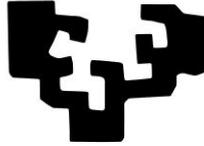


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA APORTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA TERMOELÉCTRICA A LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA CLIMATIZACIÓN DEL ENTORNO DOMÉSTICO.

Doctorando

Gustavo García Ramos

Directores de Tesis

Dr. D. Koldobika Martín Escudero

Dr. D. Francisco Javier Aranceta Aguirre

Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

Octubre 2019

***“El dulce fruto que por tantas ramas
buscando va el afán de los mortales,
hoy logrará saciar toda tu hambre”***

Dante Alighieri



Agradecimientos

Quiero agradecer a las muchas personas que me han apoyado y ayudado, que me han cuidado y soportado, que me han divertido y han compartido conmigo los momentos más difíciles durante los todos estos años que ha durado mi investigación para la tesis doctoral, sobre todo os quiero agradecer a ti Belén, Vega, Rodrigo y Avril. Y como no, a mis padres, Teresa e Hilario, por los valores inculcados, y a mi hermano Rubén.

También a mis compañeros de trabajo, y en especial a Marta, Mauri, Jose Luis y Pablo, con quienes he compartido tantas ilusiones y buenos momentos, y que seguro seguiré haciendo. Por alejar el desánimo, y aportarme con vuestra experiencia y saber hacer.

A Dario y Julen, a quienes tuve la suerte de dirigir sus PFM, por sus incontables aportaciones.

Me gustaría, también, agradecer a mis directores de tesis, el Dr. Koldobika Martín y el Dr. Javier Aranceta por su apoyo, dedicación, orientación y sugerencias durante este trabajo de investigación y ante todo, por su paciencia.

Y, por último, me gustaría agradecer a la Agencia Vasca de Desarrollo Industrial (SPRI) por la financiación económica del proyecto “*Fancoil sin cables para el sector residencial*” (SMARTFAN), ZL-2017/00724 del Programa HAZITEK, e igualmente por la financiación del proyecto “*High Temperature Oxide Module*” (HITOM), KK-2017/00099 del Programa ELKARTEK, que han posibilitado el desarrollo de la presente tesis.



Resumen

La creciente demanda energética mundial plantea un reto para el conjunto de la sociedad que deberá ser abordado desde el empleo de diferentes fuentes energéticas y con tecnologías variadas, pero siempre con un especial énfasis en la eficiencia energética, el ahorro y la recuperación de energía residual. El entorno industrial y residencial deben adaptarse a las medidas que la U.E. adopta con tales fines, y para este propósito la termoelectricidad se presenta como un aliado capaz de transformar directamente el calor residual en electricidad.

La presente tesis doctoral estudia el potencial de ahorro energético en el entorno doméstico mediante la generación de electricidad por efecto Seebeck a partir del calor del circuito de calefacción. Las alternativas al sistema de calefacción basado en radiadores orientadas a la mejora de la eficiencia pasan por reducir la temperatura de trabajo del elemento radiante o utilizar un dispositivo convector activo que homogenice las temperaturas y reduzca los tiempos de trabajo, el consumo y las pérdidas. Este elemento activo o ventiloconvector lleva asociadas dos afectaciones en modo de consumo eléctrico y de acondicionamiento del entorno para su funcionamiento. Y es en este punto donde la termoelectricidad juega un papel clave, ya que permite obtener toda la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del ventiloconvector del calor que el propio dispositivo quiere distribuir, y lo realiza además de manera autónoma sin ningún tipo de obra ni acondicionamiento.

El objetivo del presente trabajo de investigación es contribuir en el conocimiento de la aportación de la tecnología termoeléctrica a la mejora de la eficiencia energética en el entorno doméstico mediante el estudio de un novedoso dispositivo termoeléctrico, analizándose su modo de funcionamiento y estudiando su respuesta en cuanto a potencia eléctrica generada y eficiencia de generación. Se propone una modelización computacional analítica simplificada para la caracterización de estos dispositivos, que predice el comportamiento del generador completo partiendo de la temperatura del agua de calefacción y la temperatura del agua de refrigeración. Con el objetivo de validar del modelo se desarrolla un equipo ventiloconvector termoeléctrico completo.

La correcta modelización de los diferentes componentes de un ventiloconvector termoeléctrico es fundamental para garantizar la validez de los argumentos de la tesis. Entre los diferentes componentes, además de los intercambiadores de calor, son los módulos termoeléctricos los que en mayor medida afectan al rendimiento y costo del conjunto.

En segundo lugar, se desarrolla una metodología que permite realizar una comparativa en términos de eficiencia entre radiadores y ventiloconvectores. Sobre la base del ahorro comparativo entre radiador, ventiloconvector y ventiloconvector termoeléctrico, se analiza el impacto económico y medioambiental que la implantación de estos dispositivos podría ocasionar en el entorno cercano del País Vasco. El alcance del impacto se estima en una repercusión económica de 90 € ahorrados por hogar y año, y medioambientalmente podría suponer el equivalente a 260.000 árboles adultos.

En último lugar, se ha estudiado una nueva estructura termoeléctrica con una geometría atípica, con ventajas para el futuro desarrollo de sistemas de generación de alta temperatura. Para su estudio, se ha desarrollado un modelo numérico implícito computacional que ha confirmado las reivindicaciones protegidas mediante patente europea. Se ha desarrollado un nuevo proceso de fabricación de un material óxido orientado a la reducción de costes, con cuyo material se desarrollan unos módulos que permiten validar el modelo y el funcionamiento de la nueva estructura orientada al bajo coste, la robustez y el cumplimiento de la normativa RoHS. La nueva estructura ha superado más de 4000 ciclos térmicos y más de 8 horas a llama continua sin variación significativa de la resistencia interna.



Índice

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.-	Contexto actual.....	3
1.2.-	Introducción a la tecnología termoeléctrica	5
1.2.1.-	Coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson	6
1.2.2.-	Conductividad eléctrica y conductividad térmica.....	8
1.2.3.-	Eficiencia de generación y figura de mérito.....	8
1.2.4.-	Materiales termoeléctricos.....	10
1.2.5.-	Módulos termoeléctricos.....	12
1.3.-	Evolución histórica de la tecnología termoeléctrica	14
1.4.-	Motivación del presente trabajo de investigación	16
1.5.-	Ventiloconvector: definición	19
1.6.-	Legislación vigente	19
1.7.-	Objetivos de la tesis.....	22
1.8.-	Estructura de la tesis	22
1.8.1.-	Resumen de metodologías y modelos aplicados en la tesis.....	24
CAPÍTULO 2	ESTADO DEL ARTE.....	25
2.1.-	Introducción.....	27
2.2.-	Estado del arte de los materiales termoeléctricos.	27
2.2.1.-	Materiales empleados en los generadores termoeléctricos.	27
2.2.2.-	Materiales termoeléctricos basados en óxidos.....	29
2.2.3.-	Materiales termoeléctricos basados en polímeros	30
2.3.-	Situación comercial de los dispositivos termoeléctricos	30
2.3.1.-	Módulos termoeléctricos comerciales	30
2.3.2.-	Costes de los módulos termoeléctricos.....	32
2.3.3.-	Generadores termoeléctricos comerciales	33
2.3.4.-	Análisis comparativo de las soluciones comerciales.....	37
2.3.5.-	Estudio de sistemas termoeléctricos	39
2.4.-	Sistemas alternativos de generación de energía.....	41
2.4.1.-	Ciclo Stirling	41
2.4.2.-	Ciclo Erikson	41
2.4.3.-	Ciclo Rankine Orgánico.	41
2.5.-	Estado del arte de los emisores de calor de sistemas de calefacción.....	42
2.5.1.-	Eficiencia de ventiloconvectores frente a radiadores	42
2.5.2.-	Sistemas alternativos en emisores de calor: radiadores ventilados.....	43



2.5.3.-	Sistemas termoeléctricos con ayuda a la ventilación	46	
2.6.-	Estudio de patentes en sistemas de calefacción termoeléctricos	48	
2.6.1.-	Ventiloconvectores con sistemas termoeléctricos:	48	
2.6.2.-	Ventiloconvectores con sistemas Stirling	48	
2.7.-	Conclusiones y análisis crítico del estado del arte	49	
2.7.1.-	Resumen breve del estado del arte y ventajas del sistema propuesto	49	
2.7.2.-	Conclusiones del estado del arte	50	
CAPÍTULO 3	ARQUITECTURA Y MODELIZADO DEL SISTEMA TERMOELÉCTRICO	53	
3.1.-	Introducción	55	
3.2.-	Marco teórico y modelización de un módulo termoeléctrico	55	
3.2.1.-	Estado del arte de los modelos	55	
3.2.2.-	Modelo numérico teórico	57	
3.2.3.-	Modelización del comportamiento termoeléctrico.	59	
3.2.4.-	Validación teórica del modelo numérico termoeléctrico	65	
3.2.5.-	Limitaciones del modelo teórico	70	
3.3.-	Diseño y desarrollo del sistema de generación termoeléctrico	70	
3.3.1.-	Especificaciones técnicas del ventiloconvector de partida	70	
3.3.2.-	Cálculo y dimensionado del sistema generador termoeléctrico	72	
3.3.3.-	Diseño CAD y prototipado del sistema termoeléctrico	82	
3.3.4.-	Sistema generador termoeléctrico de 18 W	92	
3.4.-	Entorno de caracterización del TEG	94	
3.4.1.-	Banco de ensayos para la caracterización del sistema termoeléctrico	94	
3.4.2.-	Mediciones y sensórica	98	
3.4.3.-	Ensayos de caracterización	101	
3.5.-	Modelo computacional unidimensional equivalente del sistema termoeléctrico.	103	
3.5.1.-	Hipótesis y condiciones de contorno	105	
3.5.2.-	Ecuaciones que gobiernan el sistema termoeléctrico	105	
3.5.3.-	Modelo térmico simplificado del sistema termoeléctrico.	109	
3.5.4.-	Diagrama de flujo y algoritmo del proceso de cálculo	112	
3.6.-	Resultados y caracterización experimental del sistema termoeléctrico	114	
3.6.1.-	Comportamiento del sistema termoeléctrico	114	
3.6.2.-	Caracterización del sistema	124	
3.6.3.-	Resultados del sistema termoeléctrico	133	
3.6.4.-	Comparación de resultados de los modelos	140	
3.7.-	Conclusiones	142	
CAPÍTULO 4	ARQUITECTURA DEL VENTILOCONVECTOR TERMOELÉCTRICO Y	METODOLOGÍA CARACTERIZACIÓN	143
4.1.-	Introducción	145	

