring tasks.

Sixteen two-wire inputs switch up to 300 V. Two- and four-wire channels may be mixed on the same module. User provided shunt resistors are required for current measurements.



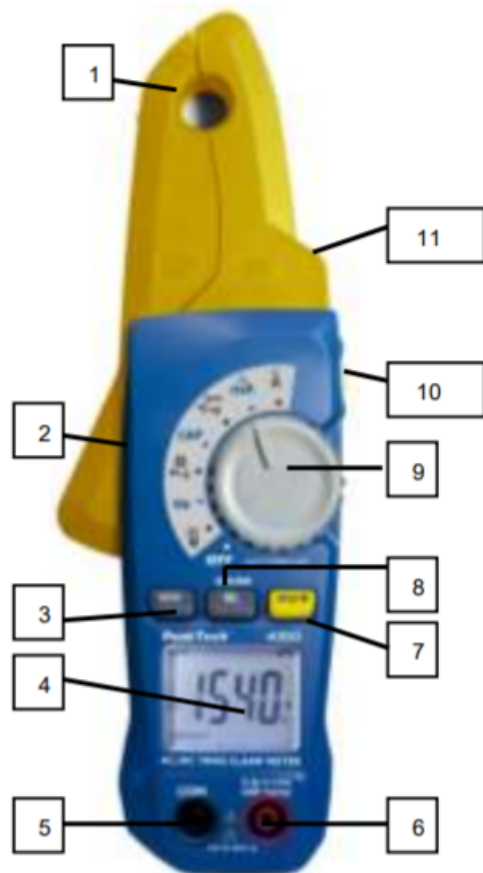
### A.3.6 Ficha técnica fuente alimentación PeakTech 6155



- (1) Interruptor de alimentación: "ON" / "OFF".
- (2) Salida positiva.
- (3) Salida negativa.
- (4) Perilla de regulación de tensión.
- (5) Perilla de regulación de corriente.
- (6) Indicación de tensión regulada.
- (7) Indicación de corriente regulada.
- (8) Modo de indicación de tensión constante.
- (9) Modo de indicación de corriente constante.

Output power	600 W
Output voltage	1 ~30 V DC
Output current	Binding posts at the rear side 0 ~ 20 A Output sockets at the frontplate 4 mm safety-sockets up to 5 A
Ripple & noise	50 mV pp, 5 mV rms
Load regulation	50 mV (10 - 100% load)
Line regulation	50 mV (+/- 10% variation)
Display	Voltage display: 3-digit: +/-0,2% + 3 dgt. Current display: 3-digit: +/-0,2% + 3 dgt.
Protection	Overload, overtemperature, short circuit protections by constant current circuitry and output overvoltage
Operating voltage	200 ~ 240 V AC; 50/60 Hz
Dimensions (WxHxD)	214 x 87 x 336 mm
Weight	2,9 kg
EAN-13	4250569403033

### A.3.7 Ficha técnica multímetro con pinza amperimétrica PeakTech P4350



1. Pinza de corriente.
2. Gatillo.
3. Tecla MODE.
4. Pantalla LCD.
5. Retroiluminación.
6. Conector de entrada V/ $\Omega$ /Hz/Temp.
7. Función HOLD/Retroiluminación.
8. Tecla MIN/MAX y función de medición relativa.
9. Selector.
10. Función iluminación del punto de medición.
11. Linterna para iluminación del punto de medición.

DCV	500 mV/5/50/500/600 V; 0,1 mV; +/- 1,5 % + 2 dgt.
ACV	500 mV/5/50/500/600 V; 0,1 mV; +/- 2,0 % + 4 dgt., Frequency range: 40 ... 400 Hz
DCA	5000 mA/80 A; 1 mA; +/- 2,5 % + 30 dgt.
ACA	5000 mA/80 A; 1 mA; +/- 2,5 % + 25 dgt. Frequency range: 40 ... 400 Hz
Ohm	500 $\Omega$ /5/50/500 k $\Omega$ /5/50 M $\Omega$ ; 0,1 $\Omega$ ; +/- 1,5 % + 2 dgt.
Capacitance	50/500 nF/5/50/500 $\mu$ F; 10 pF; +/- 3,5 % + 10 dgt.
Frequency	5 Hz ... 10 MHz; 1 mHz; +/- 1,2 % + 3 dgt.
Temperature	-20 ... +760 °C; 0,1 °C; +/- 2,0 % + 3 °C
Operation voltage	2 x 1,5 V AAA (UM-4) batteries
Dimensions (WxHxD)	70 x 210 x 37 mm
Weight	200 g
EAN-13	4250569403019



