

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Caracterización experimental de un intercambiador de calor con sistema termosifón y cambio de fase aplicado a la generación eléctrica



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Alumno: John Bryan Livi Tituaña

Tutor: David Astrain Ulibarrena

Cotutor: Miguel Araiz Vega

Pamplona, 24 de junio 2016

Abstract

Thermoelectricity is an alternative way of generating electrical power. Nowadays it is known that environment has been damaged by the traditional methods of generating so in order to improve them and improving their efficiencies new technologies need to be researched.

In this project, thermoelectric generator and a special heat exchanger are being studying to applicate them in a system of generating. The heat exchanger is necessary because the effective area of heat transmission in the module is very limited, so using them larger areas and a higher difference of temperature between the two sides of the module are reached, which is important in his own work. A heat exchanger with thermosiphon system and phase change is studied to learn about his own running. This one is selected because it doesn't have any mechanism or any moving part to accomplish its work so them permits systems of generating reach better global efficiencies.

The characterization is carried out in the laboratory with different number of modules and different powers of heat which are provided to the modules to generate, the investigator has to learn about the performance of the interchanger in generating systems and what is the best way to use them. With the results obtained a computational model of generating system developed by the group of investigation of engineering thermic and fluids has to be validated.

Keywords

Thermoelectricity, thermoelectric module, interchanger of heat, thermosiphon, characterization.

Resumen

La termoelectricidad es una forma alternativa de generar electricidad. Hoy en día el uso de sistemas de generación tradicionales tiene un gran impacto medioambiental y no son eficientes, por ello es necesario buscar nuevas tecnologías que mejoren dichos sistemas.

En este proyecto se estudia un intercambiador de calor y módulos termoeléctricos para poder ser utilizados en sistemas de generación. El uso de un intercambiador de calor es necesario para conseguir aumentar el área efectiva de intercambio de los módulos y conseguir un mayor salto de temperaturas entre sus caras lo cual favorecerá a aumentar la eficiencia de los módulos y por lo tanto mejorará su comportamiento en generación. El intercambiador elegido para este estudio es uno con sistema termosifón y cambio de fase, dicho intercambiador no posee ningún mecanismo ni parte móvil lo cual supone una mejora de la eficiencia global del sistema.

Se realiza, así, una caracterización del intercambiador de calor modificando el número de módulos y la potencia suministrada a los mismos con el objetivo de comprender su funcionamiento y con los resultados obtenidos poder validar un modelo computacional de un sistema de generación termoeléctrica desarrollado por el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos.

Palabras Clave

Termoelectricidad, módulo termoeléctrico, intercambiador de calor, termosifón y caracterización.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESTADO DEL ARTE	3
2.1	Materiales	3
2.2	Aplicaciones	4
2.2.1	Aplicaciones Industriales	4
2.2.2	Aplicaciones aeroespaciales	5
2.3	Disipadores de calor	5
2.3.1	Disipador de aletas	5
2.3.2	Heat-pipes	6
2.3.3	Termosifón	7
3	MOTIVACIÓN	8
4	OBJETIVOS	9
5	GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA	10
5.1	Efectos Termoeléctricos	12
5.1.1	Efecto Seebeck	12
5.1.2	Efecto Peltier	13
5.1.3	Efecto Thompson	13
5.1.4	Efecto Joule	14
5.1.5	Ecuaciones de Kelvin	15
5.2	Definición del funcionamiento de un par termoeléctrico	15
5.3	Definición del funcionamiento de un módulo termoeléctrico	19
5.4	Particularización de las ecuaciones para un módulo común	20
6	TERMOSIFÓN	23
6.1	Descripción del sistema termosifón	23
6.1.1	Descripción Teórica	23
6.1.2	Modelizado Matemático	24
6.1.2.1	Ebullición	24
6.1.2.2	Condensación	25
6.1.2.3	Convección natural	27
6.1.3	Descripción Física del dispositivo ensayado	28
6.1.3.1	Tubos circulares	29
6.1.3.2	Aletas	30
6.1.3.3	Calderín	31
6.2	Caracterización y ensayos	32
6.2.1	Equipo y material empleado	32
6.2.1.1	Cámara climática	32
6.2.1.2	Fuente de potencia	33
6.2.1.3	Adquisidor de datos	33
6.2.1.4	Sondas de temperatura	34
6.2.1.5	Placa calefactora	35
6.2.1.6	Aislantes térmicos	35
6.2.1.7	Láminas de Grafito	36
6.2.1.8	Resistencias de eléctricas	36
6.2.2	Ensayos de Caracterización	37

6.2.2.2	Montaje	38
6.2.2.3	Mediciones	44
6.2.2.4	Programación de ensayos	46
6.2.3	Ensayos de Generación	49
6.2.4	Modelo computacional	50
6.3	Resultados y análisis	50
6.3.1	Influencia de la potencia disipada sobre la resistencia térmica del termosifón	52
6.3.2	Influencia del factor de ocupación sobre la resistencia térmica del termosifón	54
6.3.3	Análisis estadístico de los ensayos	55
6.3.4	Comparación de resultados frente a los obtenidos con el modelo computacional	56
6.3.5	Comparación de los resultados frente a los obtenidos usando un disipador de aletas	57
6.3.6	Resultados de Generación	61
7	CONCLUSIONES	63
8	LINEAS DE FUTURO	64
9	REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Evolución de la demanda eléctrica peninsular [1].</i>	2
<i>Figura 1.2 Cobertura de la demanda peninsular 2015 [1].</i>	2
<i>Figura 5.1 Generador termoeléctrico [2].</i>	10
<i>Figura 5.2 Módulo termoeléctrico Marlow.</i>	11
<i>Figura 5.3 Módulo termoeléctrico y detalle de un par termoeléctrico.</i>	12
<i>Figura 5.4 Par termoeléctrico (1a) Aparece una diferencia de potencial EAB (1b) Aparece una densidad de corriente.</i>	12
<i>Figura 5.5 Esquema de conductor sometido a un gradiente de temperatura por el que circula una densidad de corriente J.</i>	14
<i>Figura 5.6 Esquema de un termopar.</i>	16
<i>Figura 5.7 Circuito eléctrico equivalente de un termopar conectado a una resistencia de carga.</i>	17
<i>Figura 6.1 Esquema de la analogía eléctrica del termosifón.</i>	24
<i>Figura 6.2 Prototipo de termosifón ensayado.</i>	29
<i>Figura 6.3 Foto del termosifón mostrando el tubo ascendente y las ramificaciones.</i>	30
<i>Figura 6.4 Posición y geometría de las aletas del termosifón.</i>	31
<i>Figura 6.5 Calderín del termosifón.</i>	31
<i>Figura 6.6 Cámara climática.</i>	32
<i>Figura 6.7 Fuente de potencia.</i>	33
<i>Figura 6.8 Adquisidor de datos ALMEMO 5590.</i>	33
<i>Figura 6.9 Sonda de temperatura de tipo K aislada con fibra de vidrio y cabezal de conexión ALMEMO.</i>	34
<i>Figura 6.10 Sonda de temperatura superficial de tipo K.</i>	34
<i>Figura 6.11 Sonda de temperatura ambiental de tipo K.</i>	34
<i>Figura 6.12 Placa calefactora.</i>	35
<i>Figura 6.13 Material aislante utilizado para cubrir el calderín.</i>	35
<i>Figura 6.14 Lámina de grafito utilizada para el contacto módulo-calderín.</i>	36
<i>Figura 6.15 Resistencias eléctricas variables.</i>	36
<i>Figura 6.16 Esquema de los trazos mecanizados sobre la base del calderín.</i>	38
<i>Figura 6.17 Plano de montaje para la configuración de dos módulos.</i>	39
<i>Figura 6.18 Plano de montaje para la configuración de cuatro módulos.</i>	40
<i>Figura 6.19 Plano de montaje para la configuración de ocho módulos.</i>	41
<i>Figura 6.20 Plano de montaje para la configuración de doce módulos.</i>	42
<i>Figura 6.21 Esquema de los trazos mecanizados sobre la superficie de la placa calefactora.</i>	43
<i>Figura 6.22 Placa atornillada que cierra el montaje "sándwich".</i>	44
<i>Figura 6.23 Esquema de asignación de sondas a colocar sobre la superficie del calderín.</i>	45
<i>Figura 6.24 Esquema de asignación de sondas a colocar sobre la superficie de la placa calefactora.</i>	45
<i>Figura 6.25 Manómetro incorporado en la estructura del termosifón.</i>	46
<i>Figura 6.26 Esquema de un módulo termoeléctrico funcionando como generador.</i>	49
<i>Figura 6.27 Analogía eléctrica utilizada para modelar la resistencia térmica total del termosifón.</i>	51
<i>Figura 6.28 Esquema de los flujos de calor producidos en un módulo alimentado por una potencia eléctrica.</i>	51
<i>Figura 6.29 Gráfica de la resistencia térmica del termosifón frente a la potencia disipada, suministrada por la fuente.</i>	53
<i>Figura 6.30 Gráfica de la resistencia térmica del termosifón frente a diferentes valores del factor de ocupación.</i>	55

<i>Figura 6.31 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón frente a la potencia disipada para valores experimentales y simulados.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6.32 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la mínima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de doce y ocho módulos.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6.33 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la mínima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de cuatro y dos módulos.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6.34 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la máxima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de doce y ocho módulos.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 6.35 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la máxima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de cuatro y dos módulos.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.36 Gráfico de la potencia total generada frente al salto de temperatura existente entre las caras para ensayos de dos módulos.</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 6.1 Cálculo del coeficiente de transmisión de calor por condensación, hTP según el régimen.</i>	27
<i>Tabla 6.2 Definición de ensayos de caracterización.</i>	48
<i>Tabla 6.3 Relación de la potencia de consumo de los ventiladores con el flujo másico de aire conseguido.</i>	57
<i>Tabla 6.4 Valores comparativos entre el funcionamiento de un termosifón y un disipador de aletas en un sistema de generación.</i>	61

NOMECLATURA

A	Área	m^2
A_c	Superficie de la base del calderín	m^2
A_n	Área del semiconductor de tipo n	m^2
A_p	Área del semiconductor de tipo p	m^2
A_{MTE}	Superficie de un módulo termoeléctrico	m^2
c_{pl}	Calor específico del líquido	$J/kg \cdot K$
D	Diámetro interior del tubo	m
D	Diámetro de la aleta	m
d	Diámetro exterior del tubo	m
E	Diferencia de potencial	V
E_{AB}	Fuerza termoelectromotriz de Seebeck	V
E_t	Fuerza electromotriz de un termopar	V
h	Coeficiente de transmisión de calor	$W/m^2 \cdot K$
G	Flujo másico total (vapor + líquido)	$kg/(m \cdot s^2)$
g	Aceleración debida a la gravedad, 9,81	m/s^2
I	Intensidad de corriente	A
i_{lg}	Calor latente de vaporización	J/kg
J	Densidad o Flujo de corriente eléctrica	A/m^2
k	Conductividad térmica	$W/m \cdot K$
k_f, k_l	Conductividad térmica del líquido	$W/m \cdot K$
L	Longitud	m
Nu	Número de Nusselt	
n_{TME}	Número de módulos termoeléctricos	
P	Presión	Pa
p_r	Presión reducida	
Pr	Número de Prandtl	
Pr_f	Número de Prandtl del líquido	
Q	Calor	J
\dot{Q}	Flujo de calor por unidad de tiempo. Potencia calorífica	W
$\dot{Q}_{peltier}$	Potencia calorífica del Peltier	W
\dot{Q}_P	Potencia calorífica por efecto Peltier	W
\dot{Q}_j	Potencia calorífica por efecto Joule	W

\dot{Q}_h	Potencia calorífica o flujo de calor de la cara caliente del módulo	W
\dot{Q}_c	Potencia calorífica o flujo de calor de la cara fría del módulo	W
\dot{q}	Potencia calorífica por unidad de área	W/m ²
\dot{q}_σ	Potencia calorífica por efecto Thomson por unidad de volumen	W/m ³
\dot{q}_j	Potencia calorífica por efecto Joule por unidad de volumen	W/m ³
R	Resistencia térmica	°C /W o K/W
R_L	Resistencia de carga	Ω
R_0	Resistencia eléctrica propia de un termopar	Ω
R_b	Resistencia térmica de ebullición	°C /W o K/W
R_{cond}	Resistencia térmica de condensación	°C /W o K/W
R_{conv}	Resistencia térmica de convección	°C /W o K/W
R_{th}	Resistencia térmica	°C /W o K/W
R_{terms}	Resistencia térmica del termosifón por unidad de módulo	°C /W o K/W
R_{terms}^{total}	Resistencia térmica del termosifón	°C /W o K/W
R_e	Resistencia eléctrica	Ω
Re	Número de Reynolds	
Re_{LS}	Número de Reynolds suponiendo que solo fluye la fase líquida	
Re_{LT}	Número de Reynolds suponiendo que todo el flujo másico es líquido	
S	Separación entre aletas	m
T	Temperatura absoluta	K
t	Temperatura	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	K
T_a	Temperatura ambiente	K
T_h	Temperatura de la cara caliente del módulo o del termopar	K
T_c	Temperatura de la cara fría del módulo o del termopar	K

T_i	Temperatura interior	K
T_{sat}	Temperatura de saturación	
T_w	Temperatura de la pared	K
U	Coficiente global de transmisión de calor	$W/m^2 \cdot K$
v	Velocidad	m/s
V	Tensión eléctrica	V
W_{TEM}	Trabajo eléctrico	J
\dot{W}_e	Potencia eléctrica suministrada por la fuente	W
Z	Figura de mérito	K^{-1}
α	Difusividad térmica	m^2/s
α	Coficiente Seebeck	V/K o $\mu V/K$
β	Coficiente de expansión térmica	K^{-1}
ΔP_{sat}	Aumento de la presión de saturación correspondiente a ΔT_{sat}	Pa
ΔT_{sat}	Diferencia entre la temperatura de la pared y la de saturación	K
δ	Factor de ocupación	
η	Rendimiento de generación de un módulo termoeléctrico	
μ_f	Viscosidad dinámica del líquido	Pa·s
μ_g, μ_l	Viscosidad dinámica del vapor	Pa·s
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
π	Coficiente Peltier	V
ρ	Resistividad eléctrica	$\Omega \cdot m$
ρ_g	densidad del gas	kg/m^3
ρ_l	Densidad del líquido	kg/m^3
$\rho_{unión}^{superficial}$	Resistividad eléctrica superficial de cada unión semiconductor-conductor	$\Omega \cdot m$
σ	Coficiente Thomson	V/K
x	Titulo	

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayor parte de la energía eléctrica mundial producida proviene de fuentes no renovables tales como la quema de combustibles fósiles o la fisión de núcleos de elementos químicos cuyos desechos son isótopos radioactivos. Siendo las citadas fuentes las que provocan grandes problemas, habrá que buscar alternativas que mitiguen o hagan desaparecer los daños producidos por las mismas.

El proyecto presentado se ha desarrollado como contribución a un proyecto de carácter nacional, cuyo objetivo es conseguir la generación de electricidad a partir de los humos de escape de una caldera. Para ello se emplearán módulos termoeléctricos adheridos a las paredes de la chimenea de escape de la citada caldera. La implementación de módulos termoeléctricos requiere el uso de intercambiadores de calor para favorecer su correcto funcionamiento, ya que cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre las caras, mayor será su eficiencia y los intercambiadores contribuyen a ello. La elección de un correcto intercambiador es esencial, por ello habrá que buscar un intercambiador eficiente y estudiarlo para conocer su comportamiento. Es aquí donde comienza este proyecto llevado a cabo en colaboración con el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Pública de Navarra.

El uso de combustibles fósiles plantea dos problemas fundamentales: no es una fuente ilimitada de energía y produce efectos negativos en el medio ambiente. El hecho de que es una fuente limitada y que no se encuentra uniformemente repartida por el mundo hace que el precio sea otro factor muy importante a tener en cuenta pues este será fluctuante y dependerá del estado del mercado. El aspecto medioambiental es el otro a tener en cuenta, el uso de combustibles no solo afecta por la producción de CO₂ implícita en el proceso de combustión sino por los diferentes contaminantes derivados de los aditivos y las sustancias que se usan además del combustible para la producción de energía.

En el plano nacional, la demanda eléctrica sigue una tendencia creciente tal y como se puede ver en la Figura 1.1, es por ello que el estudio de alternativas renovables u otras fuentes no dañinas debería ser una de las soluciones a tomar para satisfacer esta demanda. El pasado año la demanda aumentó en un 1,9%, este aumento fue cubierto en gran medida por fuentes no renovables, aproximadamente un 50%. La energía eólica si tuvo un fuerte peso satisfaciendo el 19.1% de la demanda, sin embargo, el peso que poseen las fuentes renovables debería ser mayor [1].

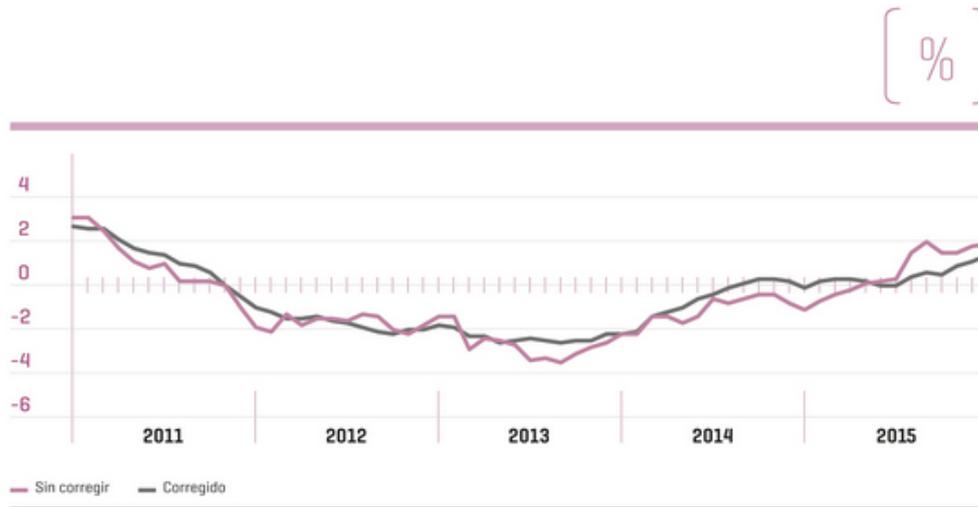


Figura 1.1 Evolución de la demanda eléctrica peninsular [1].

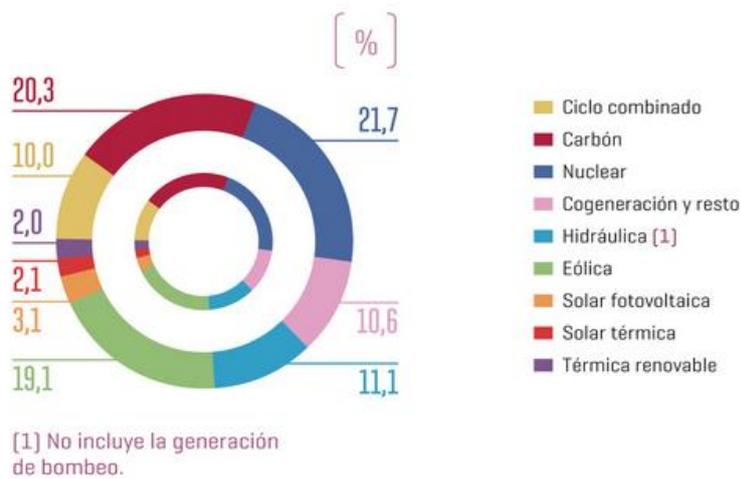


Figura 1.2 Cobertura de la demanda peninsular 2015 [1].

El continuo crecimiento de la demanda de energía hace que se busquen alternativas más eficientes que las existentes para su producción. La preocupación por el medio ambiente, así como el inicio del uso y el aprovechamiento inteligente de la energía han hecho que se investiguen diferentes tecnologías, siendo una de ellas la generación termoeléctrica [2].

2 ESTADO DEL ARTE

La termoelectricidad se define como la rama de la termodinámica que estudia los fenómenos en los que intervienen el calor junto con la electricidad. Un dispositivo termoeléctrico es considerado aquel capaz de transformar el calor en electricidad y viceversa, este comportamiento se conoce gracias a los estudios de grandes científicos cuyos trabajos han sentado las bases de la termoelectricidad.

Uno de los fenómenos conocidos es la aparición de una corriente eléctrica debida a la aplicación de calor en el seno de la unión de dos materiales de diferente naturaleza. Si dos alambres de diferente material son unidos y calentados, una de las uniones mantiene una temperatura superior a la otra. Este tipo de circuito se denomina termopar y en estas condiciones se produce una diferencia de tensión que hace circular una corriente eléctrica entre las uniones. Este fenómeno fue observado y estudiado en 1821 por Thomas Seebeck, físico alemán que le da nombre a este fenómeno quien además aportó investigaciones de este efecto en semiconductores minerales.

Se observó que cuando una corriente fluye a través de un circuito compuesto por materiales de diferente naturaleza cuya unión está a la misma temperatura, uno de ellos absorbe calor mientras que el otro lo desprende. Este fenómeno fue descubierto en 1833 por Jean Peltier, físico francés a quien se le debe el nombre de este fenómeno conocido como efecto Peltier.

Otro investigador como Sir. William Thompson también conocido como Lord Kelvin quien junto con James Prescott Joule investigó en 1852 el efecto conocido como Joule-Thompson. Kelvin en sus trabajos dedujo las relaciones que permiten interpretar conjuntamente los efectos Seebeck, Peltier y Thompson.

La deducción de la posible reversibilidad de estos efectos hace que el abanico de aplicaciones de la termoelectricidad sea digno de estudiar. Cabe decir que fue Lenz quien concluyo que dependiendo de la dirección de la corriente el calor era absorbido o generado en la unión de los dos conductores.