4.2.-Diseño completo del VC-TE.	145
4.2.1.- Estudio de alternativas de diseño para la electrónica de potencia.	145
4.2.2.- Diseño y desarrollo del VC-TE	152
4.2.3.- Detalle constructivo del prototipo VT-TE funcional.	176
4.3.-Entorno de caracterización del VC-TE.	181
4.3.1.- Banco de ensayos para la caracterización de sistema termoeléctrico.	181
4.3.2.- Sistema de adquisición de datos.	184
4.3.3.- Dispositivos de experimentación y caracterización.	184
4.4.-Resultados y caracterización experimental del VC-TE	187
4.4.1.- Respuesta del VC-TE en cámara refrigerada	187
4.4.2.- Caracterización del VC-TE.	190
4.4.3.- Validación del modelo simplificado.	194
4.5.-Evidencia de la mejora de la eficiencia de los ventilosconvectores frente a radiadores convectivos	197
4.5.1.- Factores relacionados con la eficiencia de los sistemas de calefacción.	197
4.5.2.- Modelado 3D y simulación.	199
4.5.3.- Procedimiento de ensayo.	201
4.5.4.- Comparativa de simulación vs ensayo.	202
4.5.5.- Metodología de cálculo de los consumos.	205
4.5.6.- Cálculo del consumo energético.	209
4.5.7.- Estimación de la mejora de la eficiencia	211
4.6.-Conclusiones.	211
CAPÍTULO 5 IMPACTO ECONÓMICO DEL VENTILCONVECTOR TERMOELÉCTRICO EN LA CLIMATIZACIÓN DEL ENTORNO DOMÉSTICO Y DEL PAÍS VASCO.	213
5.1.-Introducción.	215
5.2.-Costes estimados asociados al VC-TE.	215
5.2.1.- Costes asociados al Fan-coil comercial.	215
5.2.2.- Costes del VC-TE prototipo.	216
5.2.3.- Costes del VC-TE comercial.	217
5.3.-Análisis del mercado y potencial de impacto en el País Vasco.	219
5.4.-Conclusiones	224
CAPÍTULO 6 ESTUDIO DE APLICACIÓN DE NUEVA GEOMETRÍA UNILEG EN PI y NUEVO MATERIAL COMO ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE COSTES.	225
6.1.-Introducción.	227
6.2.-Nueva estructura Unileg en \square de dado termoeléctrico	227
6.2.1.- Descripción de la nueva estructura Unileg en \square .	228
6.2.2.- Aplicación del modelo numérico unidimensional a la nueva estructura en \square mediante Matlab.	230



6.2.3.- Estudio de la estructura en \square con modelo numérico unidimensional	236
6.2.4.- Análisis de los resultados.	237
6.2.5.- Patente Europea.	241
6.3.-Potencial de aplicación del nuevo material óxido $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$.	242
6.3.1.- Propiedades del nuevo material.	244
6.3.2.- Entorno de caracterización y testeo	257
6.3.3.- Prototipado de estructuras de material óxido en \square	262
6.3.4.- Resultados	274
6.4.-Nuevo concepto TEG de aplicación al VC-TE.	284
6.4.1.- Diseño del nuevo concepto en discos.	284
6.4.2.- Estado del arte de las etapas elevadoras de ultra baja tensión y muy alta intensidad 286	
6.4.3.- Potencial impacto económico.	287
6.5.- Conclusiones	288
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES GENERALES Y LINEAS FUTURAS	291
7.1.-Introducción.....	293
7.2.-Conclusiones	293
7.3.-Líneas futuras de investigación.....	295
CAPÍTULO 8 APORTACIONES CIENTIFICAS.....	297
8.1.-Publicaciones en revistas internacionales	299
8.2.-Publicaciones en revisión.	299
8.3.-Publicaciones en congresos internacionales	299
8.4.-Patentes europeas.....	300
CAPÍTULO 9 REFERENCIAS.....	301
ANEXO A TÉMINOS Y DEFINICIONES BÁSICAS.....	313
A.1. Términos y definiciones básicas CTE.....	315
A.2. Términos y definiciones básicas Reglamento (UE) 2015/1188 DE LA COMISIÓN de 28 de abril de 2015	316
A.3. Términos y definiciones básicas EN 16430-2:2014	318
ANEXO B GUI INTERACTIVA CON APP DESIGNER EN MATLAB	321
B.1. Base de datos	323
B.2. Componentes.....	324
B.2.1 Administrador de componentes	324
B.2.2 Materiales	325
B.2.3 Módulos	325
B.3. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario	326
ANEXO C SIMULACIÓN DE LA NUEVA ESTRUCTURA EN \square EN ANSYS CON UDF. 327	

C.1. Cálculos y dimensionado del sistema termoeléctrico	329
C.1.1 Geometrías consideradas.....	329
A Geometría convencional.....	329
B Geometría con corte	330
C.1.2 Propiedades de los materiales empleados.....	331
C.2. Modelo desarrollado	332
C.2.1 Descripción del procedimiento de cálculo	332
C.2.2 Resultados	334
C.2.3 Conclusiones	337
C.3. Prototipo y sistema de medida	339
C.3.1 Desarrollo del sistema de medida del módulo TE	339
C.3.2 Parte térmica.....	340
C.3.3 Parte eléctrica	340
C.3.4 Postprocesado	340
C.3.5 Ensayos y resultados.....	340



Lista de figuras

Fig. 1. a) Termopar de aleación metálica de Orkli S.Coop [9], b) ODS con termopar y termopila de Copreci S.Coop.[10]	5
Fig. 2. Detalle de termoelementos de Centro Stirling S.Coop	6
Fig. 3. Esquema de termopar o termoelemento básico.....	6
Fig. 4. Par de termoelementos n y p con unión de cobre.....	7
Fig. 5. Dependencia del coeficiente Seebeck α , la conductividad eléctrica σ , y la conductividad térmica de la concentración de portadores libres. [13].....	11
Fig. 6. Figura de mérito en función de la temperatura para varios materiales termoeléctricos [15].....	11
Fig. 7. a) TE module in cooling mode. b) TE module in power generation mode.	12
Fig. 8. Detalle constructivo de un módulo termoeléctrico. [17].....	13
Fig. 9. Imagen de la capa de barrera mediante microscopía electrónica de barrido.	13
Fig. 10. Detalle de unión de dos termoelementos mediante puente de cobre	13
Fig. 11. Montaje de un módulo termoeléctrico fabricado en Centro Stirling S.Coop.....	14
Fig. 12. Celdas Peltier de Laird Technologies [21], Marlow Industries [22], Melcor [23], y Hebeiltd [24]...	14
Fig. 13. Figura de mérito para materiales semiconductores tipo P [27].....	15
Fig. 14. Figura de mérito para materiales semiconductores tipo N [27]	16
Fig. 15. Representación gráfica del nuevo concepto de VC-TE.	16
Fig. 16.: Esquema de nuevo dispositivo de calefacción: Generador termoeléctrico integrado en Fan-Coil	18
Fig. 17. Descripción conceptual de la propuesta.	18
Fig. 18. Diagrama de la estructura de la tesis	22
Fig. 19. Power Generating Combustor™	33
Fig. 20. Alphabet Energy PowerModule- γ ™	34
Fig. 21. Modelo Thermagy.....	34
Fig. 22 modelos de generadores termoeléctricos GTEG de Kryotherm.	34
Fig. 23. Generador 8550 de Gentherm	35
Fig. 24. Generador termoeléctrico de gas (TGG-150).....	35
Fig. 25. Generador termoeléctrico GTG-200 de Telgen	36
Fig. 26. Thermoelectric oven de Telgen	36
Fig. 27. Generador TEG-LL30-12V de Thermonamic.....	36
Fig. 28. Sistemas termoeléctricos con intercambiadores Aire-Aire desarrollados por Centro Stirling [72]	39
Fig. 29. Sistema de generación termoeléctrico TEG-200-24V con intercambio Líquido-Líquido	39
Fig. 30. Modelo LL-060-12-00-00 de Laird Technologies	40
Fig. 31. Modelo LA-045-24-02-00-00 de Laird Technologies	40
Fig. 32. Esquema de un ventilador [85].....	42
Fig. 33. Ejemplo de distribución de temperatura en una habitación.....	43
Fig. 34. Infografía de funcionamiento de dispositivo RadFan	44
Fig. 35. Producto Radfan para instalación en radiadores.	44
Fig. 36. Imagen térmica radiador con y sin dispositivo Radfan	45
Fig. 37. Dispositivo TermiK de la empresa CEL Sumpark	45
Fig. 38 Reducción del tiempo de calentamiento requerido con Termik.....	45
Fig. 39. Esquema y maqueta de elemento radiante termoeléctrico de la BRNO University of Technology	47
Fig. 40. Sistema del documento de patente WO2016030773A1	48
Fig. 41. Componentes del generador termoeléctrico a resolver	57