### A.3.8 Ficha técnica aislamiento térmico flexible AF/Armaflex



Propiedades	Valor/Valoración	Ensayo *1	Supervisión	Comentarios			
<b>Rango de temperaturas</b>							
Rango de temperaturas	Temperatura máx. de trabajo	+ 110 °C	(+ 85 °C si la plancha o cinta, está encolada al objeto en toda su superficie)	EU 5661	o/●	Ensayos según: EN 14706, EN 14707 y EN 14304	
	Temperatura mín. de trabajo <sup>1</sup>	-50 °C					
<b>Conductividad térmica</b>							
Conductividad térmica	$\vartheta_m$	+/-0 °C	.	$\lambda =$	EU 5661	o/●	Declarado según: EN ISO 13787 Ensayos según EN 12667 EN ISO 8497
	Coquillas (AF-1 a AF-4)	$\lambda \leq 0,033$	W/(m · K)	$[33 + 0,1 \cdot \vartheta_m + 0,0008 \cdot \vartheta_m^2]/1000$			
	Coquillas (AF-5 a AF-6)	$\lambda \leq 0,036$	W/(m · K)	$[36 + 0,1 \cdot \vartheta_m + 0,0008 \cdot \vartheta_m^2]/1000$			
	Planchas, cintas (AF-03MM a AF-32MM)	$\lambda \leq 0,033$	W/(m · K)	$[33 + 0,1 \cdot \vartheta_m + 0,0008 \cdot \vartheta_m^2]/1000$			
	Plancha AF-50MM	$\lambda \leq 0,036$	W/(m · K)	$[36 + 0,1 \cdot \vartheta_m + 0,0008 \cdot \vartheta_m^2]/1000$			
<b>Resistencia a la difusión del vapor de agua</b>							
Resistencia a la difusión del vapor de agua	Planchas (AF-3MM a AF-32MM) y coquillas (AF-1 a AF-4)	$\mu$	$\geq$	10.000	EU 5661	o/●	Ensayos según: EN 12086 y EN 13469
	Planchas (AF-50MM) y coquillas (AF-5 a AF-6)	$\mu$	$\geq$	7.000			
<b>Comportamiento al fuego</b>							
Reacción al fuego	Coquillas			B <sub>L</sub> -s3,d0	EU 5661	o/●	Clasificado según: EN 13501-1 Ensayos según: EN 13823 EN ISO 11925-2
	Planchas			B-s3,d0			
	Cinta			B-s3,d0			
Otras supervisiones	Supervisión conforme a FM			(con excepción coquillas 54mm espesor)	UL: EU 5837 FM: EU 5607 Sector Naval: D2406, D 5555, EU 5474	o/●	UL: ensayado acorde a UL94, IEC 60695 y Can/CSA-C.22.2 No0.17., UL 746C FM: ensayado acorde a UBC26-3, Clase No.4924 Sector naval: Clasificado acorde a MED 96/98/EC MODULE D
	Supervisión conforme a UL						
	Sector Naval			Baja flamabilidad - 2010 Código - FTP			
Comportamiento en caso de incendio	Autoextinguible, no gotea, no propaga la llama.						
Resistencia al fuego de los elementos estructurales				EI 30 - EI 90	EU 5661 EU 5584	o/●	Clasificado según EN 13501-2 Ensayo según EN 1366-3
<b>Rendimiento acústico</b>							
Coefficiente de absorción de sonido ponderado $\alpha_w$	Coefficiente de absorción acústica ponderado	$\leq 0,45$			D 4763		Ensayo según: EN ISO 354

## A.3.9 Ficha técnica cola de contacto Armaflex



Propiedades	Valor/Valoración	Comentarios
<b>Rango de temperaturas</b>		
Rango de temperaturas	Temperatura máx. de trabajo	+ 105 °C
	Temperatura mín. de trabajo <sup>1</sup>	- 50 °C
<b>Otras características técnicas</b>		
Rendimiento	Consumo mínimo de adhesivo aplicado por las dos caras a encolar: Coquillas Armaflex (espesor>adhesivado sólo extremos> adhesivado extremos y costura longitudinal): 10 mm > 1120 m/l > 140 m/l 20 mm > 280 m/l > 70 m/l 30 mm > 175 m/l > 45 m/l 40 mm > 130 m/l > 35 m/l Planchas: 3-4 m <sup>2</sup> /l	Valores de rendimiento del adhesivo exclusivamente orientativos
Tiempo de almacenaje	18 meses en envases sin abrir, almacenados en un lugar fresco, seco y ventilado correctamente. No almacenar con sustancias explosivas, o sustancias de combustión espontánea.	En lugar fresco pero protegido de las heladas. El congelamiento es reversible
Punto de inflamabilidad	aprox. -15 °C	
Declaración de riesgos	Líquido y vapor altamente inflamable	Para más información por favor ve la Ficha de Seguridad CE
Estabilidad al envejecimiento	Muy buena	
Resistencia a la intemperie	Buena	
Preparación de las superficies a encolar	Limpie las superficies y el aislamiento Armaflex a encolar con disolvente especial Armaflex Cleaner. Compatibilidad: buena adherencia con bases metálicas. Debe comprobarse la idoneidad de su uso sobre recubrimientos de color (pinturas). Incompatible con: pinturas de asfalto, bitumen y minio.	Para más información, consulte el Boletín Técnico n° 17.
Clases de transporte	Depende del tipo de transporte	
Consideraciones para el desecho	Ubicación de un código de desecho, según el Catálogo de Desechos Europeo, debe efectuarse de acuerdo con la compañía regional de desechos. Los botes deben vaciarse de todo residuo. Los envases con trazas de producto curado pueden reciclarse. Los envases con residuos sin secarse deben desecharse de la misma forma que el medio. Para más detalles, ver la ficha de seguridad.	
Tiempo de secado	a 20 °C: 1. Adhesión en húmedo: hasta 2 minutos 2. Tiempo mínimo de secado (aireado): 3-5 minutos 3. Tiempo de adhesión por contacto: 15-20 minutos 4. Secado completo: 36 horas	El tiempo de apertura depende de la cantidad, así como de las condiciones ambientales. Antes de poner la instalación en marcha es necesario dejar transcurrir el tiempo de fraguado del material.