Tras los descubrimientos de los efectos citados anteriormente la termoelectricidad sufrió un lento crecimiento debido a que se estaban descubriendo cosas más interesantes como son las leyes del electromagnetismo. Otra de las causas debida a la cual la termoelectricidad no se desarrolló en el pasado fue que no existía la tecnología suficiente para poder progresar más en ese campo. En los años 30 volvió el interés por la termoelectricidad debido al descubrimiento de semiconductores sintéticos. En los años 60, la exploración espacial, así como la búsqueda de recursos en lugares hostiles, requirieron de fuentes de potencia autónomas. La termoelectricidad fue una tecnología que se adaptaba de forma ideal a estos casos ya que al carecer de partes móviles era más robusta y reducía el trabajo de mantenimiento. El crecimiento del precio del petróleo en 1974 y el interés por la generación de energía limpia surgido durante los 80 favoreció el desarrollo fuentes de energía alternativas tales como la producción de energía a partir del calor residual. En los últimos 15 años ha habido un gran aumento de las investigaciones en termoelectricidad [2].

2.1 Materiales

La búsqueda de sistemas alternativos de generación de energía es un tema muy presente en diversos ámbitos como el científico o medioambiental debido a los múltiples beneficios que acarrea.

La termoelectricidad puede ser una alternativa al tradicional uso de combustibles fósiles o de otras fuentes que se usen para producir pequeñas cantidades de energía. Sin embargo, es un campo que está en proceso de investigación y desarrollo. El elemento fundamental para la implementación de generadores son los módulos termoelectricos, elementos formados por dos placas de cerámica en cuyo interior se halla un material semiconductor capaz de transformar el calor en energía eléctrica y viceversa. Aquí es donde se halla una de las principales líneas en proceso de investigación que permitan responde a la pregunta, ¿qué materiales son los adecuados para conseguir que el funcionamiento de los módulos de generación termoelectrica se realice de la mejor forma posible? Este hecho lleva a plantearse diversas cuestiones más detalladas acerca del funcionamiento de un módulo, cuestiones que serán explicadas en capítulos posteriores. Sin embargo, hay que prestar atención en concreto a una, ella es el rendimiento (expresión 5.1). Dicha expresión depende del producto ZT , donde T es la temperatura de trabajo y Z es la denominada como figura de mérito. La búsqueda de los materiales adecuados se centra en conseguir materiales que permitan tener un elevado producto ZT , los utilizados actualmente rondan la unidad. En la figura mostrada a continuación se puede ver la variación de este producto con respecto a la temperatura de trabajo T que es una media entre la temperatura de la cara caliente y fría del módulo.

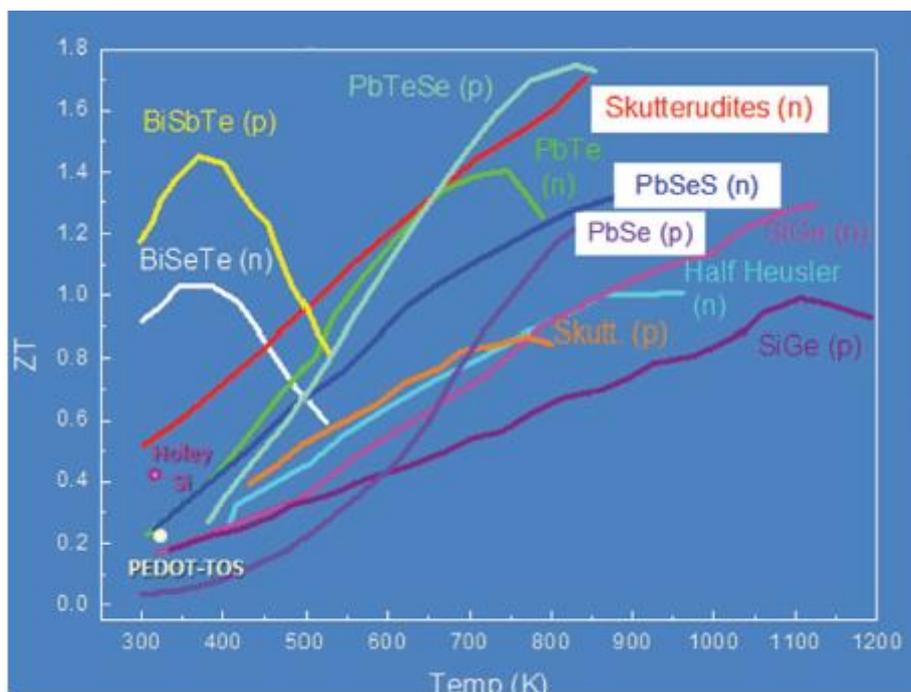


Figura 2.1 Valores de producto ZT en función de la temperatura de trabajo para diferentes materiales.

2.2 Aplicaciones

A continuación, se presentan distintos ámbitos en los cuales la termoelectricidad está presente hoy en día.

2.2.1 Aplicaciones Industriales

Muchos de los procesos industriales implican procesos térmicos en los cuales se emite un gran volumen de calor residual a la atmosfera, calor que no puede ser aprovechado por las

tecnologías tradicionales de conversión de energía debido a las bajas temperaturas que presentan. En este marco se presenta la posibilidad de implementar generadores termoeléctricos que permitan utilizar el calor residual producido por cualquiera de estos procesos para la generación de energía eléctrica.

El grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Pública de Navarra ya está trabajando en un prototipo de generador que intenta aprovechar el calor residual desprendido por los humos de una chimenea que simula un proceso térmico a partir de la combustión de gas natural.

2.2.2 Aplicaciones aeroespaciales

Las condiciones hostiles que implican la exploración espacial, así como la necesidad de una fuente de energía eléctrica fiable y duradera han hecho que se investiguen diferentes sistemas de generación.

Sondas espaciales utilizadas por la NASA como la Voyager 1 y 2, cuyas misiones fueron fotografiar los anillos de Saturno iban equipadas con Generadores Termoeléctricos de Radioisótopos o RTGs. Estos constan de dos partes: una fuente de calor que proviene del uso de un material radioactivo y de un sistema para convertir el calor en electricidad. [3]

2.3 Disipadores de calor

Los disipadores de calor son elementos esenciales en los sistemas de generación termoeléctricos pues consiguen aumentar el área efectiva de intercambio de calor de los módulos que se encuentra muy concentrada debido a su tamaño. El consiguiente aumento lleva consigo una mejora en el comportamiento de los módulos pues se consigue una mayor diferencia de temperaturas entre las caras del mismo lo cual hace que a su vez aumente su eficiencia. Es por ello que en sistemas de generación se deberán colocar intercambiadores de calor en ambas caras de los módulos, en este apartado se procederá a describir las diferentes tecnologías que existen para realizar este cometido.

2.3.1 Disipador de aletas

Un disipador de aletas es un dispositivo de base rectangular en la cual se adhieren unas placas rectangulares espaciadas una determinada distancia. Lo que se consigue con esta geometría es mejorar la transmisión de calor por convección ya que se aumenta de manera significativa el área de intercambio.

Pueden utilizarse ventiladores o sistemas de canalización de fluidos cuya función es favorecer el intercambio de calor, aumentando el coeficiente de convección en el primer caso.

La adición de otros elementos que requieran de un consumo adicional de energía perjudicará a la eficiencia global del sistema haciendo que sea necesario un mantenimiento o un aporte de energía para que este cumpla correctamente su cometido.

A la hora de utilizar un disipador de aletas con módulos termoeléctricos, se puede intuir que el calor que proviene de la superficie del módulo debe transferirse a una superficie mayor como es la cara del disipador. Esta diferencia provoca la aparición de una resistencia de constricción y por tanto que el calor no se distribuya de forma uniforme por toda la base del disipador como se aprecia en la figura 2.2.

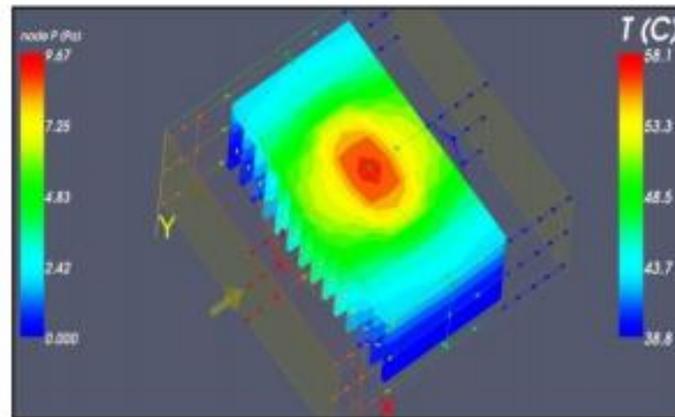


Figura 2.2 Distribución de calor de un módulo termoelectrico sobre la superficie de un disipador de aletas.

2.3.2 Heat-pipes

Un Heat-pipe es un disipador formado por tubos en cuyo interior se halla un material poroso y un fluido refrigerante. Colocado sobre una fuente de calor, esta calienta el fluido refrigerante que se evapora en un tramo de tubo. Al alcanzar una determinada zona del tubo que posee material poroso se produce la condensación del vapor por capilaridad haciendo que el fluido condensado retorne a través de dicho material nuevamente al inicio del tubo para repetir el ciclo [4].

La utilización del calor latente de cambio de fase hace que la eficiencia de este dispositivo sea elevada pues se trata de un mecanismo de térmico que requiere de una elevada cantidad de calor.

Son dispositivos que presentan una elevada área de transferencia de calor y ocupan poco volumen, es decir, se trata de un dispositivo compacto. Además, se ven favorecidos por el uso del mecanismo de cambio de fase para realizar su labor.

La desventaja que presentan estos sistemas es que son complejos en construcción y diseño, por tanto, son caros y muchas veces necesitan de la adición de ventiladores para disipar el calor de los tubos al ambiente.

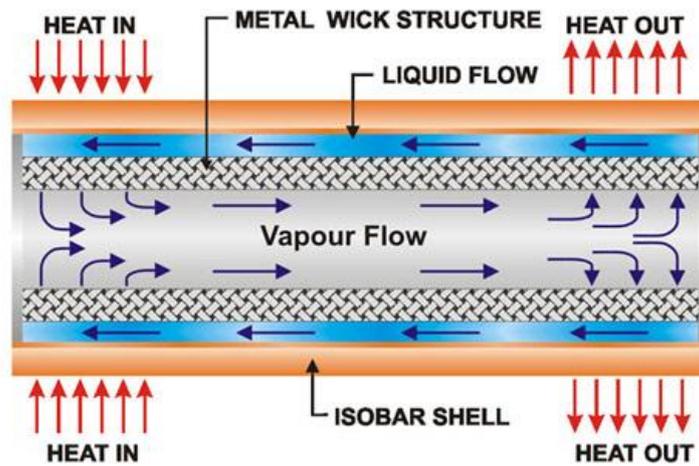


Figura 2.3 Esquema de las partes y el funcionamiento de un Heat-pipe.

2.3.3 Termosifón

El termosifón es un dispositivo que consta de un calderín, una red de tubos con aletas dispuestos de una forma determinada y de un fluido de trabajo. Colocada la fuente de calor en el calderín, donde se almacena el fluido de trabajo, se produce la evaporación del fluido y se inicia el recorrido del mismo a través de los tubos. La disposición de los tubos hace que, una vez se ha condensado el vapor a lo largo de estos, el fluido retorne al calderín por acción de la gravedad.

Las ventajas que presenta este sistema son el uso del calor latente de cambio de fase y el carecer de partes móviles, pues hacen que la eficiencia del sistema sea elevada además de dotarle de una gran robustez. Es menos complejo que el Heat-pipe pues no requiere de un material poroso para su funcionamiento.

Gracias a que los tubos poseen aletas, el área de transmisión de calor que presenta este sistema es muy elevada.

Este tipo de intercambiador es el que va a ser estudiado en el desarrollo de este proyecto para poder aplicarlo en sistemas de generación termoeléctricos, por ello se deberá conocer su funcionamiento.

3 MOTIVACIÓN

La principal motivación por la cual se lleva a cabo este proyecto es conocer de forma experimental el comportamiento de un termosifón con el fin de validar un modelo computacional creado por el *Grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Dicho modelo se está desarrollando con el objetivo de predecir el comportamiento de este tipo de intercambiadores y poder incluirlo en un modelo más grande que se utilizará para simular un sistema de generación termoeléctrica.

El proyecto en el que están enmarcados estos desarrollos pertenece al Programa Estatal de Investigación Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la sociedad del Ministerio de Economía y Competitividad. Con código *DPI2014-53158-R* y de título: *“Sistemas de generación eléctrica a partir de calor residual: aplicación al aprovechamiento de los humos en chimeneas domésticas e industriales”*, este proyecto tiene el propósito de desarrollar un modelo que permita diseñar correctamente un intercambiador, del mismo tipo que el citado anteriormente, para construir un prototipo completo de un sistema de generación termoeléctrica.

Por tanto, se ve esencial la necesidad de comprender el funcionamiento de un tipo de intercambiador de calor como el presentado en este trabajo, caracterizar su comportamiento y ver si es posible combinarlo con sistemas de generación termoeléctrica, mejorando los resultados obtenidos con otros intercambiadores habituales como son los disipadores de aletas.

4 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es caracterizar el comportamiento de un intercambiador de calor con sistema termosifón con el fin de poder implementar dicho comportamiento en un modelo computacional que se empleará para la simulación de un sistema de generación termoeléctrica.

Los objetivos específicos planteados para el desarrollo de este proyecto han sido:

1. Comprender el funcionamiento del termosifón y de cada una de las partes que lo conforman.
2. Aprender a realizar el correcto montaje y desmontaje de los ensayos.
3. Caracterizar el comportamiento del termosifón en los diferentes ensayos planteados.
4. Conocer el comportamiento de un módulo termoeléctrico en un ensayo de generación.
5. Obtener valores coherentes que permitan validar el modelo computacional del intercambiador.

5 GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA

Un generador termoeléctrico puede definirse como un sistema formado por uno o varios módulos termoeléctricos capaces de transformar la energía calorífica en energía eléctrica. Este proyecto se desarrolla con el objetivo de optimizar la generación de electricidad aprovechando el calor residual para dicha generación. Calor residual es aquel que se obtiene como el subproducto de un proceso el cual no es aprovechado con posterioridad, sino que es emitido al ambiente. Lo que se quiere lograr es generar energía utilizando, por ejemplo, el calor residual de una chimenea, ya sea de origen doméstico o industrial.

El funcionamiento del sistema es el siguiente, parte del calor proveniente del foco caliente (\dot{Q}_H) es transformado en energía eléctrica (\dot{W}_{TEM}) mientras que el resto del calor es disipado al foco frío (\dot{Q}_C), habitualmente el ambiente empleando un disipador.

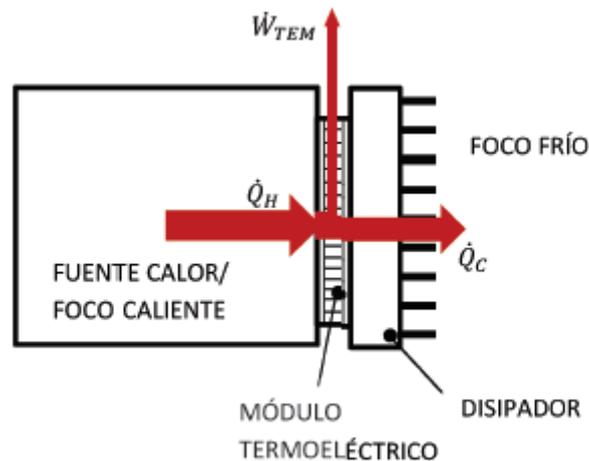


Figura 5.1 Generador termoeléctrico [2].

El elemento fundamental para la generación es el módulo termoeléctrico, ya que es a través del cual se genera energía eléctrica a partir del calor debido al efecto Seebeck. Un módulo está compuesto de varios pares termoeléctricos, conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Cada par está compuesto, a su vez, de dos termoelementos, uno de tipo n (electrones libres predominantes) y otro de tipo p (huecos libres predominantes). Ambos elementos están unidos a través de uniones metálicas. Dos placas rígidas de cerámica confieren resistencia mecánica al conjunto de termopares y lo aíslan eléctricamente del exterior. Un módulo termoeléctrico puede presentar entre 200 y 600 termoelementos de base cuadrada de entre 1 y 9 mm² y una altura de entre 0.5 y 3 mm. El área de la base del módulo es también cuadrada, presenta lados entre 30 y 60 mm y alturas entre 3 y 6 mm [2].

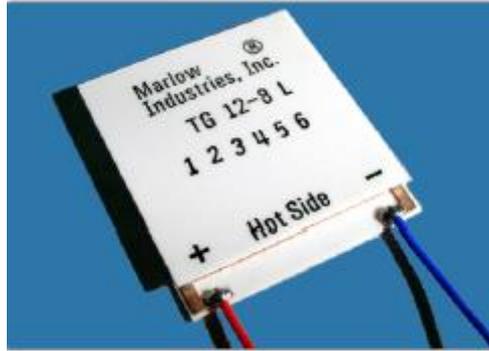


Figura 5.2 Módulo termoeléctrico Marlow.

Sea un par termoeléctrico similar al de la Figura 5.3, formado por un semiconductor de tipo n y otro de tipo p con similares conductividades eléctricas, térmicas y con un mismo coeficiente Seebeck cuyas uniones caliente y fría se encuentran a una temperatura T_c y T_f respectivamente. Considérese que la temperatura T de trabajo es la media de las dos anteriores y despréciase el efecto de las uniones entre semiconductores, entonces el rendimiento de generación de energía ($\eta(\%)$) vendrá expresado por la Ecuación 5.1 [5]. Esta expresión surge del producto del rendimiento de Carnot y el rendimiento específico de la aplicación, representado por el parámetro Z llamado Figura de mérito mostrado por la ecuación 5.2. La utilización de esta expresión lleva consigo la asunción de diversas simplificaciones que no siempre pueden realizarse, por ello surge la necesidad de realizar modelos computacionales que simulen el comportamiento de los generadores y que tengan en cuenta todas las variables que afectan a su comportamiento.

$$\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (5.1)$$

$$Z = \alpha^2 / \rho k \quad (5.2)$$

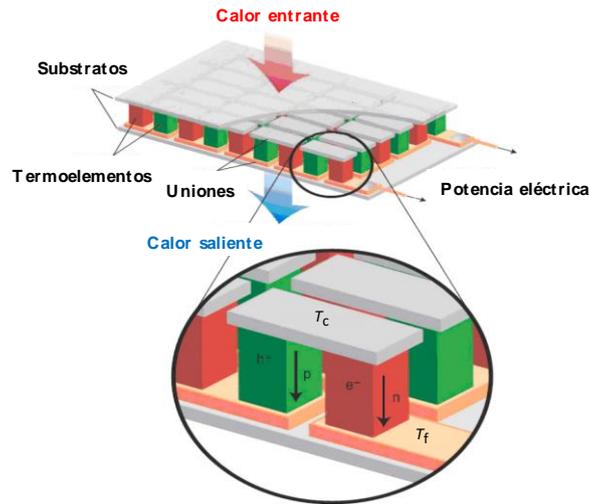


Figura 5.3 Modulo termoelectrico y detalle de un par termoelectrico.

5.1 Efectos Termoelectricos

A continuacion, se describen los efectos termoelectricos que rigen el comportamiento de un generador termoelectrico.

5.1.1 Efecto Seebeck

Thomas J. Seebeck descubrio que, en un circuito formado por dos metales distintos homogeneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, T y $T+\Delta T$, aparece una densidad de corriente electrica J si el circuito esta cerrado, o bien, si se abre el circuito, una fuerza termoelectromotriz (f.t.e.m.) E_{AB} que depende de los metales utilizados en la union y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones.

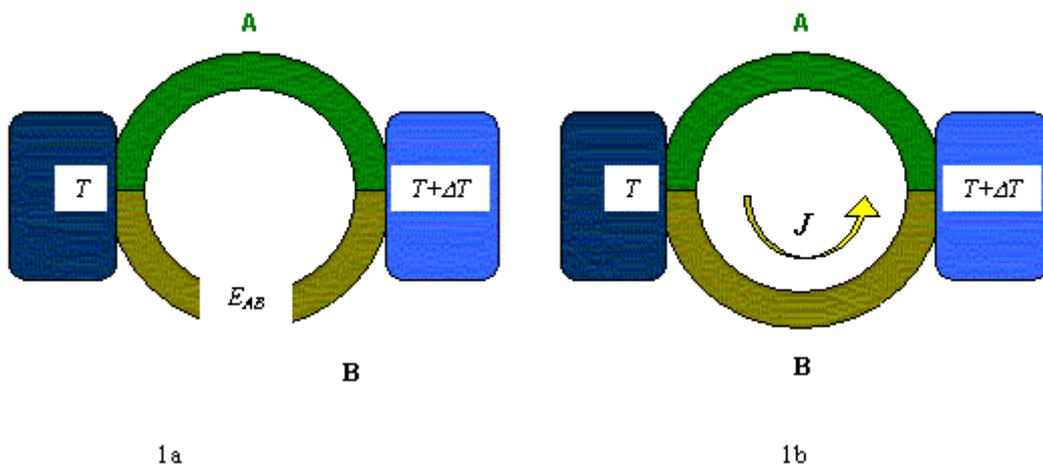


Figura 5.4 Par termoelectrico (1a) Aparece una diferencia de potencial E_{AB} (1b) Aparece una densidad de corriente.

La relación entre la f.t.e.m., E_{AB} , y la diferencia de temperaturas entre las uniones, T , define el coeficiente Seebeck, α_{AB} [6]:

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A - \alpha_B \quad (5.3)$$

Donde:

- α_A : Potencias termoeléctricas o coeficientes Seebeck absoluta del material A.
- α_B : Potencias termoeléctricas o coeficientes Seebeck absoluta del material B.