Fig. 42. Módulo termoeléctrico completo	60
Fig. 43. Simplificación adoptada del módulo termoeléctrico	60
Fig. 44. Transformación del sistema bidimensional a unidimensional	61
Fig. 45. Modelo de transferencia térmica unidimensional del TEG	61
Fig. 46. Representación gráfica del modelo de transferencia térmica unidimensional	61
Fig. 47. Relación entre problemas continuos y discretos.....	62
Fig. 48. Diagrama de flujo del proceso de cálculo computacional	64
Fig. 49. Resultados de la simulación realizada para el Caso 1. (a) Diferencia de temperaturas entre lado frío y caliente, (b) Calor total de salida del sistema, (c) Potencia eléctrica generada, (d) Tensión en la resistencia de carga. t representa el tiempo x10.....	66
Fig. 50. Resultados de la simulación realizada para el Caso 2. (a) Diferencia de temperaturas entre lado frío y caliente, (b) Calor total de salida del sistema, (c) Potencia eléctrica generada, (d) Tensión en la resistencia de carga. t representa el tiempo x10.....	67
Fig. 51. Resultados del sistema solucionado para un rango de resistencias de 0 hasta 100 Ω para el Caso 1. (a) Intensidad. (b) Tensión de carga. (c) Tensión frente Intensidad. (d) Potencia generada. (e) Potencia generada frente Intensidad.	68
Fig. 52. Resultados del sistema solucionado para un rango de resistencias de 0 hasta 100 Ω para el Caso 2. (a) Intensidad. (b) Tensión de carga. (c) Tensión frente Intensidad. (d) Potencia generada. (e) Potencia generada frente Intensidad	69
Fig. 53. Modelo de ventiloinconvector Aermec OMNIA ULP 11.....	70
Fig. 54. Dimensiones generales del OMNIA ULP 11.....	72
Fig. 55. Coeficiente Seebeck N, P en el rango de temperaturas de trabajo.....	73
Fig. 56. Conductividad térmica N, P en el rango de temperaturas de trabajo	73
Fig. 57. Resistividad eléctrica N, P en el rango de temperaturas de trabajo	74
Fig. 58. Figura de mérito (Z) del material N, P en el rango de temperaturas de trabajo	74
Fig. 59. Figura de mérito (ZT) de materiales N y P en el rango de 0-100°C.....	75
Fig. 60. Eficiencia de los materiales N y P en el rango de 0-100°C.....	75
Fig. 61. Figura de mérito (ZT) de materiales N y P en el rango de 30-70°C.....	75
Fig. 62. Eficiencia de los materiales N y P en el rango de 30-70°C.....	76
Fig. 63. Relación de la potencia con el número de pares.....	78
Fig. 64. Relación del voltaje con el número de pares.....	79
Fig. 65. Relación entre número de pares y los bloques constitutivos del sistema	80
Fig. 66. Intensidad en el sistema termoeléctrico de 24 módulos con carga adaptada.....	80
Fig. 67. Tensión generada por el sistema termoeléctrico de 24 módulos con carga adaptada	81
Fig. 68. Potencia eléctrica generada del sistema generador termoeléctrico.....	81
Fig. 69. Flujo térmico entrante a la parte caliente de los 72 módulos.....	82
Fig. 70. Eficiencia total del sistema termoeléctrico en condiciones no ideales.....	82
Fig. 71. Módulo termoeléctrico seleccionado con agujero central	83
Fig. 72. Características de los módulos seleccionados.....	83
Fig. 73. GERBER de placa electrónica	83
Fig. 74. PCB electrónica de conexión de módulos termoeléctricos	84
Fig. 75. Bloque de módulos termoeléctricos ensamblado	84
Fig. 76. Visión lateral de la PBC electrónica y el bloque de módulos termoeléctricos ensamblado	84
Fig. 77. Montaje de las PCBs con los módulos termoeléctricos	85
Fig. 78. Intercambiadores de calor de aluminio	86
Fig. 79. Disipador de calor de uniformidad térmica superficial de la patente US 4,478,277.....	86

Fig. 80. Disipador líquido del lado caliente del TEG	87
Fig. 81. Disipador líquido del lado frío del TEG	87
Fig. 82. Intercambiador de calor con sus canales para el paso del agua	87
Fig. 83 Diseño CAD de juntas sellantes	88
Fig. 84. Juntas de sellante de la empresa EMBEGA S.Coop.	88
Fig. 85. Intercambiador de calor de aluminio con juntas sellantes adhesivadas.....	88
Fig. 86. Área de intercambio de calor en la parte fría	88
Fig. 87. Áreas de intercambio de calor de la parte caliente	89
Fig. 88. Explosionado CAD del conjunto intercambiador de calor frío y caliente.	90
Fig. 89. Explosionado CAD del sistema modular termoeléctrico	90
Fig. 90. Conjunto intercambiador y módulo termoeléctrico.....	91
Fig. 91. Disposición del intercambiador con la PCB y los módulos termoeléctricos	91
Fig. 92. Prototipo del bloque de refrigeración	91
Fig. 93. Montaje del sistema modular termoeléctrico.....	92
Fig. 94. Sistema modular termoeléctrico.....	92
Fig. 95. Conexiones hidráulicas de los circuitos de calentamiento y refrigeración del sistema generador termoeléctrico de 18 W	93
Fig. 96. Conexión eléctrica serie mediante puentes eléctricos del sistema generador termoeléctrico de 6W	93
Fig. 97. Resistencias de carga adaptada conectadas al sistema generador termoeléctrico de 6W.....	93
Fig. 98. Banco de caracterización del sistema termoeléctrico.....	95
Fig. 99. "Process and Instrumentation" del sistema al completo	95
Fig. 100. Módulos de termoeléctricos	96
Fig. 101. Bomba del circuito caliente.....	97
Fig. 102. Sistema calentador	97
Fig. 103. Caudalímetro circuito frío (I) y circuito caliente (II)	98
Fig. 104. cRio con sus respectivas tarjetas	98
Fig. 105. Tarjetas NI 9201 (I) y NI 9213 (II).....	99
Fig. 106. Interfaz de captura de datos en Labview.....	99
Fig. 107. Codificación del programa, fase de recepción, análisis y guardado de datos	99
Fig. 108. Codificación del programa, fase de lectura y envío de datos	100
Fig. 109. Termopar tipo K, colocado en la salida del circuito de agua fría	100
Fig. 110. Resistencias de carga adaptada (I) y en circuito abierto (II).....	101
Fig. 111. Equipo de instrumentación electrónica RLC Bridge	101
Fig. 112. Figura 15: Medida de la carga con el RLC.....	102
Fig. 113. Captura de datos de puesta a punto del banco de ensayos en circuito abierto.	102
Fig. 114. Captura de datos de puesta a punto del banco de ensayos con carga adaptada.	103
Fig. 115. Esquema básico de potencias del sistema termoeléctrico.....	103
Fig. 116. Explosión del diseño general simétrico del sistema termoeléctrico.....	104
Fig. 117. Esquemático completo del modelo unidimensional del sistema termoeléctrico.	106
Fig. 118. Esquemático de un termoelemento de longitud l conectado a una carga.....	109
Fig. 119. Esquemático simplificado del modelo unidimensional del sistema termoeléctrico.	109
Fig. 120. Diagrama de flujo del proceso de cálculo.	113
Fig. 121. Temperaturas en el sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia de calentamiento en circuito abierto.	114



Fig. 122. Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de sistema termoeléctrico en lado frío y caliente en circuito abierto.	115
Fig. 123. Temperaturas en el sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia de calentamiento con carga adaptada.	115
Fig. 124. Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de los disipadores frío y caliente con carga adaptada.	116
Fig. 125. Voltajes de los bloques del sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia térmica en circuito abierto.	116
Fig. 126. Voltajes de los bloques del sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia térmica con carga adaptada.	117
Fig. 127. Curva de tensión total [V] sin corregir generada en circuito abierto y de diferencia de temperatura [°C] entre los extremos del sistema termoeléctrico.	117
Fig. 128. Curva de tensión total [V] sin corregir generada con carga adaptada y de diferencia de temperatura [°C] entre los extremos del sistema termoeléctrico.	118
Fig. 129. Ajuste lineal de la relación entre la diferencia de temperatura en la entrada de sistema TE y la tensión generada.....	120
Fig. 130. Flujos térmicos a la entrada y salida del sistema TE.....	121
Fig. 131. Detalle de la afectación a la lectura de datos de temperatura por el retardo de circulación de los fluidos.	121
Fig. 132. Flujos térmicos a la entrada y salida del sistema TE con corrección por software del retardo de circulación de los fluidos.....	122
Fig. 133. Pérdidas de calor del sistema termoeléctrico a través del disipador frío.	123
Fig. 134. Temperatura ambiente y del líquido de refrigeración durante el ensayo.....	123
Fig. 135. Calor entrante al líquido de refrigeración calculado a través de los disipadores fríos.	124
Fig. 136. Valores de temperatura capturados del sistema termoeléctrico sin carga 125	125
Fig. 137. Valores de temperatura capturados del sistema termoeléctrico con carga.	125
Fig. 138 Valores de diferencia de temperatura en los disipadores del ensayo sin carga.	126
Fig. 139 Valores de diferencia de temperatura en los disipadores del ensayo con carga.	126
Fig. 140. Valores de temperatura calculados del sistema termoeléctrico sin carga.	127
Fig. 141. Valores de temperatura calculados del sistema termoeléctrico con carga.	127
Fig. 142. Voltaje generado por los 3 bloques del TEG en circuito abierto.	128
Fig. 143. Voltaje generado por los 3 bloques del TEG con carga.....	128
Fig. 144. Diferencia de temperatura en el TEG y coeficiente Seebeck.....	130
Fig. 145. Comparación del coeficiente Seebeck obtenido frente al modelo analítico en función a la temperatura media en el material TE.....	130
Fig. 146. Comparación de la conductancia térmica obtenida frente al modelo y el modelo analítico corregido en función de la temperatura media en el material TE.	131
Fig. 147. Conductancia térmica de los intercambiadores frío y caliente frente a la temperatura media. 131	131
Fig. 148. Coeficientes de transferencia térmica de convección del disipador frío y caliente en función de la temperatura media en el TEG.....	132
Fig. 149 Coeficientes de transferencia térmica de convección del disipador frío y caliente en función de la diferencia de temperatura en el sistema.....	132
Fig. 150. Coeficiente de transferencia térmica de convección del disipador caliente en función de la temperatura media en el disipador caliente.	133
Fig. 151. Coeficiente de transferencia térmica de convección del disipador frío en función de la temperatura media en el disipador frío.....	133