1. Para temperaturas inferiores a -50 °C, consulte nuestro Departamento Técnico para solicitar la información correspondiente.

Todos los datos e informaciones técnicas están basados en resultados obtenidos bajo condiciones normales de uso. Es responsabilidad de los receptores de estos datos e información, por su propio interés, consultar con Armacell a la hora de proyectar, a fin de que los datos e informaciones suministrados pueden ser aplicados sin alteraciones en las áreas de uso concebidas. Las instrucciones de instalación están disponibles en nuestro Manual de Instalación Armaflex. Para algunos gases refrigerantes, la temperatura de descarga puede exceder los +110 °C. Para más información, consulte nuestro Departamento Técnico. Debe utilizarse adhesivo Armaflex 520 para asegurar una correcta instalación.

### A.3.10 Ficha técnica pasta térmica RS pro 5W/m<sup>2</sup>K



#### Product Details

RS Pro silicone thermal grease offers high stability and good thermal conductivity. It has a thermal conductivity of 5 W/m·K and is suitable for operating temperatures ranging from -40 to +180°C. Typical applications include IC, CPU, MOS, LED, M/B, P/S, LCD-TV, Notebook PC, telecom device, wireless hub, DDRII module, DVD and handsets.

#### Features and Benefits

- Good thermal conductivity
- Easy to use
- High stability
- Does not harden with time
- Weight loss <0.5%
- Specific gravity 2.3g/cm<sup>3</sup>
- Working temperature -40 to +180°C
- Volume resistance >10<sup>12</sup> ohm-cm
- Package size of 80 x 80 x 40 mm
- Jar contents 30g

#### Specifications:

Material	Silicone
Maximum Operating Temperature	+180°C
Minimum Operating Temperature	-40°C
Operating Temperature Range	-40 to +180°C
Thermal Conductivity	5 W/m·K
Colour	Grey
Density	>2 g/cm <sup>3</sup>



### **3. Pliego de condiciones**

## Índice del Pliego de condiciones

3.1. Construcción base banco de ensayos: Soporte de madera	136
3.2. Montaje de elementos fijos: Sondas de temperatura	137
3.3. Montaje de elementos fijos: Bloque de resistencias	138
3.4. Montaje de elementos fijos: Célula Peltier	139
3.5. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Arctic 64 GT	140
3.6. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Katana 5	141
3.7. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Alpine AM4 Passive	142
3.8. Alimentación componentes del banco: Bloque de resistencias	143
3.9. Alimentación componentes del banco: Célula Peltier	144
3.10. Alimentación componentes del banco: Ventilador	145
3.11. Medición de temperaturas: Configuración del sistema de adquisición	146
3.12. Medición de temperaturas: Toma de datos y procedimiento de los ensayos	147
3.13. Medición de consumos: Bloque de resistencias	148
3.14. Medición de consumos: Célula Peltier	149
3.15. Medición de consumos: Ventilador	150



## **3.1. Construcción base banco de ensayos: Soporte de madera**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Banco fabricado a partir de planchas de fibras de madera de densidad media (DM). Material fácil de trabajar.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Las medidas se realizan con un calibre o con una regla, según la dimensión a medir. El calibre se emplea para medir las dimensiones del ranurado, y la regla para medir las dimensiones de las planchas de DM.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Las planchas de fibra de densidad media deben ser sometidas a una inspección visual. En esta inspección debe buscarse cualquier defecto, ya sea presencia de humedad, o posibles imperfecciones en el material tales como grietas o abolladuras. La humedad no es admisible, y las grietas y abolladuras descartan la pieza si comprometen la integridad estructural de la misma o afectan a la colocación de los elementos de que dispone el banco.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Inspección, corte, grapado, taladrado.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco, alejado de la radiación solar directa.



## **3.2. Montaje de elementos fijos: Sondas de temperatura**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Termopares tipo T, montados en encapsulado de acero de 2 mm de diámetro.  
Termopares tipo K, soldados y directamente montados.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Medición mediante sistema de adquisición.