5.1.2 Efecto Peltier

El efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión entre dos conductores diferentes al pasar una corriente eléctrica por ella. Este enfriamiento o calentamiento depende exclusivamente de la composición y temperatura de la unión.

La potencia calorífica intercambiada en la unión entre A y B es [7]:

$$\dot{Q}_P = \pm \pi_{AB} I = \pm IT (\alpha_B - \alpha_A) \quad (5.4)$$

El término π_{AB} es el llamado coeficiente Peltier, que se define como el calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula a través de la misma:

$$\pi_{AB} = \frac{\dot{Q}_P}{\int_S J dS} = T (\alpha_B - \alpha_A) \quad (5.5)$$

Donde:

- J : Densidad de corriente eléctrica
- S : Superficie
- T : Temperatura absoluta
- α_A, α_B : Coeficiente Seebeck de los materiales A y B

5.1.3 Efecto Thomson

El efecto Thomson consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo con una distribución de temperaturas no homogénea, por el que circula una corriente [7]:

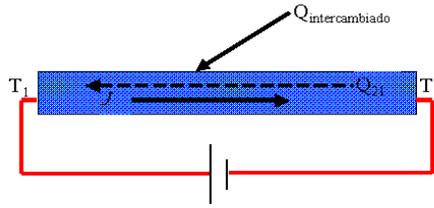


Figura 5.5 Esquema de conductor sometido a un gradiente de temperatura por el que circula una densidad de corriente J .

$$\dot{q}_T = \sigma \cdot \nabla T \cdot J \quad (5.6)$$

Donde:

- \dot{q}_T : Flujo de calor por unidad de volumen generado por efecto Thomson
- σ : Coeficiente Thomson
- ∇T : Gradiente de temperatura en el conductor
- J : Densidad de corriente eléctrica

Desarrollando esta expresión para obtener la relación entre el coeficiente Thomson y Seebeck y teniendo en cuenta las ecuaciones que rigen los efectos Peltier y Seebeck, se llega a [8]:

$$\sigma \equiv \frac{\dot{q}_T}{\nabla T \cdot J} = -T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (5.7)$$

Quedando para la unión:

$$\sigma_A - \sigma_B = T \frac{\partial \alpha_A}{\partial T} - T \frac{\partial \alpha_B}{\partial T} = T \frac{\partial}{\partial T} (\alpha_A - \alpha_B) \quad (5.8)$$

5.1.4 Efecto Joule

El efecto Joule, es la interacción más conocida dentro de los fenómenos termoeléctricos y consisten en el calentamiento de un conductor por el que circula corriente eléctrica debido a que la materia presenta cierta 'resistencia' al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor [9]:

$$\dot{Q}_J = R_0 * I^2 \quad (5.9)$$

Donde:

- \dot{Q}_J : Flujo de calor producido por efecto Joule
- R_0 : Resistencia eléctrica del material
- I : Intensidad de corriente que circula

5.1.5 Ecuaciones de Kelvin

Considerando el circuito de la Figura 5.4 formado por dos conductores A y B con uniones firmes en sus extremos a temperaturas T y $T+\Delta T$, donde se establece una corriente eléctrica entre ambas uniones (efecto Seebeck). Para el caso en el cual la corriente que circula es suficientemente pequeña, tal que se puede despreciar la generación de calor por efecto Joule y que no se considera la conducción térmica (efecto Fourier), Lord Kelvin dedujo, aplicando el primer principio de la termodinámica y el segundo principio para procesos reversibles, las relaciones de interacción termoeléctrica que llevan su nombre:

Primera ecuación:

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{\partial^2 E_{AB}}{\partial T^2} \quad (5.10)$$

Segunda ecuación:

$$\pi_{AB} = T \frac{\partial E_{AB}}{\partial T} \quad (5.11)$$

Estas relaciones son válidas para los efectos reversibles, sin embargo, dichos efectos están íntimamente ligados a los efectos irreversibles.

5.2 Definición del funcionamiento de un par termoeléctrico

Un par termoeléctrico como ya se ha mencionado antes es la unión de dos materiales semiconductores, uno de tipo n y otro de tipo p , mediante una unión metálica o una soldadura. Así pues, se presentan continuación el conjunto de expresiones que rigen el comportamiento de un par y finalmente se adecúan para el caso de un módulo termoeléctrico completo.

Se consideran las siguientes hipótesis:

1. Todos los materiales que forman parte del par termoeléctrico son homogéneos.
2. El aislamiento del circuito eléctrico es perfecto y la corriente eléctrica es unidimensional.
3. El flujo de calor también es unidimensional. Se supone que el par está aislado térmicamente excepto en la unión metálica, donde hay entradas y salidas de flujos de calor.
4. Las siguientes variables dependen de la temperatura:
 - α : Coeficiente Seebeck
 - k : Conductividad térmica

- ρ : Resistividad eléctrica
- σ : Coeficiente Thomson

5. Los subíndices p, n se refieren al semiconductor p y al semiconductor n respectivamente.
6. Los subíndices h, c se refieren al extremo caliente (h de hot) y al extremo frío (c de cold) de cada semiconductor.

Si la unión mostrada en la Figura 5.6 se mantiene a una temperatura caliente T_h mientras que los otros extremos de los semiconductores se mantienen a una temperatura más fría T_c , se produce una pequeña fuerza electromotriz E_t cuya expresión es:

$$E_t = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) \cdot T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) \cdot T_c + (\sigma_p - \sigma_n) \cdot (T_h - T_c) \quad (5.12)$$

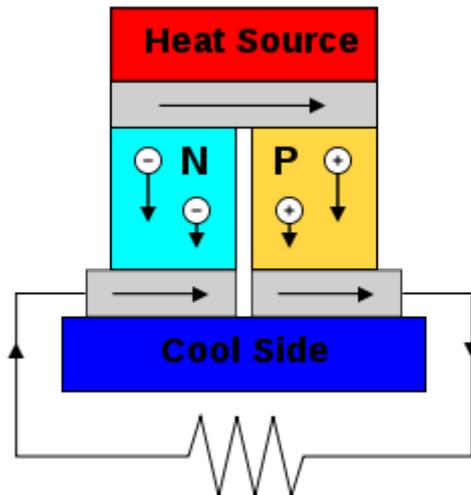


Figura 5.6 Esquema de un termopar.

Para que la superficie caliente mantenga su temperatura es necesario que desde una fuente de calor le llegue a esta un flujo de calor \dot{Q}_h y lo mismo ocurre con la superficie fría, existiendo en ella una cesión de calor \dot{Q}_c hacia el exterior.

Cerrando el circuito mediante la conexión de una resistencia de carga R_L y aplicando la teoría de circuitos se puede lograr una analogía eléctrica del conjunto tal y como se ve en la Figura 5.7.

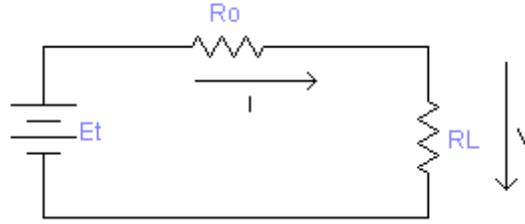


Figura 5.7 Circuito eléctrico equivalente de un termopar conectado a una resistencia de carga.

Donde:

- R_L : Resistencia de carga
- R_0 : Resistencia eléctrica propia del elemento termoeléctrico
- V : Diferencia de potencial en la resistencia de carga R_L
- I : Intensidad de corriente que circula por el circuito

R_0 Está formado por la resistencia eléctrica en el semiconductor n , la resistencia eléctrica en el semiconductor p y la resistencia eléctrica de los cuatro contactos semiconductor-material de unión [10]. Las dos primeras son fáciles de deducir mientras que la última es más compleja porque no se refiere a la resistencia eléctrica del material de unión sino a la que se opone al paso de la corriente desde un material semiconductor a un material conductor:

$$R_0 = R_p + R_n + R_{uniones} = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \quad (5.13)$$

Donde:

L : Longitud de cada semiconductor

A : Área transversal de cada semiconductor

$\rho_{unión}^{superficial}$: Resistividad eléctrica superficial de cada unión semiconductor-conductor

Sea el factor adimensional $m = R_L/R_0$ y aplicando teoría de circuitos se puede deducir el valor de la diferencia de potencial V , la intensidad de corriente I y la potencia P consumida por la resistencia de carga:

$$V = E_t \cdot \frac{R_L}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \cdot \frac{m}{m + 1} \quad (5.14)$$

$$I = E_t \cdot \frac{1}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \cdot \frac{1}{R_0(m + 1)} \quad (5.15)$$

$$P = E_t^2 \cdot \frac{R_L}{(R_L + R_0)^2} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 \cdot \frac{m}{R_0(m + 1)^2} \quad (5.16)$$

Aplicando el primer principio de la termodinámica al termopar, se obtiene [11] [12]:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + P \quad (5.17)$$

Debido al efecto Peltier, al pasar la corriente generada a través del circuito, se produce una absorción de calor en la unión que se encuentra a una temperatura más alta como se muestra a continuación:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h I \quad (5.18)$$

En la unión fría sucede una cesión de calor denotada por:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c I \quad (5.19)$$

Se deben tener en consideración las pérdidas por efecto Joule cuyo valor viene dado por la ecuación 5.20 que engloba a las pérdidas producidas en cada uno de los semiconductores y las producidas en las uniones:

$$\dot{Q}_{Joule} = I^2 \cdot R_0 = I^2 \cdot \left(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.20)$$

Las pérdidas de calor por efecto Joule en las uniones de los semiconductores presentes en la superficie caliente y fría vienen dadas por:

$$\dot{Q}_{contacto,h} = I^2 \cdot \left(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.21)$$

$$\dot{Q}_{contacto,c} = I^2 \cdot \left(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.22)$$

Debido al efecto Thomson puede aparecer una cesión o una absorción de calor en los semiconductores. Fijándose en la Figura 5.6, en el semiconductor p el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen sentidos contrarios. Si el coeficiente Thomson σ_p es positivo, en el semiconductor p se absorbe un flujo de calor. Por otro lado, en el semiconductor de tipo n el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen el mismo sentido, por ello el coeficiente Thomson σ_n es positivo generando una cantidad de calor tal y como se puede ver en las ecuaciones 5.23 y 5.24 [5]:

$$\dot{Q}_{Thomson,p} = \sigma_p(T_h - T_c) \cdot I \quad (5.23)$$

$$\dot{Q}_{Thomson,n} = \sigma_n(T_h - T_c) \cdot I \quad (5.24)$$

La generación neta de calor por efecto Thomson se obtiene sumando ambas ecuaciones:

$$\dot{Q}_{Thomson} = (\sigma_n - \sigma_p)(T_h - T_c) \cdot I \quad (5.25)$$

5.3 Definición del funcionamiento de un módulo termoelectrico

Un módulo termoelectrico es un dispositivo formado por numerosos pares termoelectricos o termopares de los que se hablaba en la introducción de este capítulo 5 y cuyo funcionamiento se explicaba en el apartado anterior. Estos se hallan conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, además todo el conjunto queda envuelto por dos sustratos de cerámica colocados a ambos lados de los termopares que dotan a este conjunto de una rigidez mecánica y un aislamiento eléctrico del mismo respecto del exterior.

Basándose en los desarrollos explicados en el apartado anterior se procede a explicar el funcionamiento de un módulo completo actuando como generador.

Considérese una fuente de calor colocada directamente sobre una de las caras de un módulo, que recibe un flujo de calor constante \dot{Q}_h . Este flujo hace que las uniones interiores de esta cara permanezcan a una temperatura T_h . Por el lado contrario las uniones metálicas interiores de esa cara mantienen una temperatura T_c emitiendo un flujo de calor \dot{Q}_c

Para que la superficie caliente mantenga su temperatura es necesario que desde una fuente de calor llegue a esta un flujo de calor \dot{Q}_h y lo mismo ocurre con la superficie fría, existiendo en ella una cesión de calor \dot{Q}_c hacia el exterior. En estas condiciones se produce una fuerza electromotriz cuyo valor viene definido por una expresión ya detallada con anterioridad. Sin embargo, todas las expresiones detalladas anteriormente se van a ver modificadas por el hecho de que un módulo está compuesto por N pares termoelectricos, lo cual deja a las expresiones detalladas para el comportamiento de un termopar de la siguiente forma:

$$E_t = N \cdot [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) \cdot T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) \cdot T_c + (\sigma_p - \sigma_n) \cdot (T_h - T_c)] \quad (5.26)$$

$$R_0 = N \cdot (R_p + R_n + R_{uniones}) = N \cdot \left(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + 2 \cdot \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.27)$$

$$V = N \cdot [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \cdot \frac{m}{m+1} \quad (5.28)$$

$$I = N \cdot [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \cdot \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (5.29)$$

$$P = N^2 \cdot [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 \cdot \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (5.30)$$

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = N \cdot (\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h I \quad (5.31)$$

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = N \cdot (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c I \quad (5.32)$$

$$\dot{Q}_{Joule} = N \cdot I^2 \cdot R_0 \quad (5.33)$$

$$\dot{Q}_{contacto,h} = N \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.34)$$

$$\dot{Q}_{contacto,c} = N \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (5.35)$$

$$\dot{Q}_{Thomson} = N \cdot (\sigma_n - \sigma_p)(T_h - T_c) \cdot I \quad (5.36)$$

5.4 Particularización de las ecuaciones para un módulo común

Ciertos parámetros mencionados en los apartados previos pueden simplificarse debido a que en los módulos termoeléctricos comerciales se cumplen una serie de características que lo permiten.

Usualmente los semiconductores de tipo p y n que conforman los termopares de un módulo poseen la misma longitud y la misma área transversal, esto lleva a asumir las siguientes simplificaciones:

1. $L_p = L_n = L$
2. $A_p = A_n = A$

El material del que están hechos las uniones del lado caliente y frío de los termopares suele ser también el mismo, esto produce que $\rho_{\text{unión,p}}^{\text{superficial}} = \rho_{\text{unión,n}}^{\text{superficial}} = \rho_{\text{unión}}^{\text{superficial}}$.

Se puede realizar una simplificación que afecta a los materiales semiconductores, como normalmente el material semiconductor usado suele ser el mismo ya que el que sea de tipo n o p solo depende del dopado, se puede asumir sin llegar a producir un gran error que [5]:

1. $\alpha_p = -\alpha_n = \alpha$
2. $\rho_p = \rho_n = \rho$
3. $k_p = k_n = k$
4. $\sigma_p = -\sigma_n = \sigma$

Con las simplificaciones mencionadas, se desarrollan nuevamente las ecuaciones que rigen el comportamiento de un módulo termoeléctrico de la siguiente forma:

$$E_t = 2 \cdot N \cdot [\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma|(T_h - T_c)] \quad (5.37)$$

$$R_0 = 2 \cdot N \cdot \left(\rho \frac{L}{A} + 2 \cdot \frac{\rho^{\text{superficial}}}{A} \right) \quad (5.38)$$

$$V = 2 \cdot N \cdot [\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma|(T_h - T_c)] \cdot \frac{m}{m+1} \quad (5.39)$$

$$I = 2 \cdot N \cdot [\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma|(T_h - T_c)] \cdot \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (5.40)$$

$$P = 4 \cdot N^2 \cdot [\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma|(T_h - T_c)]^2 \cdot \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (5.41)$$

$$\dot{Q}_{\text{Peltier,h}} = 2 \cdot N \cdot \alpha_h T_h I \quad (5.42)$$

$$\dot{Q}_{\text{Peltier,c}} = 2 \cdot N \cdot \alpha_c T_c I \quad (5.43)$$

$$\dot{Q}_{\text{Joule}} = 2 \cdot N \cdot I^2 \rho \frac{L}{A} \quad (5.44)$$

$$\dot{Q}_{contacto,h} = 2 \cdot N \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_{uni3n}^{superficial}}{A} \quad (5.45)$$

$$\dot{Q}_{contacto,c} = 2 \cdot N \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_{uni3n}^{superficial}}{A} \quad (5.46)$$

$$\dot{Q}_{Thomson} = 2 \cdot N \cdot |\sigma| (T_h - T_c) \cdot I \quad (5.47)$$

6 TERMOSIFÓN

Este es el capítulo más importante de este proyecto pues se va proceder a la descripción del dispositivo empleado para realizar los ensayos, así como a una interpretación de los resultados obtenidos.

Primero, se empezará dando una definición genérica del sistema termosifón para posteriormente explicar su funcionamiento a nivel teórico y matemático.

En otro apartado, se explicará la metodología y la forma de proceder elegida para realizar los ensayos. Es muy importante describir con detalle la realización del trabajo en el laboratorio, las variables de control o inputs empleados y cuáles fueron las obtenidas u outputs. El conocimiento de todos los aspectos que pudieran afectar de forma directa o indirecta al transcurrir de los ensayos facilitará en cierta medida la correcta interpretación de los resultados.

Por último, se mostrará un apartado donde se expondrán los datos obtenidos de los ensayos, la interpretación de los mismos seguida de un análisis que explicará cuales pudieron haber sido las causas o fenómenos que propiciasen la obtención de dichos resultados.

6.1 Descripción del sistema termosifón

A continuación, se procede a realizar la descripción teórica y matemática del dispositivo de manera extendida indicando sus componentes, las expresiones físicas que rigen su comportamiento y mostrando el prototipo empleado.

6.1.1 Descripción Teórica

El intercambiador de calor ensayado para el desarrollo de este proyecto se basa en el efecto termosifón, efecto a partir del cual recibe su nombre. El efecto termosifón es como se conoce al desplazamiento de fluidos producido por un cambio de densidades debido a una variación de la temperatura de los mismos. Este efecto puede ser de interés para diferentes aplicaciones, siendo una de ellas el intercambio de calor.

Un termosifón es un intercambiador de calor con cambio de fase que consta de: un calderín que almacena el líquido refrigerante, tubos por los que circula el refrigerante en el interior de los cuales se produce el cambio de fase, y de aletas adheridas a los tubos para favorecer el intercambio de calor que propicia el cambio de fase mencionado. El funcionamiento de este intercambiador de calor es similar al de un Heat-pipe con la diferencia de que este no presenta un material poroso para el guiado de retorno del fluido, sino que emplea únicamente la gravedad.

El fluido refrigerante es calentado debido al calor que le aporta el foco caliente sobre el que está colocado, este calentamiento hace que el fluido ebulle y se desplace por los tubos del intercambiador. Cuando el fluido llega a la zona de tubos que poseen aletas, va perdiendo calor lo cual propicia nuevamente un cambio de fase que hace que se condense. Ocurrido esto, el líquido refrigerante vuelve al calderín gracias a la acción de la gravedad donde comenzará otra vez el mismo ciclo descrito. Para que el ciclo funcione correctamente ha de existir una diferencia de altura geométrica en el recorrido de los tubos.

6.1.2 Modelizado Matemático

En este apartado se presentan las expresiones que modelan el comportamiento de un intercambiador de calor con sistema termosifón y cambio de fase, a través de las cuales se pueden calcular los coeficientes de intercambio de calor que se dan en las distintas partes que lo componen. A través del conocimiento de estos coeficientes se puede calcular de forma teórica parámetros del intercambiador que proporcionarán datos para el desarrollo de este proyecto.

Los tres mecanismos de transmisión de calor que se producen de forma simultánea en un termosifón son: ebullición, condensación y convección natural. Utilizando la analogía eléctrica se muestra en la figura 6.1 el esquema de resistencias correspondientes a los mecanismos que se dan en el termosifón para intentar explicar la transmisión del calor.

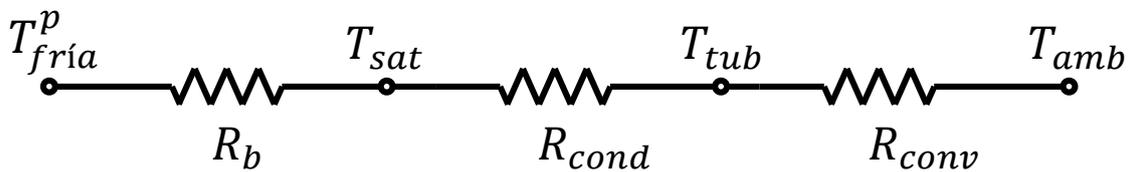


Figura 6.1 Esquema de la analogía eléctrica del termosifón.

Existen otros mecanismos de transmisión de calor que no se han indicado en la figura anterior ya que su efecto es menor frente a los mencionados. Ellos serían: el contacto entre la cara de un módulo y el calderín, modelizado siguiendo la analogía como una resistencia de contacto, los efectos de constricción, la conducción a través de la base del calderín o la conducción de calor a través de las paredes interna y externa del tubo. Teniendo en cuenta todos habría que plantear un nuevo esquema de resistencias bastante más complejo que el de la figura 6.1.

Para proceder al cálculo de cada de las resistencias térmicas de cada una de las partes que componen el termosifón se emplea la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{1}{A \cdot h_i} \quad (6.1)$$

Tal y como muestra la ecuación, la resistencia térmica depende del área y el coeficiente de transmisión de calor asociado a cada parte. Estos coeficientes de calor se calculan aplicando las expresiones de naturaleza empírica que se presentan en los siguientes apartados.