Fig. 152. $Q_{IN}(t)$ y $Q_{OUT}(t)$ en el ensayo con carga.	134
Fig. 153. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para un flujo másico(15-5)	135
Fig. 154. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (15-5).....	135
Fig. 155. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (15-5).	135
Fig. 156. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para un flujo másico(10-8)	136
Fig. 157. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (10-8).....	136
Fig. 158. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (10-8).	136
Fig. 159. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para un flujo másico (15-5).	138
Fig. 160. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (15-5).	138
Fig. 161. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (15-5).....	138
Fig. 162 Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para un flujo másico (10-8).....	139
Fig. 163. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (10-8).	139
Fig. 164. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (10-8).....	139
Fig. 165. Curva característica del sistema termoeléctrico.	140
Fig. 166. Comparativa de la potencia eléctrica generada entre el modelo unidimensional simplificado, el modelo ideal y no ideal.....	141
Fig. 167. Comparativa de la eficiencia eléctrica entre el modelo unidimensional simplificado, el modelo ideal y no ideal.....	141
Fig. 168. Diagrama de bloques de la electrónica de potencia	145
Fig. 169. Convertidores DC/AC preseleccionados de las marcas IPS500 y Too Goo	147
Fig. 170. Ventilador AC incorporado en el modelo de Aermec.	148
Fig. 171. Características técnicas del convector AC del modelo de Aermec.	148
Fig. 172. Diagrama de conexión de los bloques termoeléctricos con los ventiladores DC.....	149
Fig. 173. Disposición de los ventiladores DC instalados en el Fan-Coil.....	149
Fig. 174. Bomba de agua del sistema de refrigeración líquida.....	150
Fig. 175. Curva de potencia consumida por la bomba en función de la intensidad aplicada.	151
Fig. 176. Imagen del sistema electrónico de adaptación de la carga.....	151
Fig. 177. Software comercial AZTEK de la empresa MELCOR.....	152
Fig. 178. En rojo, volumen disponible para la instalación del sistema TE.	153
Fig. 179. Motor eléctrico original y sus características.	153
Fig. 180. Esquema conceptual de las diferentes configuraciones hidráulicas propuestas con los elementos que las conforman.	155
Fig. 181. Ventilador Omnia UL 11P parcialmente desmontado, siendo visible el ventilador y su motor eléctrico.	155



Fig. 182. Elementos empleados para la construcción de los circuitos hidráulicos de los VC-TE	156
Fig. 183. Bloque de agua en su configuración típica para refrigeración de electrónica.....	156
Fig. 184. Ejemplo de disipador extruido de aletas.....	157
Fig. 185. Intercambiador agua-aire de tubos y aletas.....	158
Fig. 186. Esquema de montaje del ventiloconvector con TEG para el desarrollo del primer ensayo.	159
Fig. 187. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 70 °C.....	160
Fig. 188. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 65 °C.....	160
Fig. 189. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 60 °C.....	161
Fig. 190. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 55 °C.....	161
Fig. 191. Análisis de la influencia de la velocidad del ventilador en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 70 °C.....	162
Fig. 192. Análisis de la influencia de la velocidad del ventilador en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 65 °C.....	162
Fig. 193. Comparación de los diagramas de potencia-corriente para los niveles de velocidad I, II, III del ventilador de CA y del ventilador de CC con una temperatura media del lado caliente de 70 °C.	163
Fig. 194. Comparación de los diagramas potencia-corriente para los niveles de velocidad I, II, III del ventilador de CA y del ventilador de CC con una temperatura media del lado caliente de 65 °C.	163
Fig. 195. Proceso de calentamiento hasta una temperatura media del lado caliente de 70 °C.....	164
Fig. 196. Estado estacionario a una temperatura media del lado caliente de 70 °C.....	165
Fig. 197. Proceso de enfriamiento desde una temperatura media del lado caliente de 70 °C.....	165
Fig. 198. Disipador ICK S 40x40x20 de Fischer Elektronik.....	166
Fig. 199. Resultados de generación de cada módulo termoelectrico y agrupaciones para 12 V y 0.4 A. .	167
Fig. 200. Resultados de generación de cada módulo termoelectrico y agrupaciones para 24 V y 0.2 A. .	167
Fig. 201. Características de potencia eléctrica desarrollada y flujo térmico que atraviesa los módulos .	167
Fig. 202. Configuración de los módulos sobre el bloque de agua por uno de los lados.....	168
Fig. 203. Curvas de resistencia térmica y caída de presión del disipador de agua RG76004.	168
Fig. 204. Resultados de generación de cada módulo termoelectrico y agrupaciones para 12 V y 0.4 A. .	169
Fig. 205. Resultados de generación de cada módulo termoelectrico y agrupaciones para 24 V y 0.2 A. .	169
Fig. 206. Esquema donde se muestran los bloques de agua caliente de entrada en rojo, bloques de agua fríos en azul y módulos termoelectricos en blanco.....	170
Fig. 207. Características de potencia eléctrica desarrollada y flujo térmico que atraviesa los módulos. .	170
Fig. 208. Procedimiento del cálculo para la configuración (d).....	172
Fig. 209. Esquema del sistema termoelectrico TEG-LL-30.	173
Fig. 210. Configuraciones de circuito único y doble.....	173
Fig. 211. Resultados experimentales para único circuito	174
Fig. 212. Resultados experimentales para dos circuitos.	175
Fig. 213. Esquema de disposición hidráulica de un bloque TEG.	176
Fig. 214. Prototipo de bloque TEG correspondiente al esquema de disposición hidráulica.	176
Fig. 215. Esquema general de la disposición hidráulica del VC-TE.	177
Fig. 216. Visión general del prototipo de VC-TE.	177
Fig. 217. Detalle de VC-TE instalado sobre pedestal en banco de ensayos con captura de datos.....	178

Fig. 218. Detalle de los tres bloques termoeléctricos instalados en el VC-TE y su sistema de llenado e interconexión hidráulica.	178
Fig. 219. Visión frontal y lateral de VC-TE instalado sobre pedestal	179
Fig. 220. Exterior de cámara climática con sistema de captura de datos y equipo de refrigeración instalado (izq.) y equipo VC-TE sobre pedestal instalado en interior de cámara climática (der)	179
Fig. 221. Interior de VC-TE (izquierda) y equipo embalado previo a su entrega (derecha).	180
Fig. 222. Proceso de encendido del VC-TE.	181
Fig. 223. Cámara frigorífica de la empresa Kide S.Coop.....	182
Fig. 224. a) vista exterior del equipo frigorífico y b) vista interior.....	182
Fig. 225. Anemómetro empleado para la toma de medidas.	183
Fig. 226. a) Caldera empleada para los ensayos y b) termostato colocado en el interior de la cámara. .	183
Fig. 227. Banco de pruebas y software de adquisición de datos y módulos de captura de CompactDAQ	184
Fig. 228. Geometría del radiador de alta temperatura instalado en cámara frigorífica.	184
Fig. 229. Dimensiones del Fan-Coil de Johnson Controls	185
Fig. 230. Elementos interiores del Fan-Coil de Johnson Control.	185
Fig. 231. Dispositivo TEG de Thermonamic TEG-LL-30	186
Fig. 232. Banco de pruebas y sistema de medición desarrollado a medida.	186
Fig. 233. Esquema de funcionamiento agua-agua.	187
Fig. 234. Curvas de funcionamiento T° /Voltaje vs tiempo del VC-TE en exterior.	188
Fig. 235. Curvas de funcionamiento T° /Voltaje vs tiempo del VC-TE en cámara refrigerada.	189
Fig. 236. Temperaturas [$^{\circ}$ C] en el sistema termoeléctrico del VC-TE durante su operativa	190
Fig. 237. Voltajes [V] de los bloques del sistema termoeléctrico del VC-TE durante su operativa.	190
Fig. 238. Flujos térmicos QIN(t) y QOUT(t) en el VC-TE.....	191
Fig. 239. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para el VC-TE.	192
Fig. 240. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para el VC-TE.....	192
Fig. 241. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para el VC-TE.	192
Fig. 242. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para el VC-TE.....	193
Fig. 243. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para el VC-TE.	193
Fig. 244. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para el VC-TE.	194
Fig. 245. Curvas de potencia eléctrica generada frente a la diferencia de temperatura en el TEG, para la potencia real calculada, el modelo ideal, el modelo ideal y el simplificado.	195
Fig. 246. Curvas de eficiencia de generación eléctrica frente a la diferencia de temperatura en el TEG, para la eficiencia real calculada, el modelo ideal, el no ideal y el simplificado.....	195
Fig. 247. Curvas del modelo simplificado y del ajuste polinómico de la potencia eléctrica generada real frente a la diferencia de temperatura en el TEG.	196
Fig. 248. Curvas del modelo simplificado y del ajuste polinómico de eficiencia de generación eléctrica real frente a la diferencia de temperatura en el TEG.	196
Fig. 249. a) Dimensiones interiores de la cámara de ensayos con radiador desplazado y b) cámara con simetría y Fan-Coil.	199
Fig. 250. Modelo del radiador de alta temperatura	200
Fig. 251. a) Geometría del modelo empleado en las simulaciones y b) detalle de la malla en la zona de las placas, en las que se aprecia la inflación aplicada.	200