### **CONDICIONES DE MONTAJE**

Agujeros de 2.5 mm de diámetro para termopares tipo T, deben contener una cierta cantidad de pasta térmica que asegure un buen contacto entre el termopar y la superficie adyacente. Asegurar que no quede aire atrapado en el orificio al introducir el termopar. Termopar colocado a presión.

Termopares tipo K. Orificio que permita la entrada de la unión soldada del termopar, relleno de pasta térmica.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Soldadura termopares, taladrado, colocación de la pasta térmica, colocación del termopar.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco. Los cables de los termopares no deben quedar expuestos a tirones accidentales. Fijar con cinta aislante o similar si es necesario.

### **3.3. Montaje de elementos fijos: Bloque de resistencias**

#### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Resistencias de entre 27 y 29 ohmios en encapsulado de acero, insertadas en bloque de cobre de dimensiones 40 mm x 40 mm, espesor de 10 mm. Acabado del bloque liso, superficie superior pulida.

#### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Medición con regla o calibre. Inspección visual.

#### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Comprobar que quepa en el surco de la base de madera, comprobar ausencia defectos o anomalías, asegurar limpieza de la cara superior. Colocar en el surco sobre una plantilla de goma para asegurar estabilidad al montar la célula.

#### **FASES DE EJECUCIÓN**

Preparación de la pieza, pulido, examen visual, montaje.

#### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco y con envoltorio suave, evitar golpes y arañazos.

## **3.4. Montaje de elementos fijos: Célula Peltier**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Célula Peltier Marlow TG-12 8L. Dimensiones 40mm x 40 mm, espesor 10 mm.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

No se requiere medición, comprobar ficha técnica y realizar examen visual en busca de posibles defectos o anomalías.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Célula en buen estado, superficies lisas, limpias de cualquier resto de grasa o suciedad, limpiar con acetona si es necesario. Comprobar que en la superficie superior del bloque de resistencias, se ha colocado una fina y homogénea capa de pasta térmica.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Inspección, limpieza, colocación.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Mantener en lugar seco, conservar protegida de cualquier golpe o esfuerzo. Evitar temperaturas extremas.

## **3.5. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Arctic 64 GT**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Disipador de convección forzada con aletas de aluminio. Ventilador con motor sin escobillas, consumo 1.7 W. Velocidad de giro; 300 a 2300 rpm.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Medición del consumo y la tensión de alimentación mediante pinza amperimétrica y voltímetro. Inspección visual. Medición con calibre de la ubicación del orificio de la base que aloja el termopar. Medición del apriete mediante llave dinamométrica.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Asegurar correcta colocación del termopar. Termopar tipo T insertado con pasta térmica en orificio de 2.5 mm de diámetro ubicado en la base del disipador. Asegurar que no quede aire atrapado en el orificio.

Superficie de la base del disipador pulida y libre de suciedad. Asegurar que haya una fina y homogénea capa de pasta térmica sobre la célula.

### **CONDICIONES MONTAJE**

Asegurar correcta alineación entre la base del disipador y la célula. Par de apriete de los tornillos que fijan el disipador de 1 Nm.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Taladrado, colocación de la pasta térmica en orificio del termopar, colocación del termopar, inspección visual, comprobar alineación, limpieza, atornillado.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco, alejado de la luz solar, en envoltorio protector frente a golpes.

## **3.6. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Katana 5**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Disipador de convección forzada con *heat-pipe* de cobre cromado y aletas de aluminio. Ventilador con motor sin escobillas, consumo 1.7 W. Velocidad de giro; 300 a 2300 rpm.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Medición del consumo y la tensión de alimentación mediante pinza amperimétrica y voltímetro. Inspección visual. Medición con calibre de la ubicación del orificio de la base que aloja el termopar. Medición del apriete mediante llave dinamométrica.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Asegurar correcta colocación del termopar. Termopar tipo K insertado con pasta térmica en orificio de 1.5 mm de diámetro ubicado en la base del disipador. Asegurar que no quede aire atrapado en el orificio. Asegurar buen estado del conducto del *heat-pipe*. Superficie de la base del disipador pulida y libre de suciedad. Asegurar que haya una fina y homogénea capa de pasta térmica sobre la célula en el caso del montaje con pasta térmica. En el caso de montaje mediante lámina de grafito, asegurar que la lámina está debidamente colocada en la célula, alineada y sin desperfectos ni irregularidades.

### **CONDICIONES MONTAJE**

Asegurar correcta alineación entre la base del disipador y la célula. Par de apriete de los tornillos que fijan el disipador de 1 Nm.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Taladrado, colocación de la pasta térmica en el orificio del termopar, colocación del termopar, inspección visual, comprobar alineación, limpieza, atornillado.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco, alejado de la luz solar, en envoltorio protector frente a golpes.

## **3.7. Montaje de elementos intercambiables: Disipador Alpine AM4 Passive**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Disipador de convección natural, formado por aletas de aluminio.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Inspección visual. Medición con calibre de la ubicación del orificio de la base que aloja el termopar. Medición del apriete mediante llave dinamométrica.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Asegurar correcta colocación del termopar. Termopar tipo T insertado con pasta térmica en orificio de 2.5 mm de diámetro ubicado en la base del disipador. Asegurar que no quede aire atrapado en el orificio.