6.1.2.1 Ebullición

El coeficiente de transmisión de calor en la zona de ebullición se calcula de acuerdo a la ecuación 6.2, una correlación desarrollada por Foster y Zuber en 1955 [13]:

$$h_b = \frac{0,00122 \Delta T_{sat}^{0,24} \Delta P_{sat}^{0,75} c_{pl}^{0,45} \rho_l^{0,49} k_l^{0,79}}{\sigma^{0,5} i_{lg}^{0,24} \mu_l^{0,29} \rho_g^{0,24}} \quad (6.2)$$

Donde:

- ΔT_{sat} : diferencia entre la temperatura de la pared y la de saturación, [K]
- ΔP_{sat} : aumento de la presión de saturación correspondiente a ΔT_{sat} , [Pa]
- c_{pl} : calor específico del líquido, [J/(kg·K)]
- ρ_l : densidad del líquido, [kg/m³]
- ρ_g : densidad del gas, [kg/m³]
- σ : tensión superficial, [N/m]
- k_l : conductividad térmica del líquido, [W/(m·K)]
- i_{lg} : calor latente de vaporización, [J/kg]
- μ_l : viscosidad dinámica del líquido, [Pa·s]

6.1.2.2 Condensación

La transferencia de calor por condensación tiene lugar en el interior de tubos circulares ligeramente inclinados. Para el cálculo del coeficiente de transmisión de calor que corresponde a esta zona se emplea la correlación descrita por Shah [14], en esta se diferencian 3 tipos de regímenes de transferencia de calor en el caso de tubos verticales o inclinados.

El Régimen I, correspondería a un flujo completamente turbulento en el que se cumple:

$$J_g \geq \frac{1}{2,4 \cdot Z + 0,73} \quad (6.3)$$

El Régimen III, correspondería a un flujo laminar donde se da:

$$J_g \leq 0,89 - 0,93 \cdot \exp(-0,087 \cdot Z^{-1,17}) \quad (6.4)$$

El Régimen II de transición, se considerarán el resto de casos.

La variable Z, es el parámetro de la correlación de Shah y se define tal y como muestra la ecuación 6.5.

$$Z = \left(\frac{1}{x} - 1\right)^{0,8} p_r^{0,4} \quad (6.5)$$

Donde:

- x : título
- p_r : presión reducida

El parámetro J_g , es la velocidad de vapor adimensional y se calcula según la expresión 6.6.

$$J_g = \frac{x \cdot G}{\left(g D \rho_g (\rho_l - \rho_g)\right)^{0,5}} \quad (6.6)$$

Donde:

G : flujo másico total (vapor + líquido), [kg/(m·s²)]

g : aceleración debida a la gravedad, 9,81 m/s²

D : diámetro interior del tubo, [m]

Una vez determinado el Régimen en el que se encuentra el fluido se utilizan las ecuaciones 6.7 y 6.8 para calcular el coeficiente de transmisión de calor por condensación como se indica en la tabla 6.1

$$h_l = 0,023 \cdot Re_{LT}^{0,8} Pr_f^{0,4} \left(\frac{\mu_f}{14\mu_g}\right)^{(0,0058+0,557Pr)} \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8 \cdot x^{0,76}(1-x)^{0,04}}{Pr^{0,38}}\right] \quad (6.7)$$

$$h_{Nu} = 1,32 \cdot Re_{LS}^{-1/3} \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)gk_f^3}{\mu_f^2}\right]^{1/3} \quad (6.8)$$

Donde:

Re_{LT} : número de Reynolds suponiendo que todo el flujo másico es líquido

Re_{LS} : número de Reynolds suponiendo que solo fluye la fase líquida

Pr_f : número de Prandtl del líquido

k_f : conductividad térmica del líquido, [W/(m·K)]

μ_f : viscosidad dinámica del líquido, [Pa·s]

μ_g : viscosidad dinámica del vapor, [Pa·s]

Tabla 6.1 Cálculo del coeficiente de transmisión de calor por condensación, h_{TP} según el régimen.

Régimen I	$h_{TP} = h_I$ (6. 9)
Régimen II	$h_{TP} = h_I + h_{Nu}$ (6. 10)
Régimen III	$h_{TP} = h_I + h_{Nu}$ (6. 11)

6.1.2.3 Convección natural

Tras producirse la condensación del refrigerante en el interior de los tubos, el calor se disipa al ambiente gracias a la convección natural. Para aumentar la eficiencia de este mecanismo se colocan unas aletas rectangulares a lo largo de los tubos del termosifón.

Para el cálculo de los correspondientes coeficientes de transmisión de calor se utiliza la correlación de Tsubouchi y Masuda [15], para el caso de aletas circulares sobre tubos horizontales. Como esta expresión está definida para aletas con diferente geometría habrá que utilizar un diámetro equivalente $D = 1,23 \cdot H$, siendo H la altura de las aletas rectangulares.

Se considerará la transferencia de calor desde el borde de las aletas y desde el cilindro y las aletas verticales por separado.

Para calcular el calor transferido desde el borde de las aletas se emplea la ecuación 6.12.

$$Nu = c \cdot Ra^b \quad (6. 12)$$

Siendo Ra , el número de Rayleigh definido por la ecuación 6.13 y c y b parámetros que para el caso $1,36 < D/d < 3,73$; se pueden aproximar de la siguiente manera: para el caso $b = 0,29$ y para el caso $c = 0,44 + 0,12 \cdot (D/d)$.

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_{amb})S^3}{\nu\alpha} \frac{S}{D} \quad (6. 13)$$

Donde:

- β : coeficiente de expansión térmica, $[K^{-1}]$
- T_w : temperatura de la pared, $[K]$

- T_{amb} : temperatura ambiente, [K]
 S : separación entre aletas, [m]
 ν : viscosidad cinemática, [m²/s]
 α : difusividad térmica, [m²/s]
 D : diámetro de la aleta, [m]
 d : diámetro exterior del tubo, [m]

El calor transferido desde la superficie lateral de las aletas junto con el área del tubo que las soporta se calcula usando las expresiones 6.14 y 6.15, dependiendo de si se consideran aletas altas o cortas respectivamente.

En caso de aletas altas, $1,67 < D/d < \infty$, el número de Nusselt se calcula de la siguiente forma (ecuación (6.14a)):

$$Nu = \frac{Ra}{12\pi} \left\{ 2 - \exp \left[- \left(\frac{C_1}{Ra} \right)^{3/4} \right] - \exp \left[-\beta \left(\frac{C_1}{Ra} \right)^{3/4} \right] \right\} \quad (6.14a)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,17\xi + e^{-4,8 \cdot \xi} \\ \xi &= d/D \\ C_1 &= \left[\frac{23,7 - 1,1 \cdot (1 + 152 \cdot \xi^2)^{1/2}}{1 + \beta} \right]^{4/3} \end{aligned} \quad (6.14b)$$

Para aletas cortas, $1,67 \geq D/d \geq 1$, se emplea la correlación (6.15a)

$$Nu = C_0 Ra_0^p \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{C_1}{Ra_0} \right)^{C_2} \right] \right\}^{C_3} \quad (6.15a)$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_0 &= -0,15 + 0,3 \cdot \xi + 0,32 \cdot \xi^{16} \\ C_1 &= -180 + 480 \cdot \xi - 1,4 \cdot \xi^{-8} \\ C_2 &= 0,04 + 0,9 \cdot \xi \\ C_3 &= 1,3 \cdot (1 - \xi) + 0,0017 \cdot \xi^{-12} \\ p &= 1/4 + C_2 C_3 \\ Ra_0 &= Ra/\xi \end{aligned} \quad (6.15b)$$

Evaluando, en todos los casos, las propiedades a la temperatura de la pared T_w .

6.1.3 Descripción Física del dispositivo ensayado

El prototipo de termosifón usado para el desarrollo de este proyecto consta de las principales partes ya mencionadas en el capítulo que describía de forma teórica un termosifón. Sin embargo, las posibilidades de diseño y construcción de uno pueden ser infinitas, es por ello que se va a proceder a hacer una descripción detallada de sus principales partes.

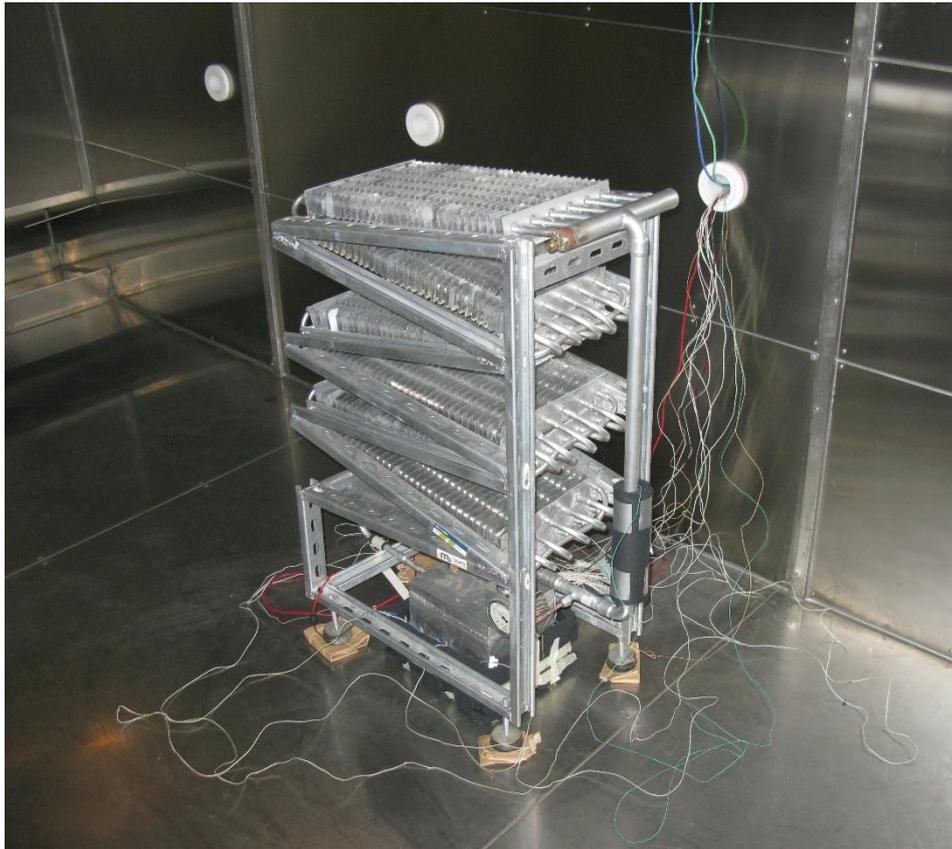


Figura 6.2 Prototipo de termosifón ensayado.

6.1.3.1 Tubos circulares

Los tubos son un elemento esencial del intercambiador pues a través de ellos circula el líquido refrigerante. Tal y como se muestra en la figura 6.2, la red de tubos parte desde el calderín y se extiende realizando un circuito siguiendo una geometría definida que termina nuevamente en el calderín. Se pueden distinguir diferentes zonas de tubos.

Por una parte, está el tubo vertical a través del cual sale el refrigerante que ha ebullo en el calderín. Este tubo lleva al vapor hasta una determinada altura haciendo que la gravedad en conjunto con las demás partes del circuito permita al fluido realizar su cometido. Se puede apreciar en la figura 6.3 como al final del tubo vertical se producen ramificación en seis tubos.



Figura 6.3 Foto del termosifón mostrando el tubo ascendente y las ramificaciones.

Por otro lado, está la red de ramificaciones a lo largo de las cuales se disponen aletas que favorecen el intercambio de calor entre el vapor de refrigerante y el ambiente. Una vez se ha condensado el vapor, la disposición inclinada de los tubos permiten que el fluido continúe intercambiando calor al mismo tiempo que sigue en sentido descendente gracias a la acción de la gravedad. Una vez llega al final del recorrido, las ramificaciones convergen nuevamente en un tubo que vierte el fluido refrigerante nuevamente en el calderín, cerrando así el ciclo que debe describir continuamente el fluido.

6.1.3.2 Aletas

Las aletas son un elemento fundamental pues mejoran la transmisión de calor ya que aumentan el área efectiva de intercambio de manera muy significativa. Las aletas de este prototipo poseen una geometría rectangular y están construidas en aluminio, material que posee una elevada conductividad térmica. Cabe recalcar que el número y la disposición de las mismas no es algo que se elija al azar, pues existen unos valores óptimos que hacen que las aletas cumplan su cometido. Un defecto o incluso un exceso en las mismas podrían provocar efectos totalmente contrarios a los deseados.



Figura 6.4 Posición y geometría de las aletas del termosifón.

6.1.3.3 Calderín

Es el espacio donde se almacena el refrigerante cuando está en estado líquido. Debe estar hecho de un material resistente que soporte las condiciones en las que se encuentra el refrigerante, puesto que para que se encuentre líquido como se ha mencionado previamente, este debe estar a una determinada presión. Por sus condiciones de funcionamiento debe estar realizado un material que conduzca el calor de forma efectiva.

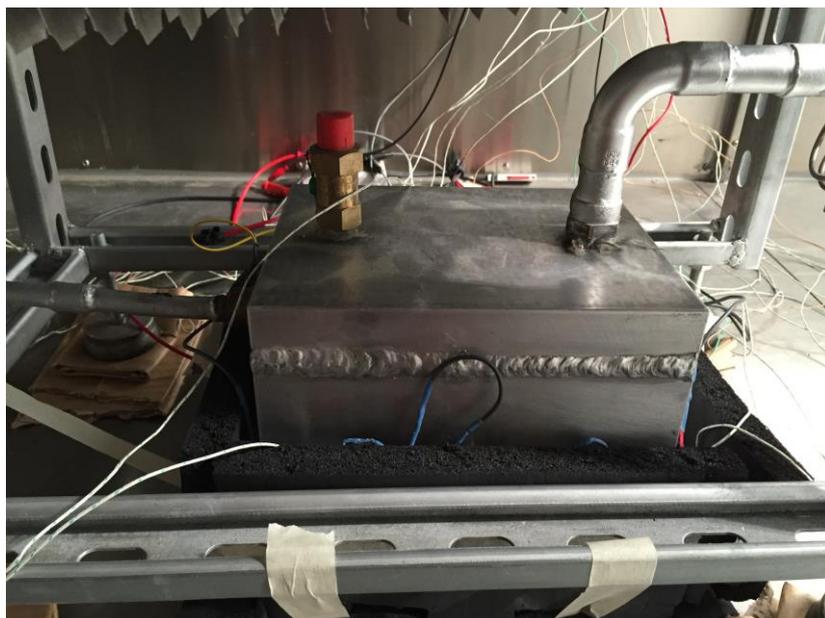


Figura 6.5 Calderín del termosifón.

6.2 Caracterización y ensayos

En este apartado se va a proceder a la descripción de la forma, el equipo y la metodología empleada para realizar los ensayos en el laboratorio. Se indicarán con detalle las formas de proceder, el tratamiento de los datos de cada ensayo. Se procederá a describir detalles del modelo computacional para la verificación del cual se están realizando estos ensayos.

6.2.1 Equipo y material empleado

Para poder realizar los ensayos además del prototipo ensayado se necesita de un equipo auxiliar que se procede a describir a continuación.

6.2.1.1 Cámara climática

La cámara climática es un elemento esencial para realizar los ensayos de caracterización pues permite controlar en todo momento las condiciones del ambiente que encierra. La cámara climática utilizada permite el control de la temperatura y la humedad. Todo el control esta implementado a través de un software que permite crear programas de funcionamiento que posean las configuraciones deseadas y cargarlos en todo momento.



Figura 6.6 Cámara climática.

6.2.1.2 Fuente de potencia

Se trata de un equipo capaz de producir una elevada potencia que se puede controlar a través de la tensión o la intensidad de salida, siendo ambas señales continuas. Durante los ensayos de caracterización suministrará energía a los módulos que se encuentren conectados a ella. En los ensayos de generación alimentará una placa para generar calor



Figura 6.7 Fuente de potencia.

6.2.1.3 Adquisidor de datos

El adquirente de datos utilizado para el desarrollo de este proyecto es el ALMEMO 5590, esencial para registrar los datos de temperatura colocados en diferentes partes del prototipo. El registrador funciona conjuntamente con un programa instalado en un ordenador que permite el control de las propiedades de cada una de las sondas y crear archivos de registro de los datos tomados de las mismas. Dicho programa permite guardar datos esenciales como la fecha y la hora de cada una de las medidas que realizan y volcarlo en una hoja de cálculo para su posterior tratamiento.



Figura 6.8 Adquisidor de datos ALMEMO 5590.

6.2.1.4 Sondas de temperatura

Las sondas son utilizadas junto con el registrador de datos ALMEMO, por ello uno de sus extremos es un cabezal de conexión compatible con dicho aparato. El otro extremo consiste en la unión soldada de dos hilos hechos de un material específico que son los que recogen la medida. Las sondas además poseen un recubrimiento especial siendo esta fibra de vidrio aquellas que van a trabajar en ambientes más hostiles y un polímero no tan resistente aquellas que requieran unas propiedades de resistencia menores por sus condiciones de trabajo.



Figura 6.9 Sonda de temperatura de tipo K aislada con fibra de vidrio y cabezal de conexión ALMEMO.

Las sondas colocadas para la medición de la temperatura de pérdidas a través del aislante del calderín, así como para la medición de las temperaturas superficiales en tubos se utilizan unas sondas con un recubrimiento menos resistente como el que se muestra en la figura 6.24.



Figura 6.10 Sonda de temperatura superficial de tipo K.

La temperatura ambiente se mide con una sonda de temperatura de tipo K con un grosor mayor que las utilizadas las medidas de temperaturas superficiales.



Figura 6.11 Sonda de temperatura ambiental de tipo K.

6.2.1.5 Placa calefactora

La placa calefactora es un conjunto de resistencias eléctricas conectadas en paralelo que poseen forma cilíndrica y están embebidas en el interior de una placa metálica de geometría rectangular. Dicha placa se utiliza para generar calor por efecto Joule haciendo circular una corriente eléctrica controlada en todo momento.



Figura 6.12 Placa calefactora.

6.2.1.6 Aislantes térmicos

La utilización de materiales aislantes en este proyecto es esencial ya que existen zonas donde es imprescindible su presencia, las razones de ello serán explicadas más adelante. Para los ensayos se utilizaron dos materiales aislantes diferentes, lana de roca para aislar el montaje que albergaba a los módulos termoelectrónicos y neopreno para aislar la zona inferior del termosifón rodeando de esta manera al calderín.



Figura 6.13 Material aislante utilizado para cubrir el calderín.

6.2.1.7 Láminas de Grafito

Las láminas de grafito son una mejora introducida en los ensayos de caracterización cuyo objetivo no era otro que reducir la resistencia de contacto presente entre la superficie de los módulos termoeléctrico y la de la zona del calderín en contacto con ellos.

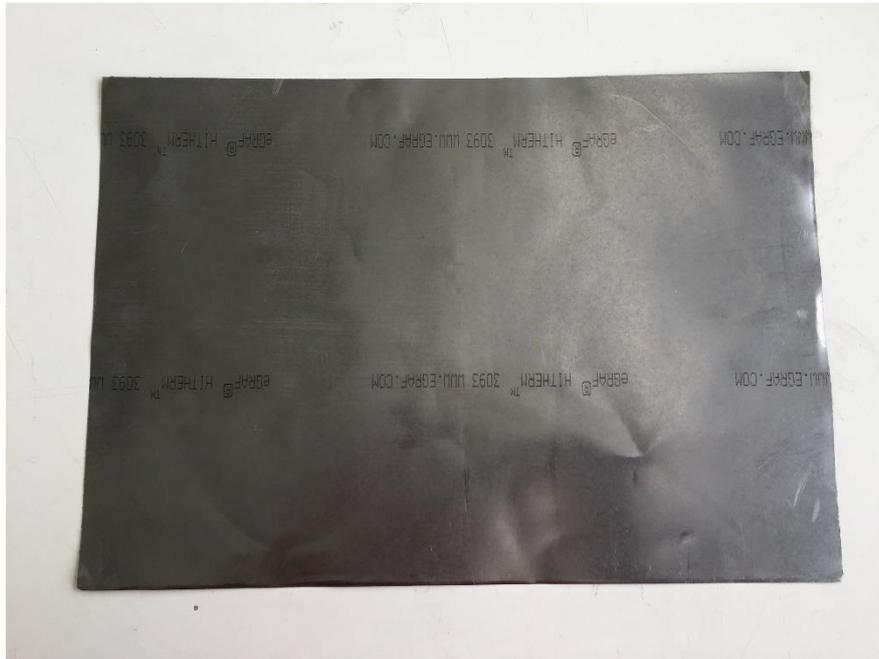


Figura 6.14 Lámina de grafito utilizada para el contacto módulo-calderín.

6.2.1.8 Resistencias de eléctricas

Son un pequeño banco de resistencias eléctricas variables utilizadas para los ensayos de generación. Estas resistencias se disponen como resistencias de carga conectadas a los módulos termoeléctricos del dispositivo para consumir la energía producida por los mismos en dichos ensayos.

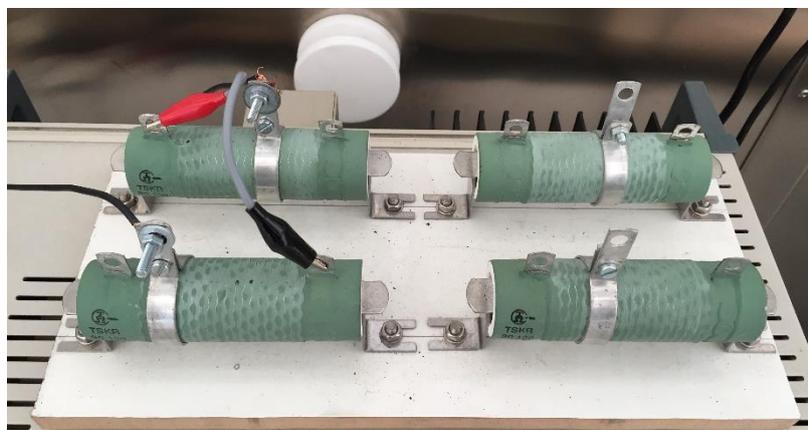


Figura 6.15 Resistencias eléctricas variables.

6.2.2 Ensayos de Caracterización

Los ensayos de caracterización han sido el objetivo principal de este proyecto, pues lo que se pretendía con ellos era obtener toda la información necesaria para conocer el comportamiento del termosifón. Para introducir este capítulo hay que empezar definiendo en que consiste un ensayo.