Fig. 252. Distribución de los termopares colocados en el interior de la cámara.	201
Fig. 253. Evolución de temperaturas para el punto Confort 1.....	202
Fig. 254. Evolución de temperaturas para el punto Confort 2.....	202
Fig. 255. Evolución de temperaturas para el punto Confort 3.....	202
Fig. 256. Evolución de la temperatura interior de la habitación para el radiador.....	203
Fig. 257. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto Confort 1.	204
Fig. 258. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto Confort 2.	204
Fig. 259. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto Confort 3.	204
Fig. 260. Evolución de la temperatura interior de la habitación para el Fan-Coil.	205
Fig. 261. Perfil de temperatura superficial del radiador ($T_{ext} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).	206
Fig. 262. Variación de la duración de las subetapas.....	206
Fig. 263. Gráfica y ecuación de la tendencia de duración del ciclo completo.....	207
Fig. 264. Gráfica y ecuación de la tendencia del porcentaje de la etapa de subida.	207
Fig. 265. Gráfica y ecuación de la tendencia del porcentaje de la etapa de caída.	208
Fig. 266. Evolución de la máxima diferencia de gradiente vertical en el caso del radiador ($T_{ext} = 5^{\circ}\text{C}$). ..	210
Fig. 267. Evolución de la máxima diferencia de gradiente vertical en el caso del Fan-Coil.....	210
Fig. 268. Diseño inicial del sistema generador realizado mediante CAD.	216
Fig. 269. Prototipo final montado y probado en laboratorio.	216
Fig. 270. Pareto de costes del VC-TE.....	219
Fig. 271. Distribución del consumo de energía en el hogar [140].....	220
Fig. 272. Distribución de la factura energética de la vivienda en Euskadi [143].	221
Fig. 273. Evolución de los costes medios de gas y electricidad en el sector doméstico vasco [143].....	222
Fig. 274. Características de la vivienda en Euskadi [143].	223
Fig. 275. Consumo energético en el sector residencial en Euskadi [143].....	223
Fig. 276. Estructuras TE más habituales empleadas en la construcción de módulos TE a) con semiconductores N y P, y b) Usando solo un tipo.	228
Fig. 277. Descripción general de la solución de Unileg más utilizada en la actualidad (izquierda) y de la nueva estructura en $\pi\pi$ propuesta (derecha).	229
Fig. 278. Esquema básico de la estructura en $\pi\pi$ propuesta en este trabajo.	230
Fig. 279. Malla computacional de la nueva estructura termoeléctrica. Observe la agrupación de células cerca de la capa conductora.....	231
Fig. 280. Condiciones de contorno térmico y eléctrico aplicadas en el cálculo por diferencias finitas.	232
Fig. 281. Direcciones de los parámetros a modificar, en rojo posición del corte transversal, en verde profundidad del corte longitudinal y en azul espesor de la capa de metalización 233	233
Fig. 282. Eficiencia en función de los tres parámetros de análisis.	234
Fig. 283. Resultados del modelo numérico relativos a (a) distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) caída de tensión óhmica (V), (c) tensión de Seebeck (V), y (d) tensión resultante (V) para la resistencia de carga $R_{LOAD} = 50\text{ m}\Omega$, con T° fija del lado caliente $T_{HOT} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, y potencia térmica disipada $Q_{COLD} = 50\text{ mW}$. Observe la diferencia en la escala de voltaje entre b) y c), d).....	236
Fig. 284. Comparación de los cálculos de la nueva estructura termoeléctrica y de un solo pellet: (a) corriente eléctrica a través de la carga; (b) potencial eléctrico en la carga; (c) energía eléctrica desarrollada en la carga, con carga de resistencia eléctrica variable; (d) potencial eléctrico en la carga; (e) energía eléctrica desarrollada en la carga, con corriente eléctrica variable a través del circuito; y (f) eficiencia de conversión térmica a eléctrica con carga de resistencia eléctrica variable.	237
Fig. 285. Representación de módulo termoeléctrico hecho de un solo bloque de material termoeléctrico mecanizado. Las caras más claras representan las patas recubiertas de plata.	240

Fig. 286. Imágenes de módulos termoeléctricos con las estructuras en π de la patente EP18382462. ...	241
Fig. 287. Imágenes de módulos termoeléctricos circulares con cortes de la patente EP18382462.	242
Fig. 288. Eficiencia máxima de generación de un material TE en función del valor de ZT y la temperatura del foco caliente, manteniendo el foco frío a temperatura constante de 350 K.	242
Fig. 289. Elementos del molino de bolas de ágata	244
Fig. 290. Mortero manual de ágata	245
Fig. 291. Diagrama FTIR del polvo molido sin picos asociados a los carbonatos.	245
Fig. 292. Molino de atrición	246
Fig. 293. Espectros FTIR de los materiales analizados. En rojo, el correspondiente al proceso de laboratorio.....	247
Fig. 294. Polvo calcinado a) sistema tradicional de molienda y 12 h a 750 °C más 12 h a 800 °C; b) polvo molido por atrición tras 1 h a 850 °C [161].	248
Fig. 295. Corte de muestras rectangulares.....	249
Fig. 296. Izquierda, material obtenido según proceso inicial; derecha, material obtenido según el proceso acertado	249
Fig. 297. DSC utilizado, junto a las muestras analizadas.....	250
Fig. 298. Calor específico de las muestras de $Ca_3Co_4O_9$ a diferentes temperaturas	250
Fig. 299. Medidas de difusividad de las muestras de $Ca_3Co_4O_9$ a diferentes temperaturas	251
Fig. 300. Dilatación de las muestras de $Ca_3Co_4O_9$ a diferentes temperaturas.	252
Fig. 301. Conductividad térmica de las muestras de $Ca_3Co_4O_9$ a diferentes temperaturas.	252
Fig. 302. Resistividad eléctrica y coeficiente de Seebeck de varias muestras de material óxido nuevo a sinterizado a 850°C.	253
Fig. 303. Resistividad eléctrica y coeficiente de Seebeck de varias muestras de material óxido nuevo mantenido a 850°C durante diferentes periodos de tiempo como tratamiento de envejecimiento.	253
Fig. 304. Factor de potencia de varias muestras de material óxido nuevo sinterizado a 850°C.	254
Fig. 305. Factor de potencia de varias muestras de material óxido nuevo mantenido a 850°C durante diferentes periodos de tiempo como tratamiento de envejecimiento.	254
Fig. 306. Factor de potencia (PF) en función de la temperatura. En rojo, material obtenido por el proceso estándar y en azul, por molienda por atrición [161].	255
Fig. 307. Tensión de ruptura de muestras de material óxido nuevo sinterizado a 850°C.	255
Fig. 308. Representación analítica de la curva de resistividad eléctrica.....	256
Fig. 309. Representación analítica de la curva de resistividad eléctrica.....	256
Fig. 310. Diseño general preliminar del banco de ensayos.....	257
Fig. 311. Detalle 3D del diseño preliminar del banco de ensayos.....	258
Fig. 312. Desarrollo final del banco de ensayos una vez se ha ensamblado.	258
Fig. 313. Situación del dado de material termoeléctrico mecanizado como π en la estructura frente a la llama piloto.....	259
Fig. 314. Esquema de las mediciones tomadas mediante el Offset Compensated Method [173].	259
Fig. 315. Esquema de la programación interna de LabVIEW empleada en este proyecto e interfaz customizado de LabVIEW para la medición en tiempo real y continuo de la resistencia interna de los módulos.	260
Fig. 316. Mediciones de tensión reales obtenidas y posprocesadas en Matlab, a partir de las cuales se obtiene el valor de resistencia interna.....	260
Fig. 317. Calentamiento del termoeléctrico en banco de ensayos.	261
Fig. 318. Proceso en el que transcurre un ciclo completo del gato y termoeléctrico.....	261
Fig. 319. Proceso de fabricación del módulo termoeléctrico.....	262