Superficie de la base del disipador pulida y libre de suciedad. Asegurar que haya una fina y homogénea capa de pasta térmica sobre la célula.

### **CONDICIONES MONTAJE**

Asegurar correcta alineación entre la base del disipador y la célula. Par de apriete de los tornillos que fijan el disipador de 1 Nm.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Taladrado, colocación de la pasta térmica en orificio del termopar, colocación del termopar, inspección visual, comprobar alineación, limpieza, atornillado.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar en lugar seco, alejado de la luz solar, en envoltorio protector frente a golpes.

## **3.8. Alimentación componentes del banco: Bloque de resistencias**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Fuente de alimentación PeakTech 6155. Este modelo es capaz de suministrar hasta 30V y 20A de corriente continua. Dispone de un potenciómetro que permite ajustar la tensión fácilmente, la cual se puede leer de forma aproximada junto a la corriente en un display LCD de 3 dígitos que incorpora en la parte delantera.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Se debe medir la tensión y la intensidad con el multímetro PeakTech P4350. Para medir la intensidad con este dispositivo, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias medidas y comprobar que no hay diferencia entre estas o la diferencia es baja. La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir. También se puede aplicar la ley de Ohm para calcular la intensidad y compararla con el multímetro, para verificar así que la lectura de este instrumento es correcta.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Realizar una inspección visual, conectar los cables de la célula a los bornes de la fuente de alimentación. Deben quedar sujetos y seguros. Es indiferente la polaridad por tratarse de resistencias.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Inspección, conexión, verificación de la conexión.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar la fuente en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.

## **3.9. Alimentación componentes del banco: Célula Peltier**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Fuente de alimentación PeakTech 6155. Este modelo es capaz de suministrar hasta 30V y 20A de corriente continua. Dispone de un potenciómetro que permite ajustar la tensión fácilmente, la cual se puede leer de forma aproximada junto a la corriente en un display LCD de 3 dígitos que incorpora en la parte delantera.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Se debe medir la tensión y la intensidad con el multímetro PeakTech P4350. Para medir la intensidad con este dispositivo, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias mediciones, y comprobar que no hay diferencia entre estas o es baja. La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Realizar una inspección visual, conectar los cables de la célula a los bornes de la fuente de alimentación. Deben quedar sujetos y seguros. Prestar atención a la polaridad, el cable rojo de la célula debe conectarse al borne del mismo color de la fuente, y el cable azul, al borne azul o negro.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Inspección, conexión, verificación de la conexión.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar la fuente en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.



## **3.10. Alimentación componentes del banco: Ventilador**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Fuente de alimentación de corriente continua, capaz de suministrar 10V. Fuente de alimentación regulable genérica.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

Se debe medir la tensión y la intensidad con el multímetro PeakTech P4350. Para medir la intensidad con este dispositivo, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias mediciones, y comprobar que no hay diferencia entre estas o es baja. La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Realizar inspección visual en busca de anomalías. Conectar polo positivo al polo positivo de la fuente, y polo negativo al polo negativo de la fuente. Comprobar que el ventilador gira en sentido tal, que el flujo de aire producido atraviesa las aletas del disipador.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Inspección, conexión, comprobación

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar la fuente en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.

## **3.11. Medición de temperaturas: Configuración del sistema de adquisición**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Adquisidor de datos Keysight Data logger 34972A, resolución de 22 bits. Gran cantidad de entradas analógicas. Permite monitorizar las lecturas de temperatura desde el ordenador en tiempo real. Configuración mediante software Agilent Benchlink Datalogger 3.

### **CRITERIO DE CONEXIONADO**

Extraer módulo de entradas del adquisidor, retirar placa que cubre las entradas. Conectar los polos de los termopares en las entradas analógicas del adquisidor. Polo positivo del termopar a patilla H, polo negativo del termopar a patilla L. Fijar cada conductor con el tornillo de la conexión de la entrada.

### **CONDICIONES DE CONFIGURACIÓN**

Asignar un nombre a cada canal de medida que permita identificar adecuadamente cada termopar. Especificar en la configuración de cada canal el tipo de termopar con el que se va a medir (Tipo T o tipo K). Establecer el periodo de escaneo en la configuración general (10 segundos para las medidas de los ensayos, 2 minutos para el ensayo de verificación de 24h). Verificar que las medidas son coherentes y robustas.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Conexión, configuración, verificación de las medidas

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

No especificado, por tratarse de una configuración de software.

## **3.12. Medición de temperaturas: Toma de datos y procedimiento de los ensayos**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Adquisidor de datos Keysight Datalogger 34972A, lectura de las medidas mediante software Agilent Benchlink Data logger 3.