Los ensayos de caracterización consisten en alimentar los módulos termoelectrónicos integrados en el montaje del termosifón a través de una fuente de alimentación en continua. Con la ayuda de sondas de temperatura estratégicamente colocadas en diferentes puntos del montaje se estudia la forma en la que este dispositivo es capaz de evacuar el calor generado por los módulos. Para ello se toman medidas de la temperatura del ambiente, de la temperatura de la cara caliente y fría de los módulos, de la base del aislante del calderín y de la superficie de los tubos. Con dichas temperaturas se puede cuantificar las pérdidas que se producen por la base del calderín, estimar de forma aproximada la transferencia de calor que se produce por los tubos y conocer el salto de temperaturas que permite calcular la resistencia térmica global del sistema. Conocida el flujo de calor que es capaz de suministrar la fuente de potencia se procede a realizar el cálculo de la resistencia térmica utilizando la siguiente expresión:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (6. 16)$$

Los datos recopilados durante los ensayos son valores de temperatura como ya se explicó en apartados anteriores. Es necesario trabajar y entender estos datos, pues en sí mismos no representan más que números recogidos por unas sondas colocadas sobre el prototipo. La forma de tomar valores del adquisidor consiste en guardar en una tabla el valor de temperatura que marca cada sonda en un instante dado, esta toma de valores se realiza cada treinta segundos durante todo un ensayo. Una vez se ha alcanzado el estacionario, comportamiento que cuesta alcanzar aproximadamente una hora y treinta minutos, el programa habrá generado una tabla que muestra cerca de trescientos valores por cada sonda colocada. Se considera estacionario al régimen en el cual las propiedades de un sistema no varían con el tiempo, en estos ensayos se habrá alcanzado cuando las temperaturas no varíen u oscilen en torno a un determinado valor. Experimentalmente se comprueba que, transcurrido un tiempo, los valores recogidos por el adquisidor se estabilizan en torno a un valor sobre el que oscilan. Debido a este comportamiento, se realiza la media de los valores de temperatura recogidos para cada sonda con el fin de tener un único valor de temperatura representativo de cada una de ellas.

Para el correcto devenir de los ensayos hay que asegurarse de que el montaje realizado es el correcto, es por ello que debe quedar bien definido en que consiste. En capítulos anteriores ya se describieron cuáles eran las partes que conformaban el prototipo de termosifón ensayado, la zona de actuación, es decir, la zona sobre la cual se realizarán modificaciones entre los diferentes ensayos es la del calderín.

6.2.2.2 Montaje

La base del calderín es la que se encuentra en contacto directo con los módulos y por ello posee unas características especiales. Esta base ha de estar perfectamente pulida asegurándose que la superficie quede lo más uniforme y lisa posible, para ello antes de comenzar los ensayos se procederá al lijado de la misma utilizando en cada pasada lijas de distintas rugosidades. Finalmente se debe proceder a su limpieza con aire comprimido y con una solución de alcohol industrial al 96%, todo este procedimiento es necesario ya que cualquier impureza o resalto de la superficie podría interferir en el contacto con los módulos haciendo que la resistencia térmica asociada a este fenómeno creciera e influyera negativamente en los ensayos. La base del calderín posee una serie de hendiduras mecanizadas con el objetivo de introducir en ellas sondas de medida que aporten información de las temperaturas de los módulos termoelectrónicos que se apoyen sobre ellas. En la periferia de esta base se hallan también mecanizados unos taladros utilizados para asegurar el montaje.

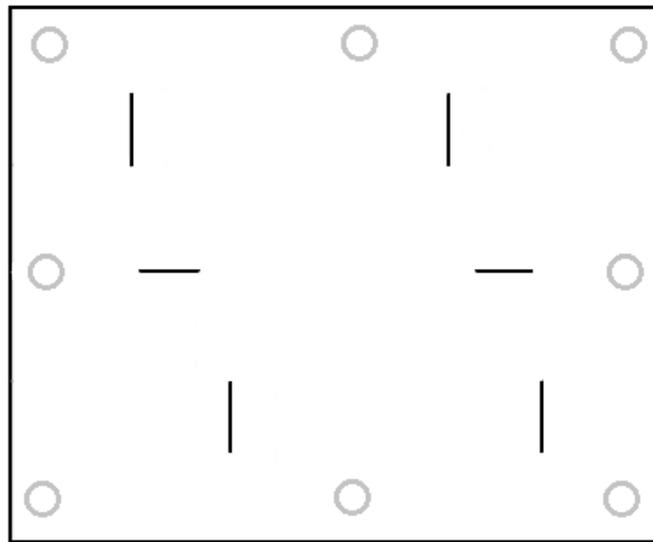


Figura 6.16 Esquema de los trazos mecanizados sobre la base del calderín.

Encima de la base del calderín se coloca una lámina de grafito cuyo objetivo es mejorar el contacto y reducir la resistencia térmica que tiene relación con este ya mencionada anteriormente.

A continuación, se colocan los módulos termoelectrónicos siguiendo las diferentes configuraciones estipuladas para el desarrollo de este proyecto. La colocación de los mismos debe asegurar el que los espaciados entre módulos sean coherentes e iguales, y que deben quedar colocados dentro del área de trabajo con el objetivo de que toda la superficie de los módulos este en contacto con la superficie del calderín. Teniendo la certeza de que esto es así se planifican montajes para configuraciones con diferentes números de módulos.

Para una configuración de dos módulos se conectan ambos en serie y se colocan tal y como se puede ver en la figura 6.17.

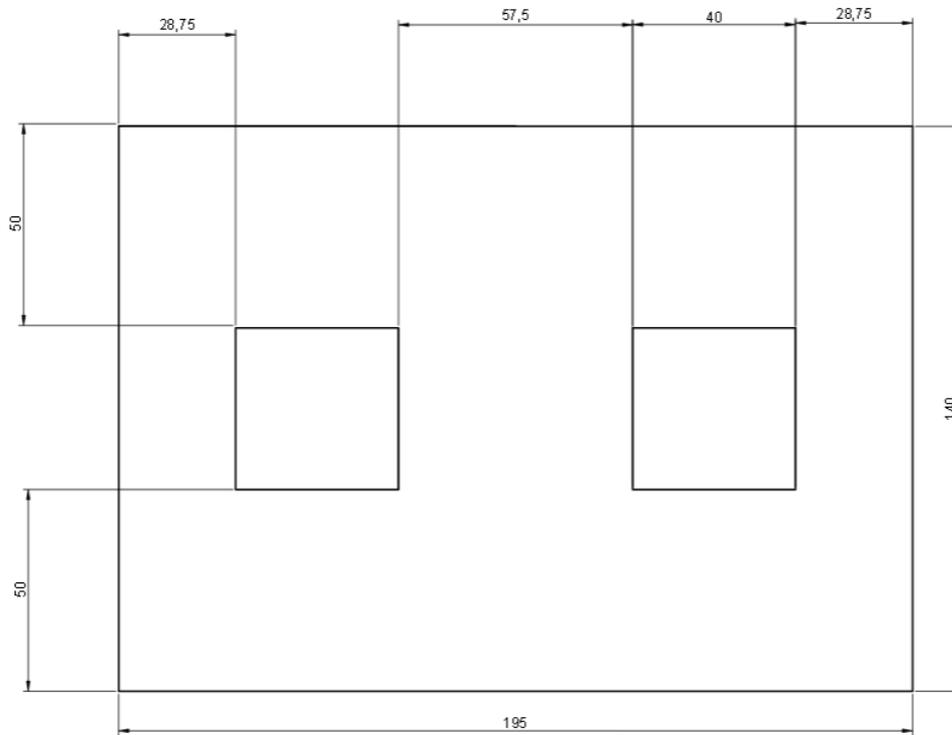


Figura 6.17 Plano de montaje para la configuración de dos módulos.

Para configuraciones de cuatro módulos hay que verificar también que el espaciado sea el más adecuado para esta configuración. Los módulos se conectarán también en serie. El plano que muestra en la figura 6.18 detalla la colocación de los módulos para este montaje.

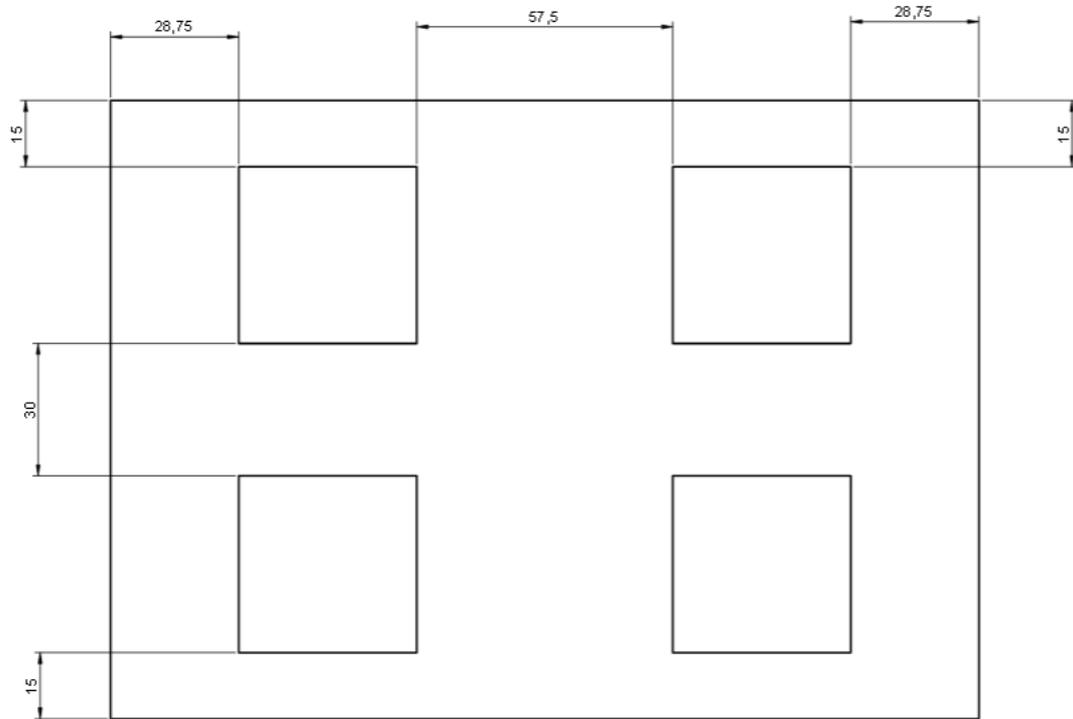


Figura 6.18 Plano de montaje para la configuración de cuatro módulos.

La configuración para 8 módulos es algo más compleja y en ella se puede observar que es bastante más complicado realizar la distribución de los módulos dentro de la superficie de trabajo. En esta configuración los módulos se conectarán dos grupos en paralelo formados cada uno de ellos por cuatro módulos en serie. La figura 6.19 muestra la distribución de los 8 módulos.

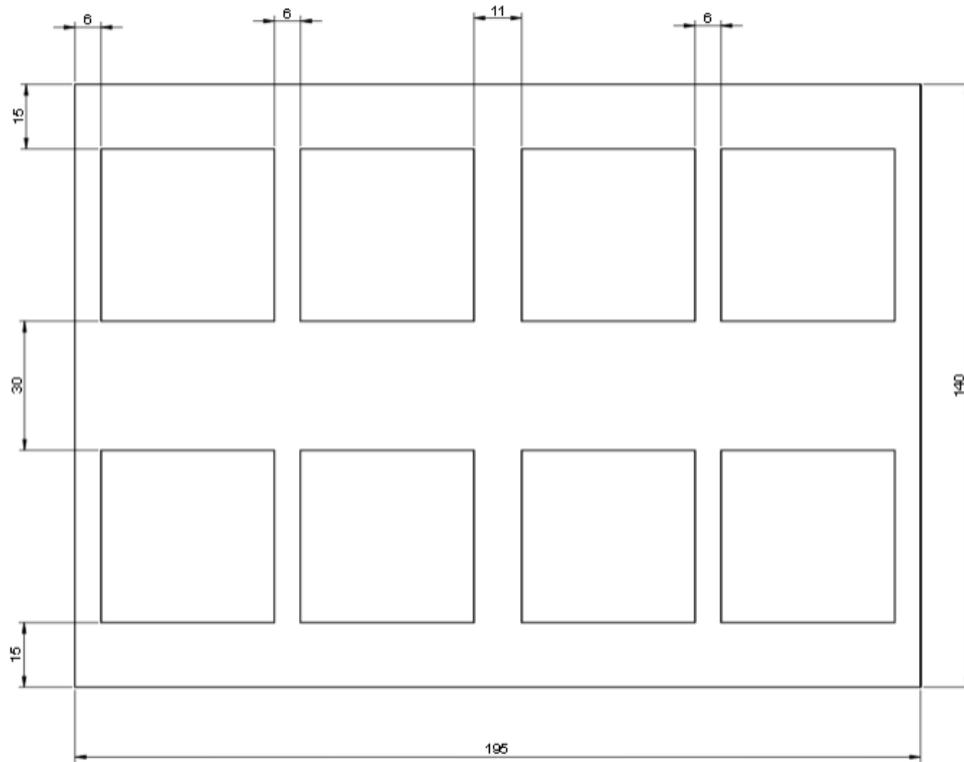


Figura 6.19 Plano de montaje para la configuración de ocho módulos.

Por último, la configuración de doce módulos es la que ocupa prácticamente toda la superficie de trabajo tal y como se puede apreciar en la figura 6.20. Su conexionado se realizará de forma similar a la configuración de ocho módulos, se conectarán tres grupos en paralelo formado cada uno de ellos por cuatro módulos en serie.

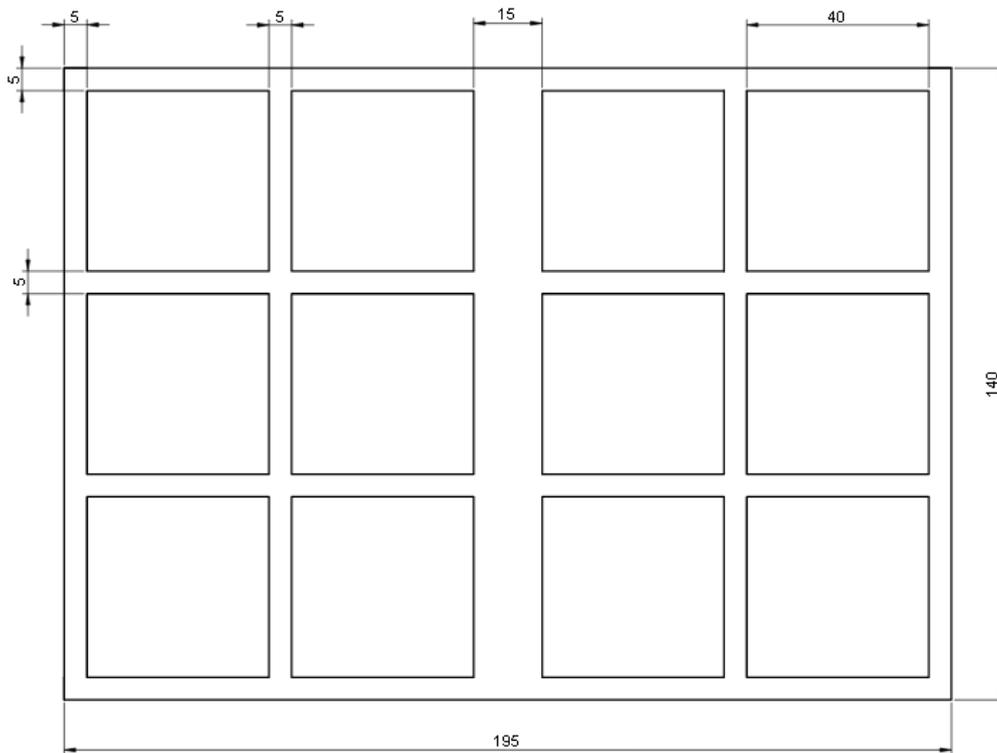


Figura 6.20 Plano de montaje para la configuración de doce módulos.

El conexionado de los módulos es algo irrelevante de cara a su funcionamiento individual, pues alimentados por una potencia, esta se repartirá de forma equitativa entre ellos ya que se trata de módulos exactamente iguales. En términos de potencia, independientemente del conexionado serie o paralelo, todos los módulos ven una misma intensidad y diferencia de potencial, esto se debe a que todos los módulos son iguales y presentan por tanto una misma resistencia eléctrica al paso de la corriente. Sin embargo, el comportamiento a nivel de circuito equivalente sí queda modificado pues, en los extremos del mismo la forma de conexión hace que la tensión sea muy grande, en el caso de conexión totalmente en serie, o que la intensidad adquiera valores elevados, en el caso de conexión totalmente en paralelo. Estas condiciones de funcionamiento no influyen en la potencia absorbida por cada módulo sino en la elección de una fuente de potencia que sea capaz de funcionar con los parámetros requeridos por el circuito. La forma de trabajar será siempre buscar un compendio que no utilice valores de corriente demasiado elevados con el fin de reducir las pérdidas que pudieran generarse por efecto Joule.

Por encima de los módulos se pone nuevamente una lámina de grafito que asegure el contacto que debe existir entre la cara posterior de los módulos y la placa calefactora que, se situará encima. Como ya se definió en apartados anteriores, es una placa formada por resistencias

eléctricas que se utilizará para los ensayos de generación pues suministrará calor cuando sea alimentada por una fuente de potencia. Esta placa servirá también de soporte a las sondas de temperatura que se utilizarán para medir las caras de los módulos que no están en contacto con el calderín. Para la colocación de estas sondas, la placa lleva mecanizadas unas hendiduras colocadas a unas distancias determinadas como se puede ver en la figura 6.21 para asegurar el contacto directo sobre las caras de los módulos.

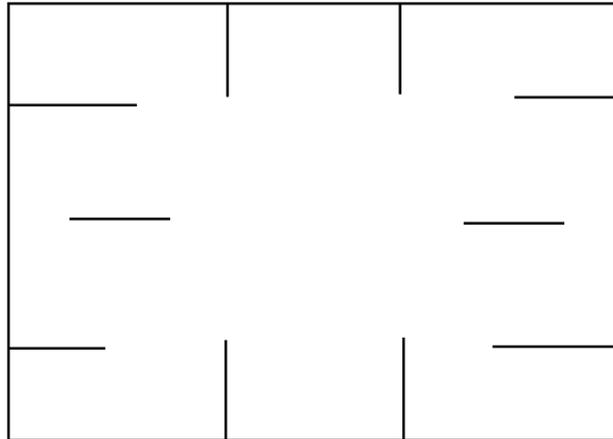


Figura 6.21 Esquema de los trazos mecanizados sobre la superficie de la placa calefactora.

Por encima de la placa calefactora se coloca lana de roca con el objetivo de evitar que haya un flujo de calor a través de esa zona y finalmente se coloca una placa metálica que sirva de cierre a todas las capas que se encuentren por debajo, quedando así una estructura de “sándwich” por debajo del calderín. Dicha placa tiene las mismas dimensiones que la cara inferior del calderín y también posee una serie de taladros mecanizados en su periferia alineados con los de la cara inferior citada anteriormente. El “sándwich” se cierra utilizando tornillos con tuercas, entre la cabeza del tornillo en contacto y la superficie de la tuerca en contacto con sus respectivas placas, se colocan arandelas plásticas con el objetivo de que no se transmitan flujos de calor a través del tornillo. Estos tornillos han de asegurar el montaje sin ejercer una fuerza excesiva que pudiera combar la placa de cierre lo cual provocaría deficiencias en el contacto. Por ello todos y cada uno de los tornillos deben tener su correspondiente par de apriete, siendo este 1 N·m para este caso.



Figura 6.22 Placa atornillada que cierra el montaje "sándwich".

Por último se coloca una caja de material aislante diseñada para envolver a la estructura "sándwich" que conforma el montaje con el objetivo de evitar que haya flujos de calor con el ambiente en cualquiera de las direcciones. Lo que interesa para el desarrollo de los experimentos es que el flujo de calor sea uniforme y tenga una dirección predeterminada, pese al hecho de que es muy complicado tener un sistema perfectamente aislado se hará todo lo posible por acercarse a este estado ideal.

6.2.2.3 Mediciones

La recogida de datos se realiza mediante la utilización de sondas de temperatura dispuestas en diferentes zonas del prototipo. Se realizan medidas de temperatura sobre las superficies de los módulos termoeléctricos con el objetivo de conocer el salto de temperatura existente entre las caras, dato fundamental para obtener más información de los ensayos. Estas medidas son tan importantes y la forma de realizarlas debe ser tan precisa que los elementos que conforman el prototipo han sido adaptados para la correcta colocación de estas sondas. La superficie del calderín, así como la placa calefactora poseen mecanizadas unas ranuras lo suficientemente amplias como para poder introducir completamente las sondas en ellas. Estas se introducen envueltas en una capa de pasta térmica conductora con el objetivo de asegurar el contacto de las mismas con las superficies de medida y rellenar huecos de aire que se pudieran crear, huecos que podrían afectar de manera negativa a las medidas. La pasta térmica sirve también de soporte de fijación a las sondas gracias a su estructura y consistencia.

Para conocer en todo momento los puntos que se miden y tener un mejor control de los datos obtenidos se desarrolló un código alfanumérico con el que se nombró a las sondas y a las posiciones de las mismas en las placas donde deben ir colocadas.