Fig. 320. Detalle del disco de óxido con cortes longitudinales.....	263
Fig. 321. Módulo con 72 estructuras Unileg en Π fabricado en un solo disco.	263
Fig. 322. Aplicación de la capa de plata en la estructura en Π y en los discos.....	264
Fig. 323. Secado de las distintas muestras metalizadas en lámparas IR.....	264
Fig. 324. Piezas en Π , en horno refractario.	265
Fig. 325. Disco y piezas en Π metalizadas con plata tras el tratamiento térmico.	265
Fig. 326. Izquierda, pintura de plata aplicada (parte más clara) sin curar; derecha, tras curado.....	265
Fig. 327. Probeta metalizada situada en la máquina de ensayos de tracción.....	266
Fig. 328. Resultados de ensayos de tracción de la pintura de plata sobre el material óxido.	266
Fig. 329. Muestra de resultados de la prueba con causas de la rotura.	267
Fig. 330. Reacción de metalización en el electrolito desarrollado.....	268
Fig. 331. Muestra de material óxido donde se aprecia un ligero tono naranja-marrón propio del cobre en la parte inferior.....	268
Fig. 332. Estructura en Π mecanizada con metalización del proceso de fabricación, aún sin pulir.	269
Fig. 333. Micrografías de SEM de muestras provenientes a) del sinterizado; b) de la tinta aplicada.	269
Fig. 334. Muestra de material termoeléctrico marcada por el haz LASER.	270
Fig. 335. Máquina de corte por LASER evaluada.....	270
Fig. 336. Disco de material termoeléctrico cortado como una termopila 271	271
Fig. 337. Plano actual de micromecanizado de piezas en Π	271
Fig. 338. Elemento termoeléctrico obtenido por micro mecanizado y muestra del material restante en el disco, tras la extracción de 6 elementos.....	272
Fig. 339. Detalle de los cortes micromecanizados al microscopio.	272
Fig. 340. Proceso final de preparación de las geometrías en Π	273
Fig. 341. Gráficas de voltaje (azul) y potencia (naranja) en función de la intensidad para el termoeléctrico compuesto por el material de partida, con sus respectivas líneas de tendencia.....	274
Fig. 342. Gráficas de voltaje (azul) y potencia (naranja) en función de la intensidad para los termoeléctricos compuestos por el material nuevo con sus respectivas líneas de tendencia.	275
Fig. 343. Gráficas de potencia-resistencia y voltaje-resistencia con material termoeléctrico de partida 276	276
Fig. 344. Gráficas potencia-resistencia y voltaje-resistencia con material termoeléctrico nuevo.....	277
Fig. 345. Gráficas V-R, P-R, V-I y P-I para la estructura en Π con el material de partida (viejo).	278
Fig. 346. Gráficas V-R, P-R, V-I y P-I para la estructura en Π con el material nuevo.....	278
Fig. 347. Comparativa de voltaje y potencia en función de la intensidad para las estructuras termoeléctricas compuestas por el material nuevo y el de partida.....	279
Fig. 348. Banco de ensayos: a) Posición de los termoeléctricos b) Vista de un lado del banco de ensayos. c) Área de posicionamiento del termoeléctrico junto a la salida de la llama y el termoeléctrico de seguridad. d) Válvula de seguridad del gas, accionada mediante un termopar.	280
Fig. 349. Resultados de las mediciones de resistencias eléctricas formadas del material de partida para la prueba de ciclado térmico a) y b) 1000 ciclos, c) y d) 3000 ciclos.....	281
Fig. 350. Resultados de las mediciones de resistencias eléctricas formadas del material nuevo para la prueba de ciclado térmico a) y b) 1000 ciclos, c) y d) 3000 ciclos.....	282
Fig. 351. Valor de las resistencias eléctricas para el material de partida en la prueba de vida.	283
Fig. 352. Valor de las resistencias eléctricas para el material nuevo en la prueba de vida.....	283
Fig. 353. Desglose de costes de un módulo termoeléctrico para varias clases de fabricación [84].....	285
Fig. 354. Estructura en Π generada en la totalidad de un disco u oblea termoeléctrica.	285
Fig. 355. Sistema TEG con sustitución de módulos termoeléctricos por obleas termoeléctricas.	286
Fig. 356. Eficiencia del convertor DC-DC de 3KW de la universidad de Zhejiang 287	287

Fig. 357. Figura de mérito del $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ [179]	288
Fig. 358. Base de datos para materiales	323
Fig. 359. Base de datos para módulos.....	324
Fig. 360. Administrador de componentes.....	324
Fig. 361. Ventanas de Nuevo Material y Editar Material	325
Fig. 362. Ventanas Nuevo Módulo y Editar Módulo.....	325
Fig. 363. Diagrama de flujo de la Interfaz Gráfica de Usuario	326
Fig. 364. Datos de material termoeléctrico tomados como referencia y ficha de los mismos.....	329
Fig. 365. Pletinas de cobre empleadas en la fabricación de los terminales del módulo.....	330
Fig. 366. Geometría CAD empleada en el análisis. Se aprecian los terminales de cobre positivo y negativo (corto y largo) y entre ambos el dado de material termoeléctrico.....	330
Fig. 367. Geometría del dado con corte empleada en el análisis. Se aprecia una capa de metalización en uno de los laterales, que cortocircuita el dado vertical de la derecha de la imagen.....	331
Fig. 368. Puntos obtenidos de las curvas experimentales del material termoeléctrico en [181], con los ajustes para la obtención de los coeficientes polinómicos. a) Conductividad térmica, b) conductividad eléctrica, c) Seebeck.....	332
Fig. 369. Visualización de las condiciones de contorno térmicas de la simulación del a) Unileg convencional y del b) Unileg innovador.....	333
Fig. 370. Representación esquemática del sistema termo-eléctrico-fluido de generación de potencia... 333	
Fig. 371. Asignación de condiciones de contorno eléctricas para el caso clásico (izq) e innovador (der). 334	
Fig. 372. Mallas generadas para los casos a) convencional y b) con corte	334
Fig. 373. Potencia, tensión e intensidad para los distintos valores de resistencia empleados.....	335
Fig. 374. Distribución térmica de a) módulo convencional y b) módulo con corte.....	335
Fig. 375. Distribución de voltaje debido a Seebeck en módulo convencional.....	336
Fig. 376. Distribución de voltaje debido a Seebeck en módulo con corte.....	336
Fig. 377. Distribución de voltaje debido al paso de corriente en módulo convencional.....	337
Fig. 378. Distribución de voltaje debido al paso de corriente en módulo con corte.....	337
Fig. 379. Datasheet de un módulo termoeléctrico de la empresa de RMT.....	339
Fig. 380. Configuración experimental de bajo salto térmico para ensayo de estructuras en Π	341
Fig. 381. Prototipo de estructura en Π con a) lado no metalizado y b) lado metalizado.....	341
Fig. 382. a) Banco de caracterización de baja temperatura completo, b) termografía con foco frío regulado y c) termografía con foco regulado.....	342
Fig. 383. Curva característica V-I de las estructuras en Π para 8°C (rojo) y 18°C (azul) de diferencia de temperatura.....	343
Fig. 384. Curva característica P-I de las estructuras en Π para 8°C (rojo) y 18°C (azul) de diferencia de temperatura.....	343



Lista de tablas

Tabla 1. Expresiones de rendimientos ideales para generación termoeléctrica [9]	10
Tabla 2. Coste de los materiales brutos y purificados [34]	27
Tabla 3. Características de varios materiales termoeléctricos de generación [36]	28
Tabla 4. ZT media y máxima y eficiencia de los materiales termoeléctricos [38].....	29
Tabla 5. Variedad de catálogo de módulos termoeléctricos de los principales fabricantes	31
Tabla 6. Características técnicas del módulo TE más habitual de los principales fabricantes	31
Tabla 7. Oferta de módulos de la empresa Kryotherm en función de la geometría de los dados.	32
Tabla 8. Listado de módulos termoeléctricos y sus propiedades [53]	33
Tabla 9. Comparativa de sistemas de generación termoeléctricos de los principales fabricantes.....	37
Tabla 10. Ventajas y desventaja de las soluciones comerciales de generadores termoeléctricos	38
Tabla 11. Mejoras de eficiencias de ventilosconvectores comerciales.....	43
Tabla 12. Comparativa entre el rendimiento en cuanto a confort térmico y eficiencia para las distintas unidades terminales [94]	46
Tabla 13. Diferentes casos analizados por Massager et al [118]	66
Tabla 14. Características técnicas del ventilosconvector OMNIA ULP 11	71
Tabla 15. Características técnicas del nuevo VC-TE.....	71
Tabla 16. Coeficientes del material N de dependencia de α , ρ , λ con la temperatura	73
Tabla 17. Coeficientes del material P de dependencia de α , ρ , λ con la temperatura.....	73
Tabla 18. Valores de conductividad térmica de contacto k_c de módulos comerciales de Melcor [124]	77
Tabla 19. Configuraciones de distribución de módulos termoeléctricos sobre disipadores de calor.....	79
Tabla 20. Configuraciones serie/paralelo de módulos en un bloque del sistema termoeléctrico	85
Tabla 21. Terminología empleada	106
Tabla 22. Medidas de R_{int} del sistema TE mediante RLC previas a los ensayos.	129
Tabla 23. Medidas de R_{int} del sistema TE mediante RLC tras los ensayos.	129
Tabla 24. Coeficientes calculados del polinomio de orden 4 del coeficiente Seebeck.	130
Tabla 25. Configuraciones de conexionado serie-paralelo de los módulos termoeléctricos.	146
Tabla 26. Eficiencia del convertidor DC/DC trabajando con una carga de 24 Ohm	146
Tabla 27. Eficiencia del convertidor DC/DC trabajando con una carga de 8,7 Ohm	147
Tabla 28. Respuesta del convertidor DC/DC Too Goo.....	147
Tabla 29. Respuesta del convertidor DC/DC IPS500.	147
Tabla 30. Cálculo de la potencia aparente del ventilador.	149
Tabla 31. Caracterización del consumo de la bomba de agua.	150
Tabla 32. Consumos del sistema eléctrico	151
Tabla 33. Resumen de consideraciones para el análisis teórico de la configuración hidráulica.....	152
Tabla 34 Características técnicas del motor de referencia.....	154
Tabla 35. Entradas del programa de cálculo	166
Tabla 36. Entradas del programa de cálculo.	169
Tabla 37. Resultados del análisis de la configuración (d).....	171
Tabla 38. Propiedades de la espuma de poliuretano rígida	182
Tabla 39. Características técnicas del catálogo Fondital del radiador.	185
Tabla 40. Factores que influyen en el consumo real de un edificio.	198
Tabla 41. Índices RMSD obtenidos en la validación del modelo del radiador	203
Tabla 42. Índices RMSD obtenidos de la validación del modelo de Fan-Coil con el ensayo.	204