### **PROCEDIMIENTO Y CRITERIO DE MEDICIÓN**

Partir de una temperatura estable y variar condiciones de alimentación del banco de ensayos. En el gráfico que produce el software se muestra la evolución de la temperatura. Esperar a que la tendencia de la temperatura sea plana, lo cual implica que se ha llegado al estado estacionario. Una vez en estado estacionario, calcular el promedio de los últimos valores de temperatura medidos (y que muestran una tendencia plana) este valor es el valor de temperatura en cuestión.

### **CONDICIONES PREVIAS AL MONTAJE**

Verificar coherencia y robustez de las lecturas.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Verificación, modificación de las condiciones de alimentación, llegada al estacionario, promediado y obtención del valor final.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

No especificado, por tratarse de un procedimiento de software.

## **3.13. Medición de consumos: Bloque de resistencias**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Multímetro PeakTech P4350. Dispone de una pinza amperimétrica que es capaz de medir corriente continua. Tiene una resolución de 1mA, y también es capaz de medir tensión empleando dos cables que van conectados a los bornes negro y rojo ubicados en la parte inferior del dispositivo.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir.

Para medir la intensidad, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias medidas y comprobar que no hay diferencia entre estas o la diferencia es baja. También se puede aplicar la ley de Ohm para calcular la intensidad y compararla con el multímetro, para verificar así que la lectura de este instrumento es correcta, si bien cabe la posibilidad de que la resistencia varíe ligeramente con la temperatura, por lo que deberá tomarse este cálculo como orientativo.

### **CONDICIONES PREVIAS A LA MEDICIÓN**

Comprobar que el dispositivo marca cero antes de la medición. Comprobar estabilidad de la lectura.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Calibración (Puesta a cero), medición, comprobación de la estabilidad de la medición.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar multímetro en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.

## **3.14. Medición de consumos: Célula Peltier**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Multímetro PeakTech P4350. Dispone de una pinza amperimétrica que es capaz de medir corriente continua. Tiene una resolución de 1mA, y también es capaz de medir tensión empleando dos cables que van conectados a los bornes negro y rojo ubicados en la parte inferior del dispositivo.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir.

Para medir la intensidad, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias medidas y comprobar que no hay diferencia entre estas o la diferencia es baja. Es necesario realizar la medición una vez se ha alcanzado el estado estacionario, es decir, cuando la temperatura se ha estabilizado.

### **CONDICIONES PREVIAS A LA MEDICIÓN**

Comprobar que el dispositivo marca cero antes de la medición. Comprobar estabilidad de la lectura.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Calibración (Puesta a cero), medición, comprobación de la estabilidad de la medición.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar multímetro en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.

## **3.15. Medición de consumos: Ventilador**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Multímetro PeakTech P4350. Dispone de una pinza amperimétrica que es capaz de medir corriente continua. Tiene una resolución de 1mA, y también es capaz de medir tensión empleando dos cables que van conectados a los bornes negro y rojo ubicados en la parte inferior del dispositivo.

### **CRITERIO DE MEDICIÓN**

La lectura de tensión se obtiene de forma directa colocando el dial en V, y conectando los bornes de los cables con los polos del dispositivo a medir.

Para medir la intensidad, colocar el dial en la escala mA nuevamente para cada medición, esperar que marque cero, y colocar uno de los cables de alimentación por dentro del bucle de la pinza. Esperar a que la lectura se estabilice y tomar nota del valor medido. Tomar varias medidas y comprobar que no hay diferencia entre estas o la diferencia es baja. Solo es necesaria una medición ya que el consumo de este elemento no cambia.

### **CONDICIONES PREVIAS A LA MEDICIÓN**

Comprobar que el dispositivo marca cero antes de la medición. Comprobar estabilidad de la lectura.

### **FASES DE EJECUCIÓN**

Calibración (Puesta a cero), medición, comprobación de la estabilidad de la medición.

### **CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Conservar multímetro en lugar seco, alejado de la radiación solar directa y temperaturas extremas. Proteger de golpes y movimientos bruscos.

## **4. Presupuesto**

## 4.1. Presupuesto de materiales y componentes

Este presupuesto, incluye el coste de los materiales del banco de ensayos tales como los tableros de madera o la pasta térmica, y los componentes del propio banco, como la célula Peltier o los disipadores. Este coste, a falta de sumar la mano de obra, que viene detallada en el siguiente apartado, refleja el coste que debería de asumir un taller que ya dispone de todos los equipos, instrumentos y medios para tomar los datos y realizar las mediciones correspondientes, para montar el banco de ensayos. Como puede verse en la Tabla 4-1, el coste asciende a 191,96 euros.