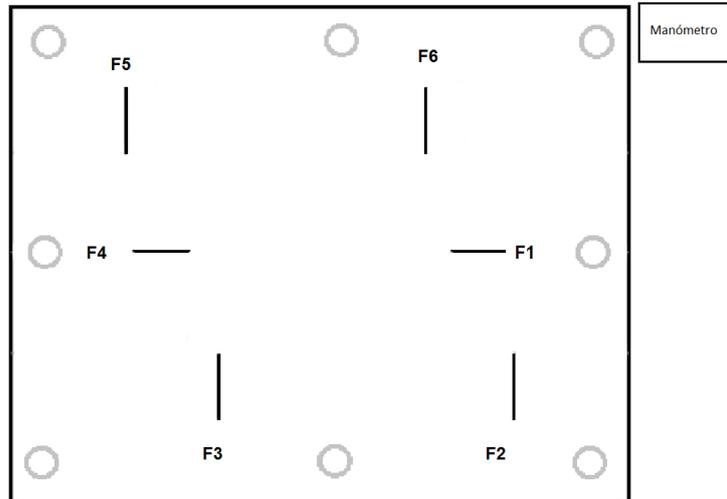


Figura 6.23 Esquema de asignación de sondas a colocar sobre la superficie del calderín.

El posicionamiento de las sondas en la placa calefactora es una imagen espectral del posicionamiento de las mismas en el calderín, debido que son placas que se colocan una encima de la otra.

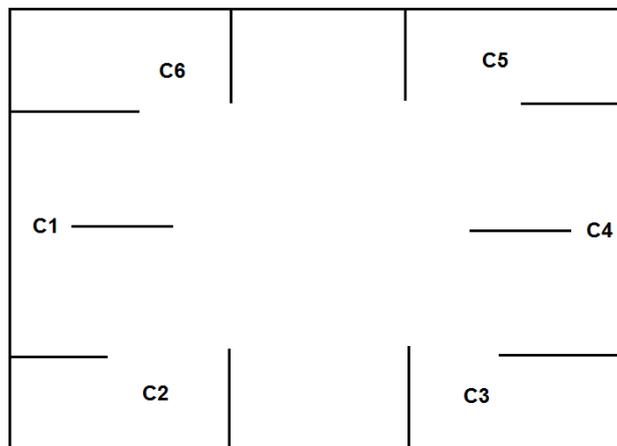


Figura 6.24 Esquema de asignación de sondas a colocar sobre la superficie de la placa calefactora.

Se realizan mediciones superficiales de temperatura al principio del tubo de ebullición que sale del calderín y en el tubo final de retorno al mismo, con el objetivo de conocer de forma aproximada el valor de la temperatura de saturación del fluido refrigerante que recorre el interior del termosifón. Como se indica es una medida aproximada ya que se está despreciando la caída de temperatura que existe en el espesor de la pared del tubo. Además de la temperatura del fluido, otro dato de interés para el desarrollo del proyecto es conocer en todo momento la presión de trabajo. Ello se consigue con la ayuda de un manómetro diferencial integrado en el prototipo.

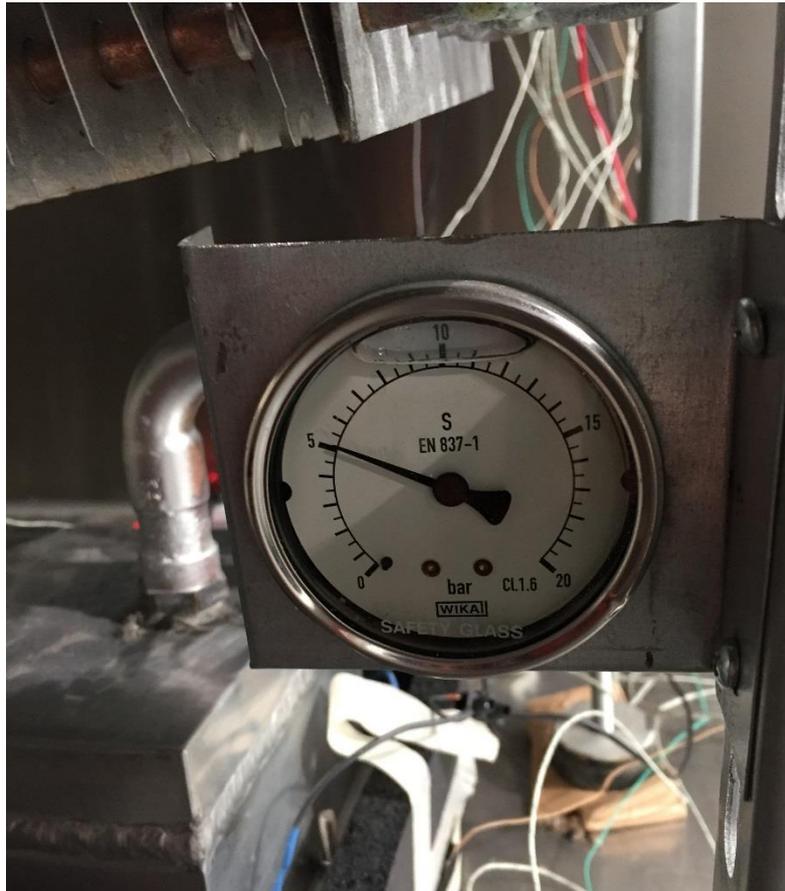


Figura 6.25 Manómetro incorporado en la estructura del termosifón.

Es esencial colocar también una sonda de temperatura por encima de la caja de material aislante que recubre la zona del calderín con el fin de obtener información acerca de las pérdidas que se pudieran producir a través del aislamiento.

Otro parámetro a tener controlado es la temperatura de ambiente dentro de la cámara, ya que este dato es esencial para la comprensión y la obtención de más información acerca del comportamiento del termosifón. Se coloca una sonda, que posee un diámetro superior al de las utilizadas para las mediciones de temperatura superficial, adherido a una de las paredes de la cámara cercana a la zona donde se encuentra el termosifón.

6.2.2.4 Programación de ensayos

Una vez conocidos tanto la forma de montar el termosifón como el procedimiento de colocación de las sondas, es necesario planificar los ensayos a realizar. La planificación consiste en elegir que se va a ensayar y la forma en la que se va a proceder, tal y como se ha descrito en el apartado de montaje, van a existir cuatro configuraciones diferentes que son función del número de módulos termoeléctricos que se quieran colocar. Partiendo de este dato se puede estudiar el termosifón como si se tratara de un sistema de generación de datos con el cual se interactúa a través del control de determinadas variables de entrada al sistema y mediante la obtención de la correspondiente información a través de ciertas variables de salida.

La potencia suministrada por la fuente que alimenta a los módulos termoeléctricos es un parámetro muy importante a tener en cuenta, pues se utilizará para la obtención de información como se explicará más adelante. Para determinar el valor de la misma hay que tener en cuenta el número de módulos que se utiliza, pues el máximo valor de potencia estará acotado por los límites de funcionamiento de cada módulo. Obtenida la información de la máxima potencia que soporta cada módulo, 50 W en el caso de este ensayo, se puede tener ya un valor de potencia para ensayar con cada configuración siendo este $50 \cdot n$, donde n es el número de módulos. Este valor de potencia máxima puede utilizarse debido a que realmente el módulo podrá soportar más potencia, pero el fabricante establece como máximo un valor determinado que no comprometa el correcto funcionamiento del mismo. De esta forma existe un margen de seguridad que hace que el módulo no sea vulnerable ante variaciones en el suministro de potencia o cualquier otro factor que pudiera influir en la misma y no pudiera predecirse o ser controlada durante la realización de los ensayos. A partir del valor de máxima potencia, se eligen otros valores de potencia inferiores con el objetivo de obtener un muestreo del comportamiento del termosifón ante diferentes potencias. La elección de estas se realiza en base a determinados criterios. Uno de ellos es que exista la posibilidad de poder programar el mismo valor de potencia para otra de las configuraciones de montaje, de esta forma se puede obtener información para comparar en un determinado punto de funcionamiento. Otro de los criterios elegidos a la hora de establecer un valor de potencia es que este sea lo suficientemente alto como para poder obtener información útil de los ensayos. El valor mínimo de potencia quedará acotado inferiormente por un valor que permita obtener entre las caras de los módulos un salto de temperatura considerable del que se pueda obtener posteriormente la máxima información posible. Este valor no se puede calcular como ocurre con el caso de la potencia máxima, se determina estableciendo un valor mínimo del salto de temperaturas entre las caras del módulo establecido a través de ensayos de prueba que permitan observar en que puntos se producen estos comportamientos.

Las condiciones ambientales programadas para la realización de los ensayos es otro de los parámetros a controlar pues servirá como se ha mencionado previamente para la obtención de más información. Condiciones como la temperatura de la cámara o la humedad de la misma han de ser representativas de las condiciones que pudieran existir en el lugar o en los lugares donde se pudieran instalar termosifones, así pues, quedaría registrado el comportamiento del sistema en esas condiciones. Como es muy complicado establecer de forma precisa el valor de las diferentes condiciones en los distintos ambientes de trabajo que pudieran darse, se establecen unos valores de temperatura y humedad determinados, 21º para los ensayos, y se trabaja en torno a ellos. Para implementarlos se crea un programa que establezca estas condiciones en la cámara climática y se guarda en el ordenador con el objetivo de ser ejecutado cada vez que se realicen ensayos.

Las configuraciones de montaje son otro de los parámetros a tener en cuenta. Al contrario de lo que se pueda pensar, un mayor número de módulos no implica una mayor potencia o mayor eficiencia del sistema, ya que al aumentar el número de ellos se reduce la superficie libre que existe entre los mismos y como se ha comprobado esto afecta a la forma de transmitir el calor a través de la superficie de trabajo. Esta relación entre el área de la superficie de trabajo donde se apoyan los módulos y la propia superficie de los módulos se conoce como factor de ocupación δ , es de interés obtener información en base a ello.

$$\delta = \frac{n_{TME} \cdot A_{TME}}{A_c} \quad (6.17)$$

Donde:

- δ : factor de ocupación
- n_{TME} : número de módulos termoeléctricos
- A_{TME} : superficie de un módulo termoeléctrico
- A_c : superficie de la base del calderín

Algo fundamental para la obtención de buenos resultados y reducir los errores producidos durante la experimentación es realizar réplicas de los ensayos. Para la realización de este proyecto se realizaron tres réplicas de cada punto ensayado.

Se diseña así, un código alfanumérico que identifique en todo momento el ensayo que se está realizando, por lo tanto, debe incorporar información del montaje y de la potencia que se está ensayando. Con este fin se definen los ensayos de la siguiente forma: una "C" precedida de un valor numérico que indica la réplica de ensayo que se realiza, una "P" seguida de un valor que indica el número de módulos que posee el ensayo y una "W" precedida del valor de la potencia suministrada por la fuente. Un ejemplo de ensayo es:

C2P8W300

Donde:

- C2: indica que se está realizando la segunda réplica
- P8: indica que es un ensayo con ocho módulos
- W300: indica que la potencia suministrada por la fuente son 300 vatios

Tabla 6.2 Definición de ensayos de caracterización.

MTE	POTENCIA (W)						
	50	100	150	200	300	400	500
2	C1P2W50	C1P2W100	-	-	-	-	-
	C2P2W50	C2P2W100	-	-	-	-	-
	C3P2W50	C3P2W100	-	-	-	-	-
4	-	C1P4W100	C1P4W150	C1P4W200	-	-	-
	-	C2P4W100	C2P4W150	C2P4W200	-	-	-
	-	C3P4W100	C3P4W150	C3P4W200	-	-	-
8	-	C1P8W100	C1P8W150	C1P8W200	C1P8W300	C1P8W400	-
	-	C2P8W100	C2P8W150	C2P8W200	C2P8W300	C2P8W400	-
	-	C3P8W100	C3P8W150	C3P8W200	C3P8W300	C3P8W400	-
12	-	-	C1P12W150	C1P12W200	C1P12W300	C1P12W400	C1P12W500
	-	-	C2P12W150	C2P12W200	C2P12W300	C2P12W400	C2P12W500
	-	-	C3P12W150	C3P12W200	C3P12W300	C3P12W400	C3P12W500

Realizados los ensayos, los datos que se recogen son valores de temperatura de las diferentes sondas dispuestas por los alrededores y el interior del termosifón. Conocidos estos datos se procesarán y a partir de ellos se sacarán las pertinentes conclusiones de cada ensayo.

6.2.3 Ensayos de Generación

Una vez concluidos los ensayos de caracterización se puede hacer uso del mismo montaje para realizar los ensayos de generación, tan solo se han de realizar pequeños cambios en el conexionado de los módulos. Lo que se busca con estos ensayos es demostrar la capacidad que tienen los módulos de poder convertir la potencia calorífica en potencia eléctrica, es decir un comportamiento inverso al que se observa durante los ensayos de caracterización. El comportamiento de un módulo en generación se modela como una fuente de tensión conectada junto con una pequeña resistencia interna r_i .

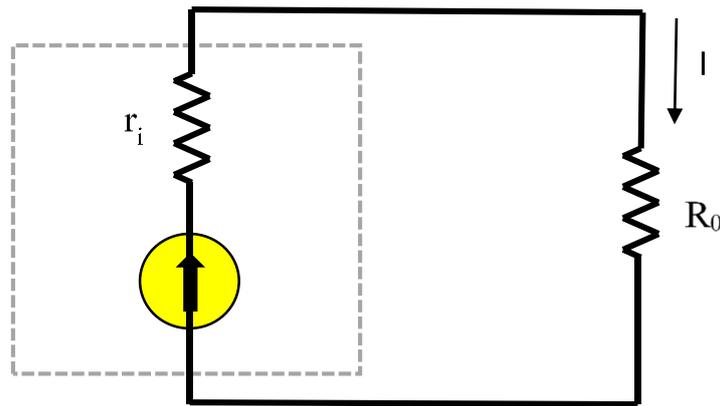


Figura 6.26 Esquema de un módulo termoeléctrico funcionando como generador.

Lo primero a realizar antes de un ensayo es verificar que se han realizado las conexiones pertinentes para poder llevarlo a cabo, en este caso se desconectarán los módulos de la fuente de potencia que los alimentaba en los ensayos de caracterización. Con la ayuda de regletas se conectarán a ellos, en serie, un amperímetro con conexión al ALMEMO que registrará la corriente que generen. Se ha de conectar también un voltímetro, en paralelo, al conexionado de los módulos, dicho voltímetro también poseerá un enlace con el ALMEMO. Teniendo un control de la tensión y la corriente que circulan se puede conocer la potencia que están suministrando los módulos en todo momento.

Los módulos han de conectarse a una resistencia de carga que les permita disipar la potencia generada y cierran el circuito formado por los módulos termoeléctricos y dichas resistencias. Para conseguir una generación óptima, el fabricante de los módulos muestra unos valores de resistencia de carga específicos a conectar a cada módulo, conectando dichas resistencias se generarán las máximas potencias posibles. En el caso de los módulos Marlow TG 12-8 L este valor varía en función del rango de temperaturas en el que se trabaja. La resistencia de carga óptima debe ser similar a la resistencia eléctrica interna del módulo y como esta varía con la temperatura, lo que provoca es que existan diferentes resistencias de carga óptimas en función de las temperaturas con las que se esté trabajando.

La fuente de potencia utilizada para los ensayos de caracterización se empleará ahora para dar potencia a la placa calefactora. Se consigue de esta forma una fuente de calor permanente que se puede controlar.

La forma de proceder con estos ensayos es programar una serie de potencias específicas a ensayar y suministrarlas usando la placa calefactora. Además de realizar los ensayos modificando la potencia se realizarán cambios en los valores de la resistencia de carga conectada. Como la placa calefactora está en contacto con los módulos se producirá un flujo de calor a través de ellos que a su vez provocará un salto de temperaturas entre sus caras. Debido a los efectos, ya explicados en capítulos anteriores, que se dan en el interior de los módulos se genera una determinada potencia eléctrica siendo esta función de la potencia calorífica suministrada y de la resistencia de carga conectada.

6.2.4 Modelo computacional

Uno de los objetivos que se persigue con el desarrollo de este proyecto es conseguir la validación de un modelo computacional desarrollado por el Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Dicho modelo pretende simular el comportamiento del termosifón ensayado, pero no se limita únicamente a este prototipo, sino que se está trabajando para que pueda ser utilizado en el diseño de termosifones con diferentes formas y geometrías.

La forma de implementar el intercambiador en un modelo computacional es algo complejo y para ello se realiza una discretización en nodos del entorno de trabajo ya que resolver analíticamente un intercambiador es algo realmente complejo. Para el desarrollo de la solución se emplea el método de las diferencias finitas, este se aplica junto con la ecuación de Fourier de transmisión de calor a cada uno de los nodos con el objetivo de conocer su temperatura.

La ecuación de transmisión de calor se modifica al utilizar el método de las diferencias finitas quedando una expresión que depende de la resistencia térmica y de diferencias de temperatura entre diferentes puntos e instantes. Los valores de las resistencias térmicas dependerán de la zona donde se halle el nodo que se pretenda calcular, pudiendo ser un nodo en una zona de contacto con grafito, en la cual será el fabricante del mismo el que dé el valor de dicha resistencia, o, un nodo en la zona de ebullición donde el valor de la resistencia es obtenido a partir de las fórmulas empíricas detalladas en el apartado 6.1.2. Con ello se consigue una expresión que ha de resolverse computacionalmente de forma iterativa.

6.3 Resultados y análisis

En este apartado se procederá a la interpretación y explicación de los resultados obtenidos durante los ensayos de caracterización.

Los resultados obtenidos durante los ensayos se utilizan para la estimación de la resistencia térmica global del termosifón. Se emplearán los datos de temperatura ambiente, temperatura de la cara caliente y la potencia suministrada a los módulos desde la fuente. Con esto se conoce la diferencia de temperaturas entre los puntos de la resistencia que se desea estimar, con la potencia eléctrica se determina el flujo de calor que circula a través de dicha resistencia y apoyándose en la analogía eléctrica se puede calcular la resistencia térmica. El cálculo de dicha resistencia se puede expresar como el cociente de una diferencia de temperaturas ΔT entre el flujo de calor que propicia dicho salto \dot{Q} tal y como se mostraba en la ecuación 6.16.

Para la realización del cálculo de la resistencia térmica del termosifón se realiza la aproximación de que toda la potencia eléctrica de la fuente es transformada por los módulos en un único flujo de calor que emana de la cara caliente del módulo y se disipa a través del termosifón.

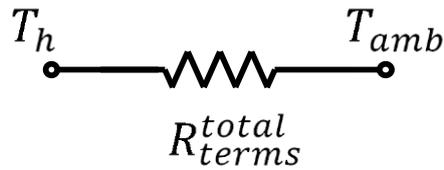


Figura 6.27 Analogía eléctrica utilizada para modelar la resistencia térmica total del termosifón.

Sin embargo, como se describió en apartados anteriores cuando una corriente atraviesa un módulo termoeléctrico, en este se producen dos flujos de calor: uno que atraviesa la cara caliente del módulo y otro que atraviesa la fría. La función del montaje “sándwich” y de todos los aislantes que se encuentran alrededor del mismo es impedir el flujo de calor que se produce a través de la cara fría del módulo. Es sabido que conseguir un aislamiento perfecto es muy difícil, por ello durante los ensayos se van a producir flujos de calor a través de los aislantes. Estos flujos de calor son pequeños en comparación a los que se dan a través de la cara caliente del módulo, por ello se desprecian para el cálculo de la resistencia térmica del termosifón. Dado que esta suposición supone una modificación en el valor de la resistencia térmica habrá que monitorizarla a través de una sonda de temperatura colocada en la superficie del aislante.

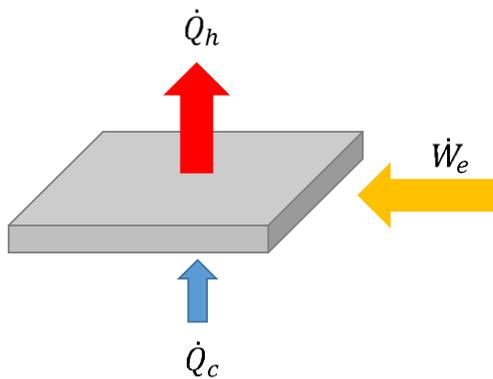


Figura 6.28 Esquema de los flujos de calor producidos en un módulo alimentado por una potencia eléctrica.

La ecuación utilizada para el cálculo de la resistencia térmica del termosifón teniendo en cuenta la suposición mencionada será la siguiente:

$$R_{terms}^{total} = \frac{T_h - T_{amb}}{W_e} = \frac{T_h - T_{amb}}{\dot{Q}_h} \quad (6.18)$$

6.3.1 Influencia de la potencia disipada sobre la resistencia térmica del termosifón

Una vez han sido tratados y recopilados los datos recogidos durante los ensayos se representan los valores de la resistencia térmica del termosifón por unidad de módulo en función de la potencia que debe disipar tal y como se muestra en la figura 6.29. El cálculo de la resistencia térmica del termosifón por unidad de módulo R_{terms} es fruto de una sencilla operación aritmética que se calcula teniendo en cuenta que todos los módulos se hallan en paralelo. A partir de este apartado cada vez que se hable de resistencia térmica o de resistencia térmica del termosifón se hará referencia a la resistencia térmica por unidad de módulo a no ser que se especifique lo contrario.

$$R_{terms} = R_{terms}^{total} \cdot n_{modulos}^{\circ} \quad (6. 19)$$

En la gráfica mostrada se pueden apreciar cuatro curvas diferentes, cada una de ellas corresponde a una configuración de montaje utilizada para ensayar. Como se sabe cada punto de ensayo consta de tres réplicas, para determinar un valor de resistencia térmica del punto ensayado se toma la media de las tres réplicas realizadas. En el eje de ordenadas se representan los valores de las resistencias térmicas y en el de abscisas los valores de los flujos de calor a disipar, ambos valores en unidades del sistema internacional.

Se aprecia como todas las curvas presentan una monotonía decreciente, es decir, la resistencia térmica del termosifón se reduce al aumentar el valor del flujo de calor a disipar. Esta tendencia se ve claramente reflejada en las configuraciones de ocho y doce módulos, ya que para estas existen más puntos de ensayo.