Tabla 43. Tendencias de los ciclos de calentamiento y enfriamiento en segundos.	207
Tabla 44. Ecuaciones de caracterización de los parámetros en el caso del radiador.	208
Tabla 45. Temperaturas diarias en ciudades de interés del día 7 de enero de 2017 [133].	208
Tabla 46. Temperatura media, máxima y mínima en ciudades de interés del día 5 de enero de 2017. ..	208
Tabla 47. Resultados del análisis de consumo para el caso del radiador.	209
Tabla 48. Consumos para el caso del Fan-Coil.....	210
Tabla 49. Mejora estimada en el ahorro de Fan-Coil vs radiador.	211
Tabla 50. Listado de materiales y costes (BOM) de un Fan-Coil comercial.	215
Tabla 51. Listado de materiales y costes (BOM) de un VC-TE prototipo.	217
Tabla 52. Listado de materiales y costes (BOM) de un VC-TE comercial.	218
Tabla 53. Estimación del ahorro anual global y por vivienda en Euskadi.	221
Tabla 54. Presupuesto de instalación de enchufes en obra de rehabilitación.	222
Tabla 55. Propiedades termoeléctricas del Bi_2Te_3 empleadas en el análisis numérico [160].	231
Tabla 56. Variables geométricas a variar en el estudio paramétrico.	232
Tabla 57. Resultados completos del estudio paramétrico.	233
Tabla 58. Valor de la R_{int} de las estructuras en \mathbb{T} ensayadas.	280
Tabla 59. Propiedades térmicas y eléctricas de los materiales empleados.	331

CAPÍTULO 1 *INTRODUCCIÓN*



1.1.- Contexto actual

De acuerdo con el informe “Energy Renovation: The Trump Card for the New Start for Europe” de 2015 del Joint Research Centre de la Comisión Europea [1], los edificios son responsables del 38% del total de las emisiones de CO₂ de la UE y son, además, el mayor consumidor de energía de Europa, alcanzando, tal como también recoge la Directiva 2010/31/EU relativa a la eficiencia energética de los edificios, el 40% del consumo total de energía en la unión europea [2].

Según el citado informe, la calefacción del espacio es el principal uso final de la energía en los edificios residenciales en la mayoría de los países de la UE; donde el 43 % de las necesidades de calefacción se cubrieron con gas en 2012[1]. En dicho informe se pone de manifiesto, de cara a reducir las necesidades de calefacción y su impacto climático en toda Europa, la necesidad de aislar los edificios, **de sustituir los sistemas de calefacción por las mejores tecnologías disponibles** y de aplicar soluciones de energía renovable siempre que sea posible [1].

El parque de edificios juega un papel importante en las importaciones de gas, de las cuales el 35% son consumidas por los edificios. Esto equivale al 68 % del consumo total de gas de la EU-28 en 2012.[1]

Por ello, **la reducción del consumo de energía** y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación representan acciones clave para reducir la dependencia energética de la UE y las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

Para poder alcanzar estos objetivos de reducción de consumo de energía y emisiones, el Consejo Europeo subraya **la necesidad de aumentar la eficiencia energética** a fin de lograr el objetivo de reducir en un 20% el consumo energético para el año 2020 de acuerdo con la estrategia “Europa 2020” [2].

Por eso, la Unión Europea ve necesario establecer un plan de renovación de edificios, que elimine progresivamente los edificios ineficientes y al mismo tiempo garantice una recuperación económica sostenible del sector de la construcción.

Sin embargo, solo será posible si las soluciones propuestas son técnica y económicamente viables para todos los agentes del mercado.

La propuesta de esta tesis encaja perfectamente en el marco que define el contexto energético europeo actual, mientras que a nivel nacional, según un análisis llevado a cabo por el IDAE [3], los hogares españoles consumen el 17% de toda la energía final y el 25% de la electricidad. Esta última fuente es la más utilizada (35%), seguida por el gas natural (25%).

El resultado del análisis del IDEA fue que el 47% de ese consumo iba destinado a calefacción, el 22% a electrodomésticos y el 19 % al Agua Caliente Sanitaria, por lo que reducir consumos en estos tres puntos supondría un ahorro importante.

Puede decirse, sin temor a equivocarse, que de igual modo presenta un encaje acertado a nivel regional con la postura del Gobierno Vasco en materia energética y de medio ambiente ya que, tal como recoge en el documento Estrategia Energética de Euskadi (3E2020), [4] desarrollado por el EVE, entre los grandes retos clave del futuro se encuentran el aumentar los esfuerzos y el impulso en materia **de eficiencia energética**, el desarrollar de forma permanente una cultura de uso eficiente de la energía en el ámbito privado, y la necesidad de potenciar la **rehabilitación energética de edificios y viviendas**, además de contribuir a los objetivos establecidos a nivel internacional en materia de **reducción de emisiones de CO₂**.

Sin embargo, cabe resaltar que, con respecto al medio ambiente, ponen de manifiesto la dificultad demostrada por cumplir los objetivos planteados en cuanto a emisiones de CO₂.



El Gobierno Vasco ha definido 3 prioridades de especialización inteligente (ámbito prioritario RIS3 de Euskadi) relacionadas con la fabricación avanzada, la energía y las biociencias. [5].

La prioridad de Energía incluye todas las actividades relacionadas con la I+D del sector energético presentes en Euskadi en sus distintos ámbitos y en todas las etapas de la cadena de valor.

Es por ello, que la presente tesis encaja dentro del ámbito prioritario de Energía del RIS3, ya que su objetivo en el desarrollo de un nuevo sistema de calefacción que permita mejorar la eficiencia energética, no sólo del elemento calefactor en sí mismo (nuevo diseño de radiador sustitutivo del tradicional) sino de todo el sistema de calefacción (caldera, sistema de distribución...)

En concreto, la prioridad de Energía, en la que encaja la presente tesis, se entiende como la incorporación de nuevos materiales y nuevas tecnologías (termoelectricidad) aplicadas a campos tradicionales (sistemas de calefacción domésticos).

Existe igualmente una manifiesta concordancia con las necesidades y oportunidades identificadas por los sectores y agrupaciones clúster del País Vasco.

La presente tesis se desarrolla fruto de una colaboración entre la empresa Airlan Industrial y el Centro Stirling, teniendo presentes las necesidades del Clúster del Hogar de Euskadi, del que Centro Stirling es miembro y cuya misión se centra fundamentalmente en el bienestar, la salud y la seguridad de las personas en sus hogares. Para ello, desarrolla 4 líneas principales: Hogar Conectado, hogar Cocina, Hogar Saludable y Hogar Sostenible.

El encaje con estas dos últimas líneas del clúster del Hogar (Hogar Saludable y Hogar Sostenible), mediante el objetivo principal de desarrollar un nuevo sistema de calefacción más eficiente, teniendo en cuenta la alta demanda de energía procede de los hogares y que en ellos es donde se desarrolla la mayor parte de nuestra vida.

Por otro lado, la presente propuesta encaja también con una de las prioridades identificadas por el Clúster de la Energía, dado que la Eficiencia Energética y el Sector Oil&Gas forman parte de las áreas estratégicas del clúster.

Los objetivos marcados en esta tesis se encuentran, del mismo modo, alineados con algunas de las convocatorias europeas del H2020 en el área de Energía, concretamente en el Work Program: Secure, Clean and Efficient Energy (Energía segura, limpia y eficiente), el cual se divide en las áreas de interés de: eficiencia energética, tecnologías bajas en carbono y Smart Cities y Comunidades.

En concreto, la eficiencia energética es una opción de interés para Europa, dirigida por las políticas tanto a corto como a largo plazo de la UE. La UE tiene el objetivo de reducir progresivamente el consumo de energía primaria en 2020 y 2030, y las actividades de investigación y desarrollo dentro de esta área se centrarán en los edificios, la industria, la calefacción y la refrigeración, las PYME y los productos y servicios relacionados con la energía, la integración de las TIC y la cooperación con los sectores de telecomunicaciones.