<b>Presupuesto de materiales y componentes</b>			
Concepto	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Tablero madera DM	28,2 €/m <sup>2</sup>	0,0968	2,73 €
Aislante térmico AF/Armaflex 10mm	31,97 €/m <sup>2</sup>	0,10208	3,26 €
Cola contacto Armaflex 520	10,89 €	1	10,89 €
Termopar tipo T encapsulado	0,7 €/m	20	14,00 €
Termopar tipo K	0,59 €/m	4	2,36 €
Célula Peltier Marlow TG-12 8L	52,00 €	1	52,00 €
Bloque de cobre	12,00 €	1	12,00 €
Resistencia industrial encapsulada	2,40 €	4	9,60 €
Pasta térmica RS pro 5 W/m <sup>2</sup> K	23,50 €	1	23,50 €
Lámina grafito 20 W/m <sup>2</sup> K	1,48 €	1	1,48 €
Disipador Arctic 64 GT	14,95 €	1	14,95 €
Disipador SCKTN Katana 5	27,85 €	1	27,85 €
Disipador Alpine AM4 Passive	13,50 €	1	13,50 €
Tuerca acero M5	0,03 €	4	0,12 €
Tornillo acero M5	0,71 €	4	2,84 €
Arandela acero	0,01 €	4	0,04 €
Tornillo acero M2	0,18 €	4	0,72 €
Escuadra acero 90°	0,03 €	4	0,12 €
Total (IVA incluido)			191,96 €

**Tabla 4-1:** Presupuesto de materiales y componentes.



## 4.2. Presupuesto de equipos y montaje

En este apartado se muestra el coste de los equipos empleados para realizar las mediciones correspondientes. También se incluye el coste de la mano de obra requerida únicamente para el montaje y la preparación del banco de ensayos. Realizar los ensayos conlleva una cantidad adicional de horas que no se ha contabilizado en este presupuesto. En la Tabla 4-2 se muestra el presupuesto de los equipos empleados y el montaje.

<b>Presupuesto de equipos y montaje</b>			
Concepto	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Keysight Datalogger 34972A	2.350,00 €	1	2.350,00 €
Multímetro Peak-Tech P4350	58,97 €	1	58,97 €
Fuente Alimentación Peak-Tech 6155	163,20 €	2	326,40 €
Mano de obra	25 €/h	30	600,00 €
Total (IVA incluido)			3.335,37 €

**Tabla 4-2:** *Presupuesto de equipos y montaje.*

El cómputo total del coste del banco de ensayos para un taller que no disponga en los equipos, asciende a un total de 3527,33 euros tal y como puede verse en la Tabla 4-3.

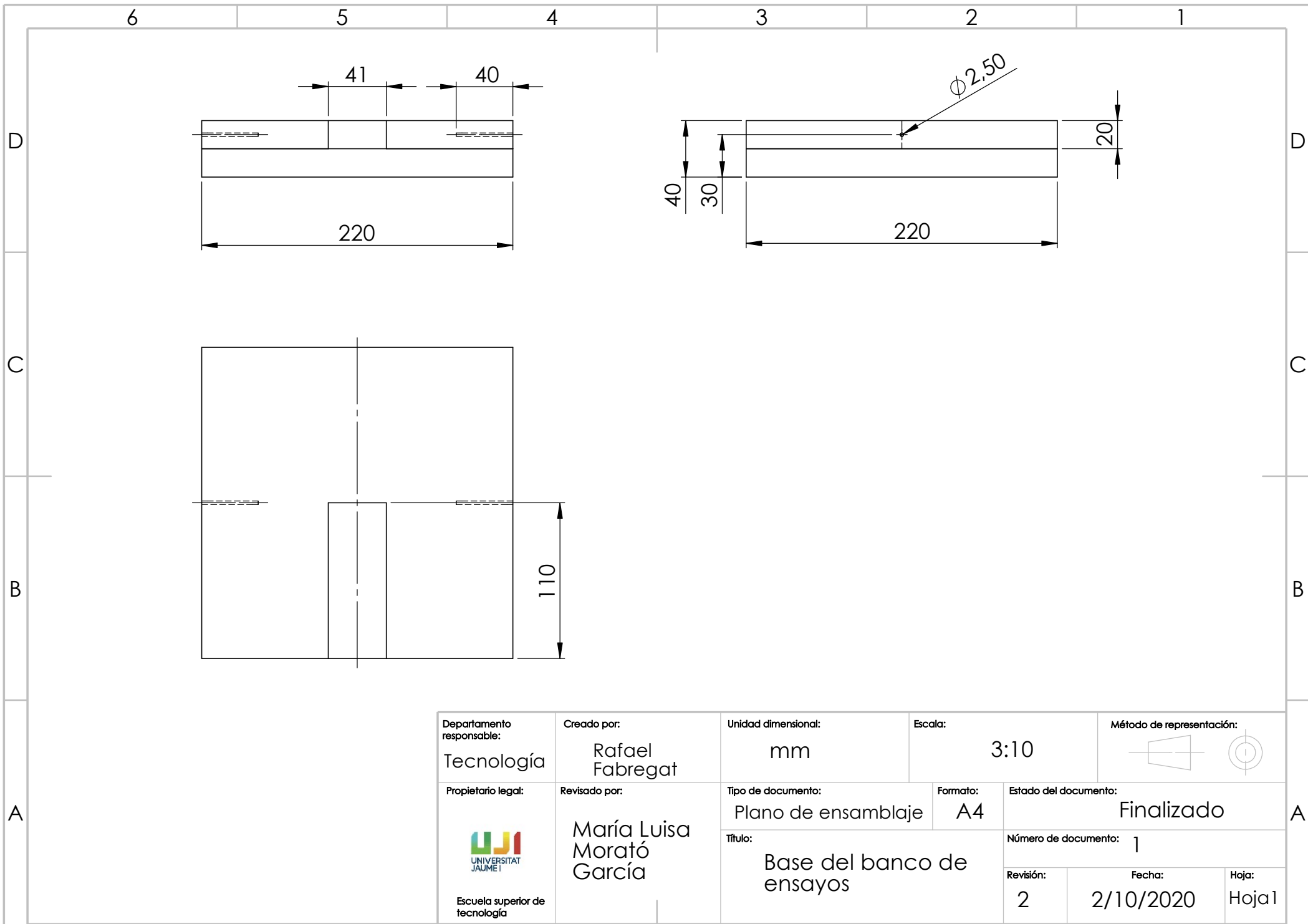
Materiales y componentes	191,96 €
Equipos y ejecución	3.335,37 €
Total (IVA incluido)	3.527,33 €