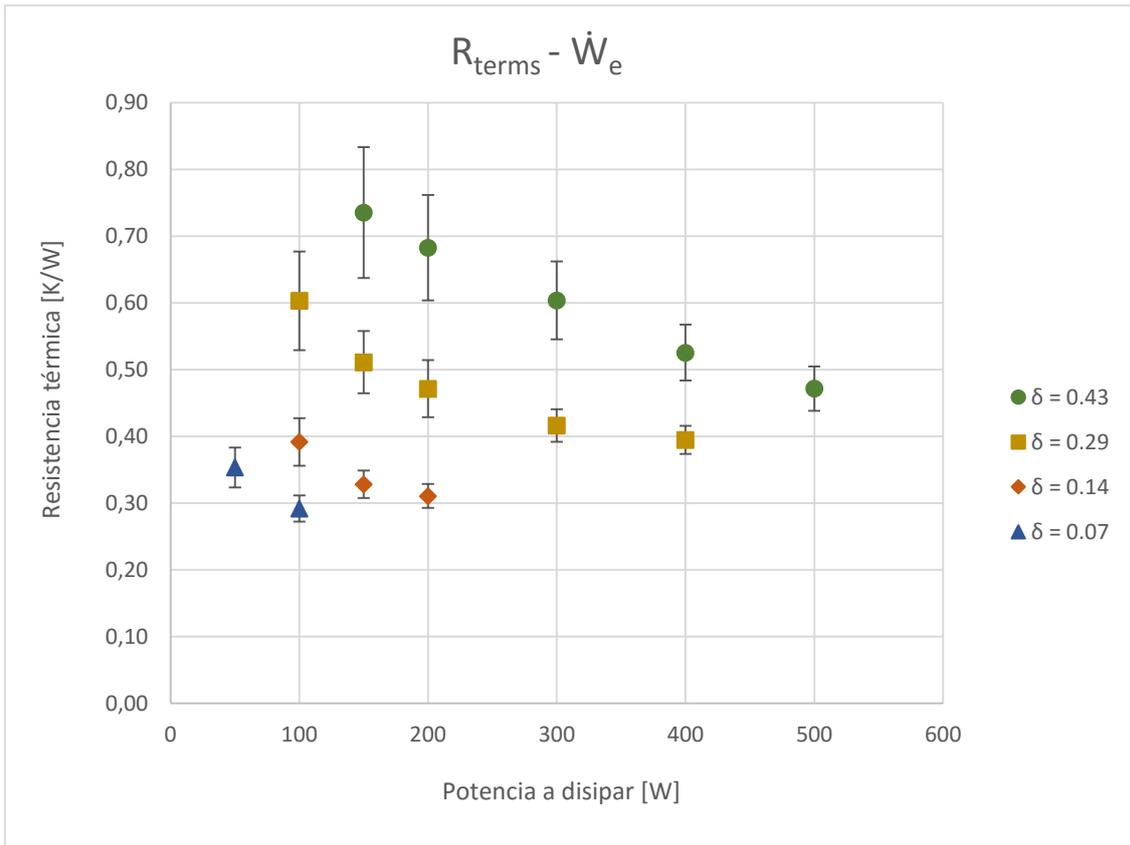


Figura 6.29 Gráfica de la resistencia térmica del termosifón frente a la potencia disipada, suministrada por la fuente.

La razón fundamental por la que se produce un decrecimiento en la resistencia térmica del termosifón se debe al hecho de que conforme se aumenta la potencia calorífica a disipar paralelamente lo hace también el salto de temperatura existente entre las caras de los módulos termoeléctricos. Este aumento de temperatura provocará modificaciones en el valor de las resistencias térmicas internas que modelan el comportamiento del termosifón ya que, la temperatura es un parámetro que está íntimamente ligado a ellas.

El coeficiente de ebullición h_b es directamente proporcional al salto de temperatura ΔT_{sat} elevado a una constante tal y como se puede ver en la ecuación 6.2. Por lo tanto, al aumentar la potencia eléctrica de la fuente denotada también como flujo de calor a disipar, se incrementa la temperatura de pared interna del calderín considerada similar a la temperatura de pared en contacto con la cara caliente de los módulos ya que, el valor de la resistencia térmica de conducción existente entre dichas paredes presenta unos valores muy pequeños. Este incremento se traduce como un aumento en el coeficiente de transmisión de calor por ebullición o lo que es lo mismo, un descenso en el valor de la resistencia térmica asociada a dicho efecto.

El comportamiento que presenta la temperatura frente a la variación de la potencia suministrada por la fuente descrito anteriormente no solo afecta a las temperaturas de las paredes del calderín, sino que también produce cambios en el comportamiento del fluido que se halla en su interior. Los aumentos de temperatura en un fluido hacen que las partículas de las que se compone el mismo se exciten lo cual provoca cambios en el régimen, consiguiendo de esta forma que con un aumento de la potencia de la fuente se incremente la turbulencia del refrigerante. La diferencia entre tener el refrigerante el régimen laminar o régimen turbulento

queda reflejado en el cálculo del coeficiente de transmisión de calor por condensación h_{TP} , que se ve favorecido cuanto mayor es la turbulencia existente en el seno del refrigerante (Tabla 6.1). Como ocurría en el caso anterior, un aumento en el coeficiente de transmisión de calor por ebullición significa una reducción de la resistencia térmica de condensación.

Haciendo uso de la analogía eléctrica se analiza el esquema mostrado en la figura 6.1, se observa que cuanto menor es la resistencia térmica existente entre dos puntos menor es la diferencia de temperatura entre los mismos. Por ello, se puede deducir que si la resistencia de condensación disminuye lo hace también la caída de temperatura existente entre el fluido y la pared de los tubos por los que circula. Considerando similar la temperatura de la pared exterior e interior de los tubos, ya que la resistencia térmica de conducción es pequeña, se consigue que la diferencia de temperaturas entre la pared del tubo T_w y el ambiente sea más grande. En resumen, una disminución de la resistencia térmica de condensación se traduce en un aumento de los valores de la temperatura de pared. Una mayor diferencia de temperatura entre el ambiente y la pared favorece al valor de las expresiones (Rayleigh, Nusselt) utilizadas para el cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección. Nuevamente un aumento del citado coeficiente provoca una disminución de la resistencia térmica de convección.

Los efectos producidos por el incremento de temperaturas se traducen en una disminución de cada una de las resistencias térmicas que gobiernan en las diferentes partes del termosifón. Se concluye así que el aumento de la potencia suministrada por la fuente provoca una disminución de la resistencia térmica del termosifón que ya se podía intuir por la expresión utilizada para su cálculo, ecuación 6.18.

6.3.2 Influencia del factor de ocupación sobre la resistencia térmica del termosifón

Los datos analizados se pueden representar de diferentes formas como: la resistencia térmica del termosifón frente a la potencia suministrada por la fuente o la misma resistencia frente al factor de ocupación. La forma de representación dependerá de la información que se quiera obtener de dichas representaciones.

La figura 6.30 muestra la resistencia térmica del termosifón en el eje de ordenadas y los valores del factor de ocupación en el eje de abscisas. Se puede observar la presencia de cinco curvas, cada una de ellas se corresponde con un valor de la potencia suministrada por la fuente durante diferentes ensayos. Claramente se observa en la gráfica como para valores pequeños del factor de ocupación, el aumentar la potencia suministrada por la fuente no supone una mejora de la resistencia térmica del termosifón. Se puede ver como independientemente del tipo de curva que se analice todas presentan una monotonía creciente, es decir, al aumentar el factor de ocupación crece también la resistencia térmica del termosifón.

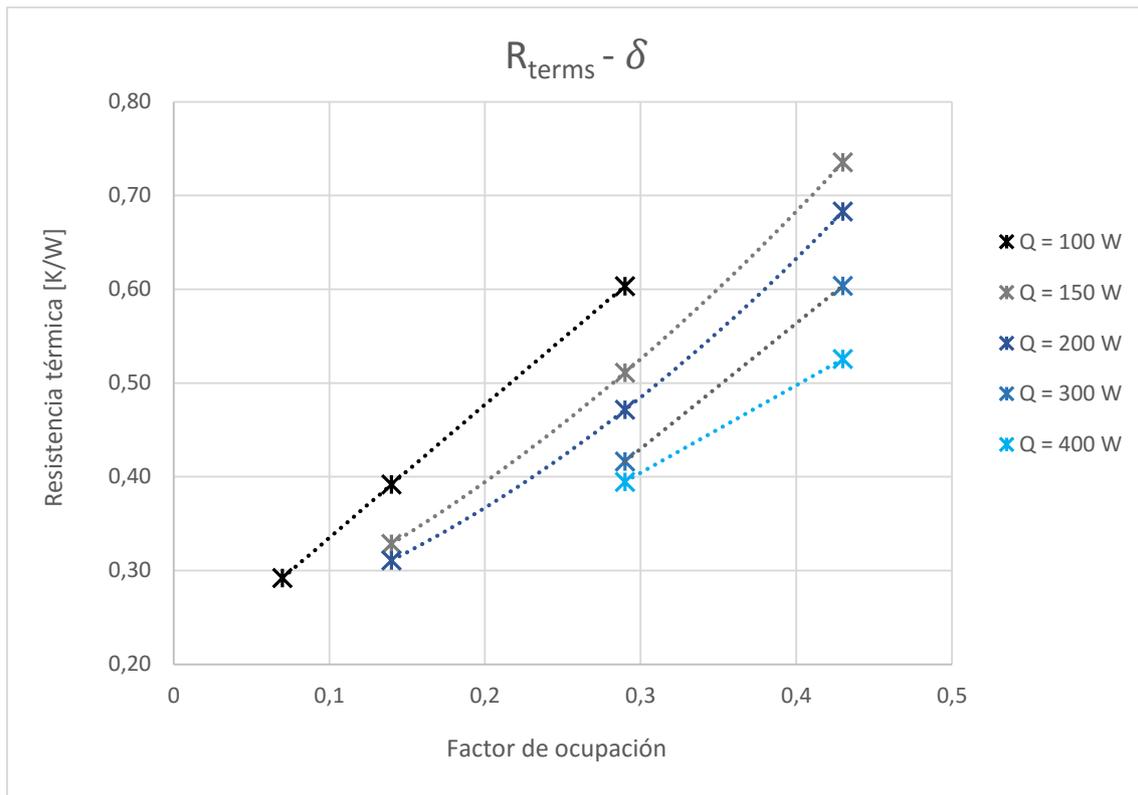


Figura 6.30 Gráfica de la resistencia térmica del termosifón frente a diferentes valores del factor de ocupación.

Para analizar la tendencia de las curvas se debe tomar otro enfoque y pensar en el termosifón como un disipador instalado con un único módulo, la función del disipador en este caso será aumentar el área efectiva de disipación del módulo. Para una misma potencia de disipación un menor número de módulos termoeléctricos implica que haya más área efectiva de disipación por cada módulo lo cual supondría un descenso de la resistencia térmica del termosifón. Si hubiera un mayor número de módulos el área efectiva de disipación debería repartirse entre los mismos haciendo que el ratio de área efectiva por módulo disminuya lo cual supone un aumento de la resistencia térmica del termosifón.

6.3.3 Análisis estadístico de los ensayos

En este capítulo se recoge una descripción del trato estadístico que se ha dado a los datos a fin de poder mostrar los resultados con sus respectivas incertidumbres. Dichos valores se pueden apreciar reflejados como barras de error en la figura 6.28.

El cálculo de la incertidumbre de la resistencia térmica dependerá de dos términos, la incertidumbre asociada al error sistemático, es decir, la relacionada con la precisión de los equipos de medida y otro término asociado al error experimental o aleatorio. Además, se deberá tener en cuenta un factor multiplicador a la expresión compuesta por ambos términos citados que dependerá de la distribución estadística que sigan los datos tratados.

La incertidumbre asociada al error sistemático de la resistencia térmica del termosifón debe calcularse a través de las expresiones pertinentes al cálculo de la incertidumbre de funciones dependientes de otras variables. Esto es así debido a que la resistencia térmica es una medida indirecta calculada a partir de una expresión que depende tanto de la temperatura mostrada

por las sondas como de la potencia cedida por la fuente. En dicho cálculo será necesario introducir el valor de la incertidumbre que aportan las sondas, que a su vez dependerá del número de sondas, y el valor de la incertidumbre de los aparatos utilizados para medir la potencia de la fuente.

El término asociado al error aleatorio es conocido como la desviación típica de la media, es un término representativo de la aleatoriedad del ensayo pues depende del número de muestras o réplicas realizadas para el cálculo de un punto de ensayo. Este término se calcula como la desviación típica de los datos dividida por la raíz del número de muestras.

Se puede pensar que al realizar un elevado número de muestras se reduce la incertidumbre asociada al error aleatorio, sin embargo, carece de importancia comparado con la incertidumbre sistemática debido a que normalmente posee un valor mucho menor.

6.3.4 Comparación de resultados frente a los obtenidos con el modelo computacional

Finalizados los ensayos y concluido el tratamiento de datos obtenidos, llega el momento de comprobar si los resultados experimentales se acercan a los predichos por el modelo desarrollado el Grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Evidentemente el modelo computacional se debe ajustar a los valores obtenidos experimentalmente y no al revés. En un principio el modelo podría predecir el comportamiento de forma ideal, es decir, como si el sistema se comportase tal y como dictaminan las ecuaciones que lo definen. Sin embargo, la existencia de innumerables pérdidas, y fenómenos cuyo control se escapa de las manos del ensayador hacen que el comportamiento del termosifón no sea así.

Introducidos los parámetros que determinan cada ensayo en el modelo, se obtienen resultados calculados en los mismos puntos que los determinados experimentalmente. Estos resultados se muestran sobre la gráfica de resistencia térmica del termosifón frente a la potencia de la fuente para poder comparar las predicciones del modelo con lo experimental.

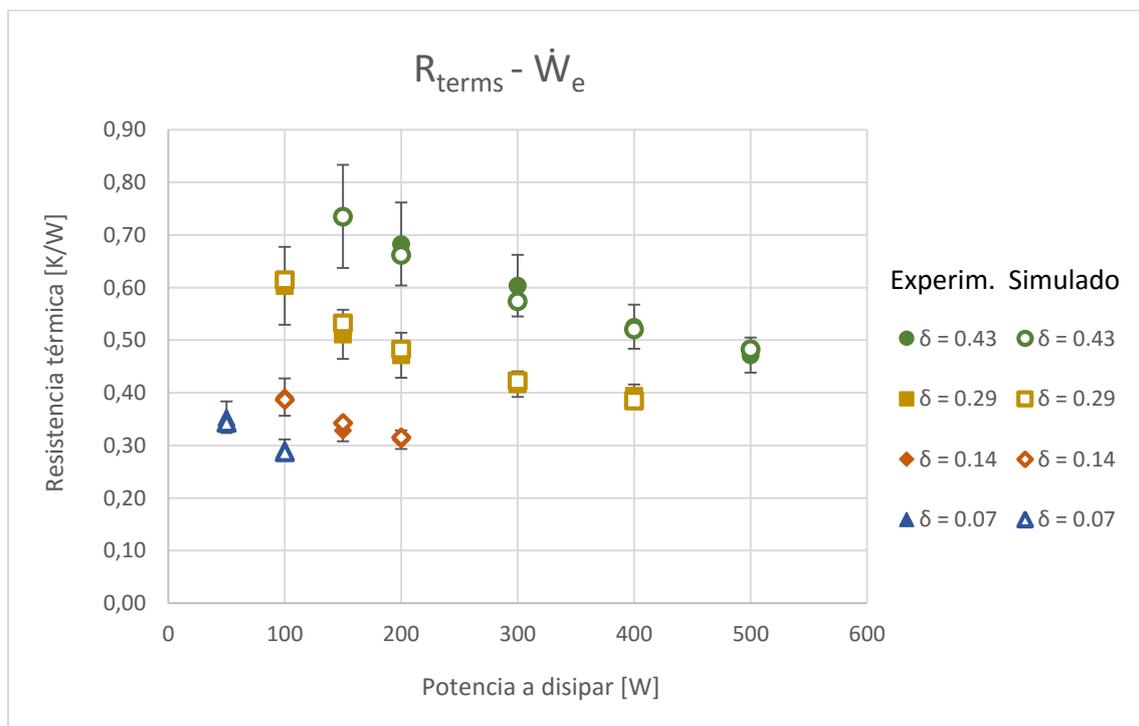


Figura 6.31 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón frente a la potencia disipada para valores experimentales y simulados.

Se observa como los valores predichos por el mismo se sitúan dentro de las barras de error permisibles para cada punto de ensayo. Estas barras de error determinan la incertidumbre de la resistencia térmica del termosifón. Se concluye de esta forma y a través de un análisis estadístico más exhaustivo que el modelo computacional es capaz de predecir el comportamiento real del termosifón, con una determinada precisión.

6.3.5 Comparación de los resultados frente a los obtenidos usando un dissipador de aletas

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del termosifón junto con los obtenidos de un estudio que caracterizó el comportamiento de un dissipador de aletas. La razón por la cual se plantea esta comparación es demostrar la mejora que se consigue al utilizar un intercambiador con sistema termosifón y cambio de fase.

El estudio del dissipador de aletas se realizó con un dissipador de 190 mm de largo, 230 mm de ancho y 14.5 mm de espesor que posee unas aletas de 39.5 mm de alto y de 1.5mm de espesor espaciadas 3.3 mm entre ellas. Las configuraciones de los módulos y las potencias disipadas ensayadas fueron las mismas que las utilizadas para la caracterización del termosifón, es por ello que se pueden utilizar estos resultados para sacar conclusiones comparativas de ambos estudios. La diferencia fundamental de este ensayo es que además del dissipador es necesario el uso de dos ventiladores que aumenten el flujo de aire que circula a través de las aletas consiguiendo con ello una mejora del coeficiente de convección y por tanto una mejor disipación de calor al ambiente. El hecho de poseer ventiladores supone la necesidad de alimentarlos y mantenerlos debido a la presencia de componentes móviles que restan de robustez a este sistema. Si se destina el uso de estos dissipadores a sistemas de generación termoeléctrica, la presencia de un consumo de potencia por parte de dichos ventiladores se ha de tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo de la eficiencia del sistema viéndose afectado negativamente por la presencia de dicho consumo.

La potencia con la que se alimenta a los ventiladores puede ser ajustada antes de realizar cada ensayo, de ella dependerá el flujo másico de aire que circule a través de las aletas tal y como se puede ver en la tabla 6.3. Cuanto mayor sea el flujo másico de aire circulante mayor será la potencia disipada al ambiente y por tanto menor la resistencia térmica del dissipador.

Tabla 6.3 Relación de la potencia de consumo de los ventiladores con el flujo másico de aire conseguido.

V1 (W)	V2 (W)	Total (W)	Flujo másico (kg/s)
0,42	0,42	0,84	0,024
1,28	1,28	2,56	0,043
3	3	6	0,060
5,36	5,36	10,72	0,074

Una vez fueron determinados los ensayos y las potencias de ventilación escogidas se realizaron los ensayos cuyos datos son tratados junto con los obtenidos de la caracterización del termosifón para representar las siguientes gráficas donde se muestran la resistencia térmica en función de la potencia disipada para cada una de las configuraciones.

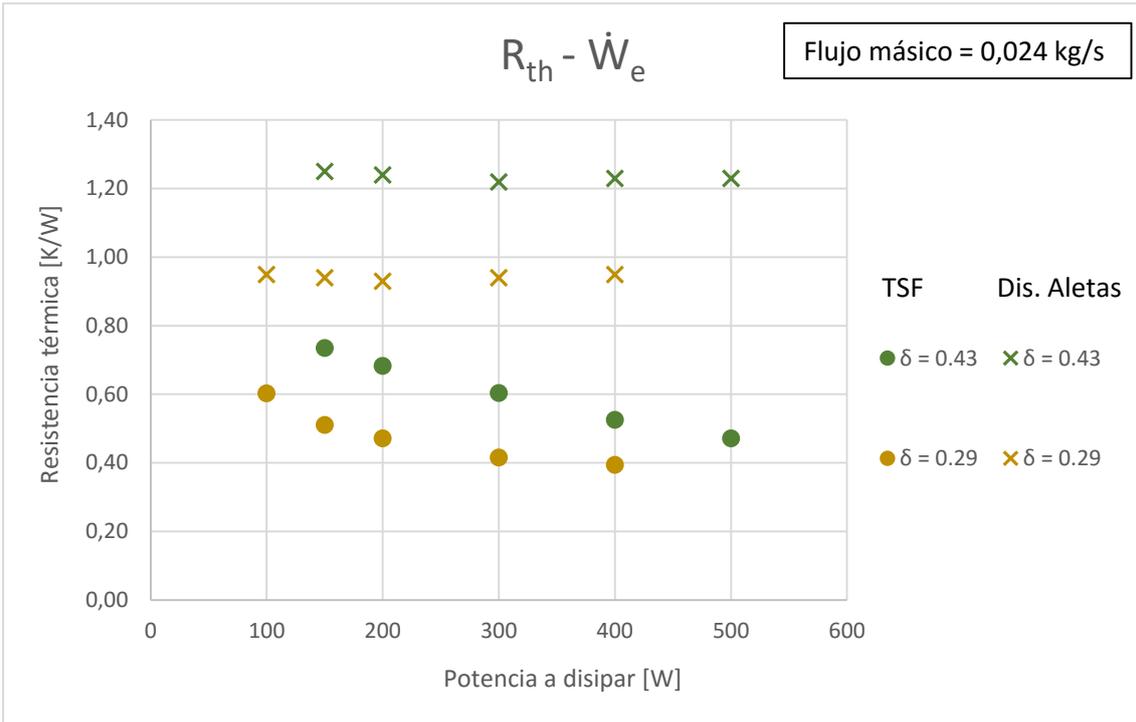


Figura 6.32 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la mínima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de doce y ocho módulos.