**Tabla 4-3:** *Presupuesto total.*

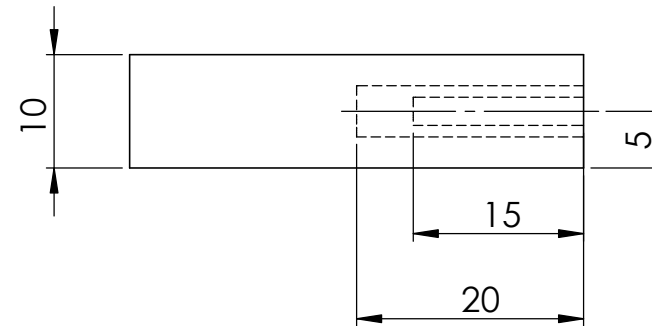
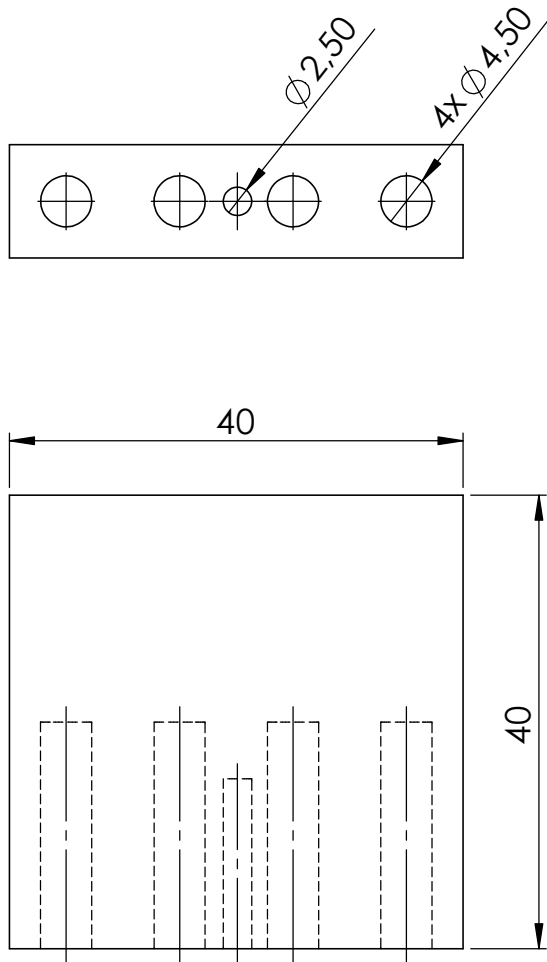


## **5. Planos**





Departamento responsable: <b>Tecnología</b>	Creado por: <b>Rafael Fabregat</b>	Unidad dimensional: <b>mm</b>	Escala: <b>3:10</b>	Método de representación: 	
Propietario legal:  Escuela superior de tecnología	Revisado por: <b>María Luisa Morató García</b>	Tipo de documento: <b>Plano de ensamblaje</b>		Formato: <b>A4</b>	Estado del documento: <b>Finalizado</b>
		Título: <b>Base del banco de ensayos</b>		Número de documento: <b>1</b>	
		Revisión: <b>2</b>	Fecha: <b>2/10/2020</b>	Hoja: <b>Hoja 1</b>	



Departamento responsable: Tecnología	Creado por: Rafael Fabregat	Unidad dimensional: mm	Escala: 3:2	Método de representación: 
Propietario legal: 	Revisado por: María Luisa Morató García	Tipo de documento: Plano de dibujo	Formato: A4	Estado del documento: Finalizado
Escuela superior de tecnología		Título: Bloque de cobre que aloja las resistencias	Número de documento: 1	Revisión: 2
			Fecha: 2/10/2020	Hoja: Hoja2