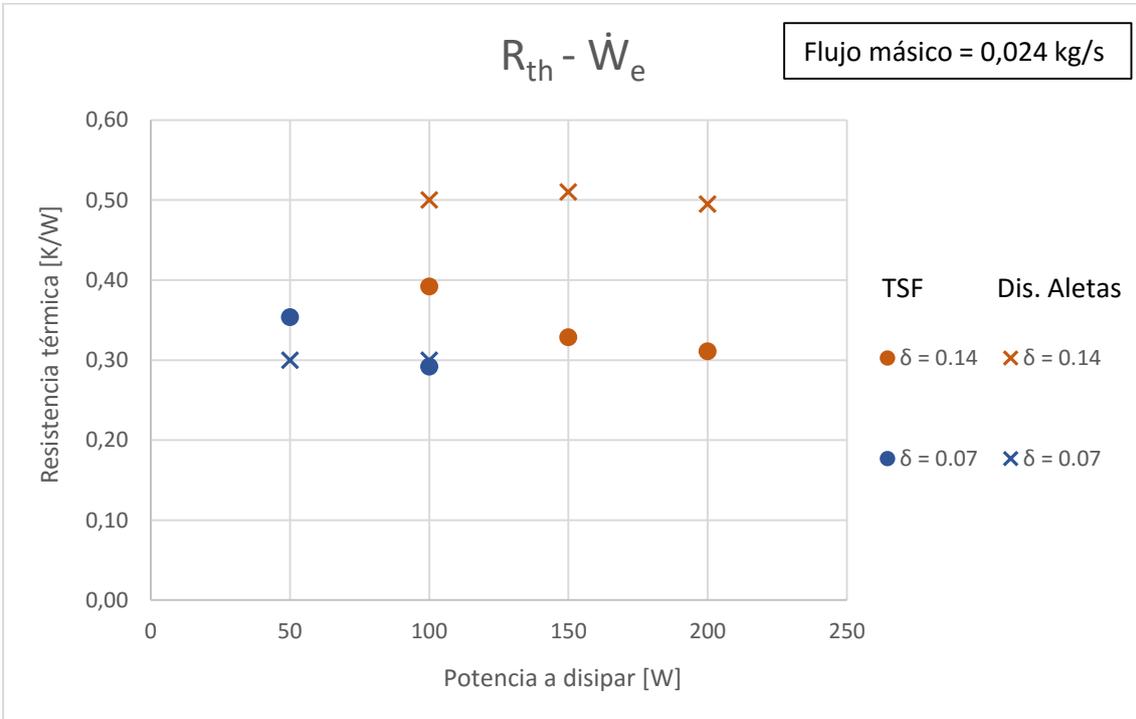


Figura 6.33 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la mínima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de cuatro y dos módulos.

Como se puede observar en las figuras 6.32 y 6.33, para una potencia mínima de ventilador la resistencia térmica del termosifón es claramente inferior en prácticamente todos los puntos. A bajos flujos de calor suministrados por la fuente se puede observar en la configuración de dos módulos como para el flujo disipado más bajo la resistencia térmica del disipador de aletas es inferior y a partir de ese punto los valores tienden a ser similares a los del termosifón.

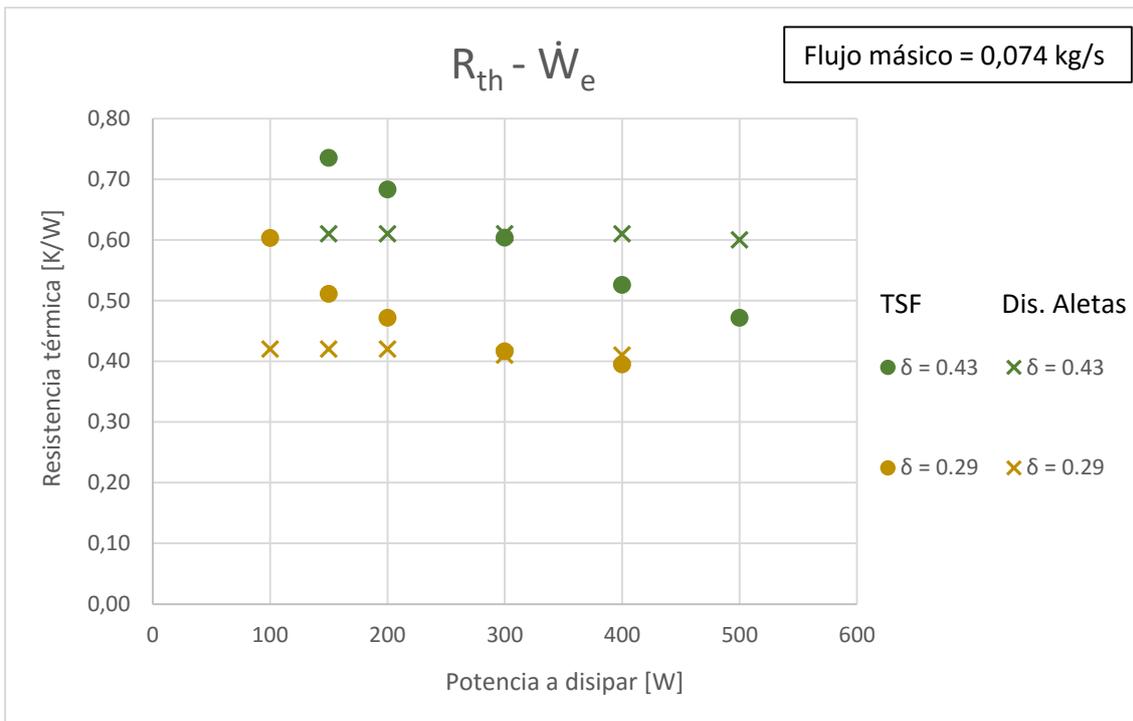


Figura 6.34 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la máxima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de doce y ocho módulos.

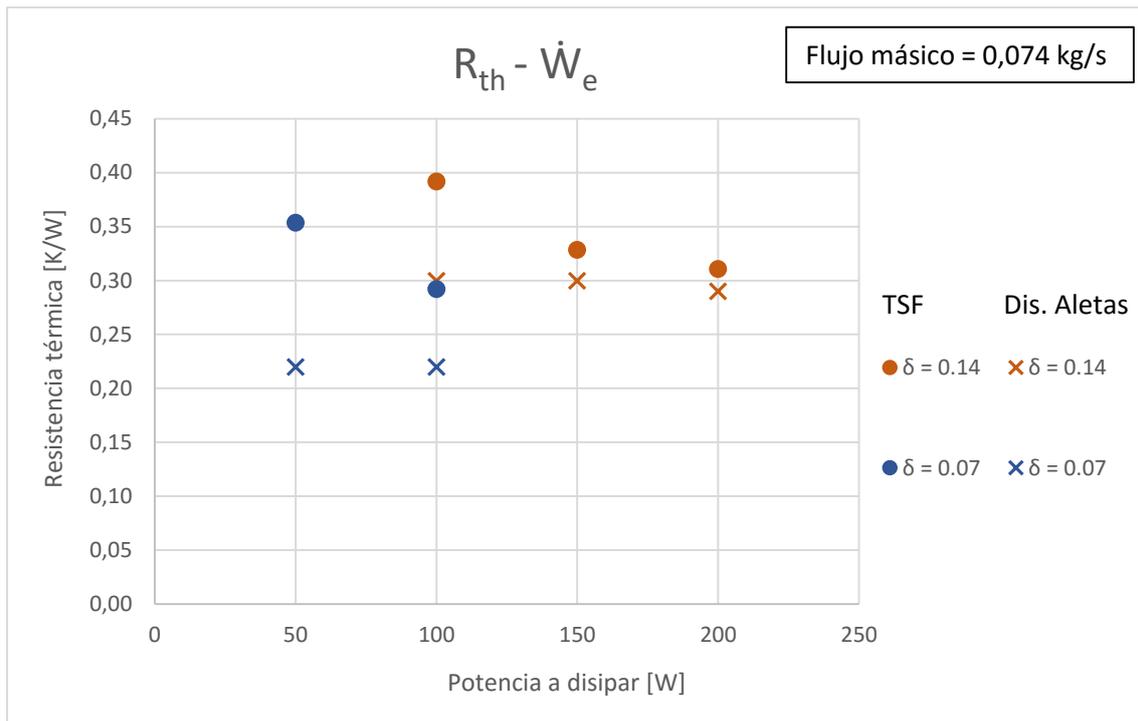


Figura 6.35 Gráfica comparativa de la resistencia térmica del termosifón y de la del disipador de aletas con la máxima potencia de ventilador frente a la potencia disipada suministrada por la fuente para configuración de cuatro y dos módulos.

Para los casos representados en las figuras 6.34 y 6.35 se observa como los valores de la resistencia térmica del disipador de aletas han disminuido. Debido a la horizontalidad que presentan las curvas de resistencia para cada configuración y al descenso que sufren debido al aumento de la potencia del ventilador, cortan a las curvas de resistencia térmica del termosifón. Esto hace que cuando hay que disipar bajas potencias la resistencia del disipador de aletas sea menor que la del termosifón, pero que llegados a un punto sea el termosifón quien mantenga valores de resistencia menor a medida que se avanza en el valor de las potencias disipadas. Sin embargo, para las configuraciones de dos y cuatro módulos a vista de los resultados mostrados en la gráfica 6.35, la resistencia térmica del disipador de aletas es inferior a la del termosifón.

Una de las conclusiones que se pueden sacar de ambas gráficas es que la resistencia térmica del disipador de aletas no se ve influida por el aumento de la potencia a disipar como ocurría con el termosifón, sino que los valores presentan un valor de resistencia prácticamente constante para cada configuración. Sin embargo, el comportamiento que presenta al variar el factor de ocupación si es similar, es decir, al aumentar el número de módulos aumenta la resistencia térmica del disipador. Dicha resistencia térmica se ve afectada también por la potencia elegida para los ventiladores, haciendo que cuanto mayor sea la potencia de los mismos menores sean los valores de las resistencias obtenidas.

Con objeto de clarificar las conclusiones planteadas se procede a ejemplificarlas numéricamente. Supóngase un sistema de generación que es capaz de generar 2 vatios por cada módulo, de dicho sistema se han conseguido los datos ensayados que han sido utilizados para realizar este estudio comparativo. Evidentemente para que una comparación se realice de forma adecuada, han de usarse puntos de ensayo iguales que se den en ambos casos. Los puntos elegidos para este ejemplo numérico son:

1. Configuración de doce módulos disipando 300 vatios, en el caso del disipador de aletas con una potencia de ventilación de 5.36 vatios por ventilador.

2. Configuración de ocho módulos disipando 100 vatios, en el caso del disipador de aletas con una potencia de ventilación de 1.28 vatios por ventilador
3. Configuración de cuatro módulos disipando 100 vatios, en el caso del disipador de aletas con una potencia de ventilación de 1.28 vatios por ventilador.
4. Configuración de dos módulos disipando 100 vatios, en el caso del disipador de aletas con una potencia de ventilación de 0.42 vatios por ventilador.

Con estos datos se plantea una tabla que muestre los resultados de usar un sistema u otro.

Tabla 6.4 Valores comparativos entre el funcionamiento de un termosifón y un disipador de aletas en un sistema de generación.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Módulos	12	8	4	2
Potencia por módulo	2	2	2	2
Pot. eléc. generada	24	16	8	4
Consumo TSF	0	0	0	0
Consumo dis. aletas	10,72	2,56	2,56	0,84
Neto (TSF)	24	16	8	4
Neto (ALETAS)	13,28	13,44	5,44	3,16
	45 %	16 %	32 %	21 %

El consumo que supone el uso de ventiladores a priori se puede pensar que es mínimo o pequeño, sin embargo, si se compara con la potencia que es capaz generar dicho sistema se ve claramente como supone una elevada diferencia que contribuirá de forma negativa al cálculo de la eficiencia global del sistema de generación.

Se llega a la conclusión final de que el uso de un termosifón es mejor que el de un disipador de aletas por diversos motivos. El primero de ellos es que se ve en las gráficas como la mayor parte de las veces el termosifón posee valores de resistencia térmica menores que el disipador de aletas produciéndose excepciones en las configuraciones de dos y cuatro módulos a máxima potencia de ventilador. Otro de los motivos es que el termosifón es capaz de alcanzar puntos de ensayo similares a los del disipador de aletas funcionando en sus mejores condiciones, es decir, con los ventiladores a máxima potencia. El motivo fundamental por el cual el termosifón es un mejor sistema de disipación es la ausencia de partes móviles que permitan el correcto funcionamiento eximiéndolo de un mantenimiento continuo o de un consumo de potencia.

6.3.6 Resultados de Generación

Se programaron los ensayos de generación de forma similar a los ensayos de caracterización, es decir, estableciendo un código alfanumérico para nombrarlos. Una vez realizados los mismos y tras haber recogido y obtenido la máxima información posible de ellos se pueden establecer una serie de conclusiones. La primera y más importante de ellas es que cuanto mayor es el salto de temperatura existente entre las caras de los módulos mayor es la potencia generada por los mismos, de ahí la importancia de tener un buen disipador de calor que contribuya a que este salto sea elevado. A continuación, se muestra un gráfico donde se puede apreciar la variación

de la potencia generada en función del salto de temperaturas para tres ensayos realizados con la configuración de dos módulos conectados a una resistencia de carga de 7.609 Ω .

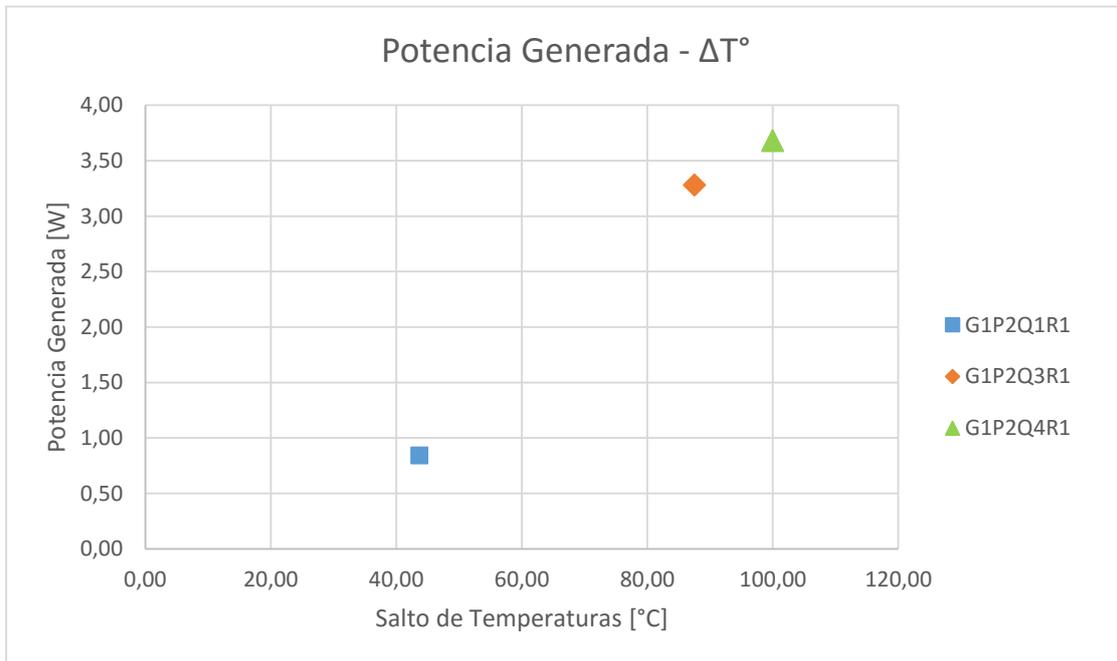


Figura 6.36 Gráfico de la potencia total generada frente al salto de temperatura existente entre las caras para ensayos de dos módulos.

7 CONCLUSIONES

En este apartado se procederá a realizar una recopilación de todas las conclusiones a las que se ha llegado tras realizar los ensayos de caracterización y el posterior estudio y post-tratamiento de los datos obtenidos.

1. Realizado el estudio sobre la influencia de la potencia calorífica suministrada por la fuente en la resistencia térmica del termosifón, se llega a la conclusión de que a medida que esta aumenta se produce una reducción de dicha resistencia para todas las configuraciones. Esto se debe a que este aumento propicia un crecimiento en el salto de temperaturas lo cual mejora los coeficientes de transmisión de calor de las diferentes resistencias que modelan el comportamiento del termosifón, dicho de otra forma, produciéndose una disminución de las mismas.
2. Tras analizar la influencia del factor de ocupación en la resistencia térmica del termosifón se concluye que el área efectiva del termosifón se reparte entre el número de módulos que conformen la configuración ensayada. Por lo tanto, para una misma potencia de disipación al aumentar el número de módulos la resistencia térmica del termosifón es mayor debido a que debe repartir su área de disipación entre más módulos y a medida que disminuye el número de los mismos mejora porque cada módulo poseerá más área efectiva para disipar su calor.
3. Del análisis estadístico se concluye que el error cometido durante los ensayos se compone de dos factores: un error sistemático asociado a la incertidumbre de los aparatos de medida y un error aleatorio asociado al número de réplicas realizadas para cada punto de ensayo. La importancia que posee el error sistemático en el cómputo del error final es mucho mayor que la del error aleatorio por ello a pesar de que se realicen muchas réplicas no se consigue disminuir de forma significativa el error total del ensayo.
4. Una vez realizado los ensayos de caracterización y tras haber programado los mismos en el modelo de simulación se observó cómo los puntos obtenidos con el modelo no disciernen demasiado de los obtenidos experimentalmente, además se encuentran dentro de los límites de error calculados previamente. Por ello se puede concluir que el modelo computacional es capaz de predecir el comportamiento de un termosifón con una determinada precisión.
5. Los resultados obtenidos con la caracterización experimental del termosifón se comparan con los obtenidos al realizar la caracterización de un disipador de aletas asistido por dos ventiladores. El disipador de aletas pese presentar un aumento del coeficiente de convección debido a la presencia de ventiladores presenta resistencias térmicas más elevadas que el termosifón. Por lo tanto, se concluye que el termosifón es mejor disipador porque carece de partes móviles que le resten de rigidez y disminuyan su eficiencia por presentar un consumo de potencia necesario para su funcionamiento.
6. Una vez evaluados los datos obtenidos durante los ensayos de generación se llega a la conclusión de que la potencia generada crece con el aumento del salto de temperaturas existente entre las caras de los módulos.

8 LINEAS DE FUTURO

En este capítulo se presentan las diferentes investigaciones que podrían preceder tomando como punto de partida este proyecto:

1. Realizar un amplio estudio de generación que permita obtener curvas de potencia generada frente a resistencia de carga. Con la representación de estas gráficas se podrá conocer la resistencia de carga óptima para diferentes sistemas.
2. Caracterizar el termosifón con otro fluido de trabajo, lo cual permitirá conocer más sobre el comportamiento del mismo y con ello realizar la elección de un refrigerante óptimo en función de las condiciones de trabajo.
3. Diseñar cualquier tipo de intercambiador de calor con sistema termosifón y cambio de fase, una vez conseguida la validación del modelo computacional del mismo.
4. Optimizar un sistema de generación termoeléctrico con la implementación de termosifones, lo cual llevaría a una mejora de su eficiencia puesto que al tratarse de un disipador de calor carente de partes móviles no consume potencia.
5. Desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica domésticos e industriales que permitan el aprovechamiento del calor residual para la producción de energía eléctrica.

9 REFERENCIAS

- [1] R. «Red Eléctrica de España,» [En línea]. Available: <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2015/12/la-demanda-de-energia-electrica-crece-un-1-9-en-el-2015>. [Último acceso: 11 mayo 2016].
- [2] P. Aranguren, «Estudio y optimización de los sistemas de intercambio de calor en generación termoeléctrica aplicada al aprovechamiento del calor residual,» UPNA, 2016.
- [3] D. M. Fernández Ordoñez, «Energía nuclear en la propulsión espacial,» 1 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://casanchi.com/fis/nuclearespacial01.pdf>. [Último acceso: 31 Mayo 2016].
- [4] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett y Y. I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, 19998.
- [5] D. Rowe, *Handbook of thermoelectric*, CRC, 1997.
- [6] D. Astrain, J. Vían y M. Dominguez, «Increase of COP in the Thermoelectric Refrigeration by the Optimization of Heat Dissipation,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, nº 17, pp. 2183-2200.
- [7] J. Biel, *Formalismos y métodos de la termodinámica*, vol. 2, Reverté, 1997.
- [8] J. Sunderland y N. Burak, «Influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric power generator,» *Solid-State electronics*, vol. 7, pp. 417-465, 1964.
- [9] F. White, *Mecánica de fluidos.*, 6ª ed., Mc Graw Hill, 2008, pp. 137-224.
- [10] M. Cobble, «Analysis of a Thermoelectric Device Having Contact Resistance,» *Xlth International Conference on Thermoelectrics*, 1992.
- [11] D. Astrain y J. Vían, «Computational Model for Refrigerators based on Peltir Effect Application,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, nº 17, pp. 3149-3162, December 2005.
- [12] A. C. Yunus , *Transferencia de calor*, 2ª ed., Mc Grae Hill, 2004.
- [13] H. Foster y N. Zuber, «Bubble dynamics and boiling heat transfer,» *AIChE*, vol. 1, nº 2955, pp. 531-535, 1955.
- [14] M. Shah, «An Improved and Extended General Correlation for Heat Transfer During Condensation in Plain Tubes,» *HVAC&R Res.*, vol. 15:5, pp. 889-913, 2009.
- [15] T. Tsubouchi y H. Masuda, *Natural convection heat transfer from horizontal cylinders with circular fins*, Sendai, Japan: Fac. Technol. Tohokugakin Univ., 1970.