En este sentido, se han identificado las siguientes convocatorias:

- EE-06-2016-2017: Engaging private consumers towards sustainable energy
- LCE-35-2017: Joint Actions to foster innovative energy solutions in renewable energy technologies

1.2.- Introducción a la tecnología termoeléctrica

Teniendo en cuenta el contexto actual, para alcanzar el ahorro energético objetivo en las diferentes hojas de rutas nacionales e internacionales, deberán implementarse nuevas estrategias de carácter tecnológico que trabajando de modo comentario contribuyan al cumplimiento de este objetivo. La sustitución tecnológica por nuevas soluciones más eficientes es la media más inmediata que se plantea como alternativa de ahorro de energía en edificios, siendo una de las más destacables en este campo los sistemas de bomba de calor frente a caldera de gas [6]. Sin embargo, otras acciones independientes de la fuente energética pueden complementar la actuación tecnológica en harás de incrementar el ahorro energético como es la utilización de ventiloconvectores que provoquen la convección forzada del calor para alcanzar la temperatura de confort con mayor rapidez y evitar la aparición de gradientes de temperatura, alimentado estos sistemas mediante técnicas de recuperación energética residual o *energy harvesting*, que utilicen el propio calor transportado por el circuito de calefacción.

Los sistemas de generación de electricidad basados en la tecnología termoeléctrica no se caracterizan por ser sistemas especialmente eficientes en comparación con otras tecnologías como Stirling o Rankine, pero sí han demostrado ser una alternativa altamente competitiva en su aplicación en *energy harvesting* por una serie de características específicas que la hacen única en este sentido: alta modularidad, ausencia de partes móviles, sin ruido ni rozamiento, nulo mantenimiento, larga vida, funcionamiento en cualquier orientación, y sobre todo, bajo coste.

Existen publicaciones [7] [8] que ponen la tecnología termoeléctrica como referente del *energy harvesting* en la recuperación de energía procedente de fuentes térmicas residuales. La tecnología termoeléctrica evita a su vez el uso de sustancias perjudiciales para la capa de ozono, ya que no emplea ningún tipo de gas, siendo algunos de los materiales termoeléctricos más habituales totalmente compatibles con la directiva RoHS.

A modo de introducción a la termoelectricidad se describe a continuación el modo de funcionamiento de los sistemas de generación eléctrica basados en la tecnología termoeléctrica.

Los generadores termoeléctricos (TEGs) son dispositivos que utilizan el efecto Seebeck, convirtiendo el calor (diferencia de temperatura) directamente en energía eléctrica. A medida que el calor fluye del lado caliente al lado frío, los portadores de carga libre (electrones o huecos) en el material también son conducidos hasta el extremo frío. La tensión continua resultante es proporcional a la diferencia de temperatura en relación con el coeficiente Seebeck.

Definido así el principio de funcionamiento, cabe diferenciar entre dos tipos de materiales termoeléctricos: los metálicos y los semiconductores. Los metálicos se utilizan principalmente en la fabricación de termopares tanto para sensorización de temperatura como para generación de energía en aplicaciones de seguridad de llama y alimentación de electrónica auxiliar.

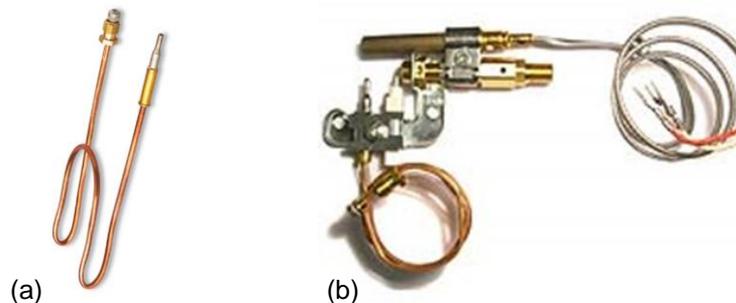


Fig. 1. a) Termopar de aleación metálica de Orkli S.Coop [9], b) ODS con termopar y termopila de Copreci S.Coop.[10]



Generan pequeños voltajes de decenas de microvoltios por grado de diferencia de temperatura. Cuando su unión está situada en un ambiente caliente o llama directa pueden alcanzar varios milivoltios, considerando parte fría del termopar el ambiente. Al colocarle una carga, como puede ser el bobinado de un grupo magnético en seguridad de llama, se generan también pequeñas cantidades de corriente eléctrica.

Los basados en materiales semiconductores, aun siendo menos conocidos salvo para quienes realizan su actividad en esta materia, están también muy extendido tanto para aplicaciones de generación de electricidad como de refrigeración, aunque siempre en aplicaciones nicho, y en mercados minoritarios.

Los semiconductores gozan por general de mejores propiedades termoeléctricas, pasando de decenas a centenas de microvoltios por grado en su coeficiente Seebeck, y la geometría del material se diseña expresamente para las especificaciones de los clientes. Por lo general, los materiales semiconductores termoeléctricos, tienen forma cúbica o de dado, llamados termoelementos, y se unen a través de un conductor eléctrico, por lo general de cobre para dispositivos de baja temperatura, para constituir un par termoeléctrico. Este par termoeléctrico es la unidad básica mediante la que forman módulos termoeléctricos de generación, estando los más comunes dotados con 127 pares N+P, con dados de geometría típica de $1,4 \times 14 \text{ mm}^2$ de área por 1,6 o 1,15 mm de altura.

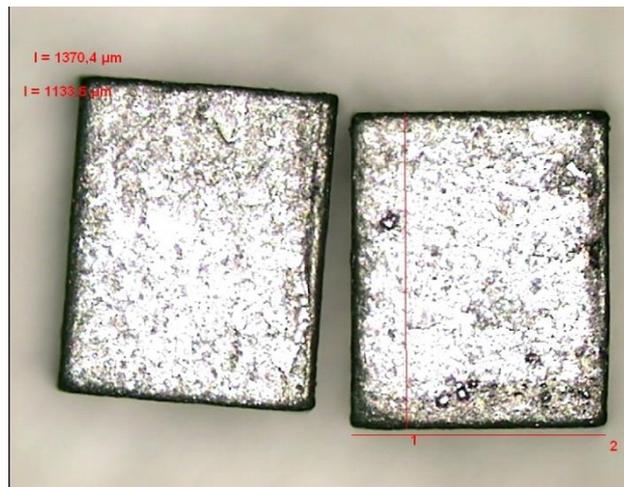


Fig. 2. Detalle de termoelementos de Centro Stirling S.Coop

1.2.1.- Coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson

Para definir los parámetros termoeléctricos se toma como referencia un termopar tipo que considera un circuito formado por dos termoelementos diferentes, A y B que son conectados eléctricamente en serie, pero térmicamente en paralelo.

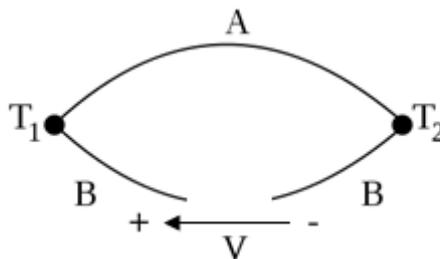


Fig. 3. Esquema de termopar o termoelemento básico

Si las uniones en 1 y 2 se mantienen en diferentes temperaturas (T_1 y T_2) siendo $T_1 > T_2$ se desarrolla una fuerza electromotriz de circuito abierto (emf), V tal como se muestra en la Fig. 3, cuyo valor viene dado por ecuación (1), que define el diferencial Seebeck α_{AB} entre los elementos A y B.

El símbolo del coeficiente de Seebeck es α , y su signo es positivo si el emf hace que una corriente fluya en el sentido de las agujas del reloj alrededor del circuito y habitualmente se mide en $\mu\text{V/K}$.

$$\alpha_{AB} = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Si por el contrario, se aplica una *emf* con una fuente externa de modo inverso a como se aprecia en la Fig. 3, fluirá una corriente I resultando que una de las uniones absorbe calor y la otra lo cede, de modo que el calor que cede la unión caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termoelemento y el calor que absorbe la unión fría (Q).

El coeficiente de Peltier define la relación entre I y Q expresada en la ecuación (2) y su signo será positivo si la unión 1 se calienta y la unión 2 se enfría. Su símbolo es π .

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

Cambiando la polaridad de la fuente o la corriente que circula se revierte el fenómeno, por lo que un par termoeléctrico o módulo completo como los mostrados en la Fig. 4 podría calentar o enfriar con gran precisión en la temperatura de consigna.

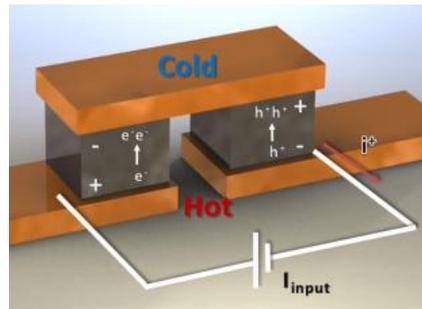


Fig. 4. Par de termoelementos n y p con unión de cobre

Si hay un flujo corriente y además un gradiente de temperatura, también habrá generación o absorción de calor dentro de cada segmento del termopar, ya que α es dependiente de la temperatura. El gradiente del flujo térmico a través de la coordenada espacial s viene expresado por ecuación (3), siendo τ el coeficiente Thomson y si la diferencia de temperatura es pequeña, $Q = \tau I T$.

$$\frac{dQ}{ds} = \tau I \frac{dT}{ds} \quad (3)$$

Las relaciones de Kelvin descritas en las ecuaciones (4) y (5) enlazan los tres coeficientes termoeléctricos.

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (4)$$

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (5)$$



Su validez ha sido demostrada para muchos materiales termoeléctricos y se asume que son válidos para todos los materiales utilizados en aplicaciones termoeléctricas. [9]

Pese a que la generación eléctrica requiere de dos materiales diferentes, los valores absolutos de los coeficientes termoeléctricos de cada material también cumplen las relaciones de Kelvin.

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

$$\pi = \alpha T \quad (7)$$

1.2.2.- Conductividad eléctrica y conductividad térmica.

Ambas propiedades son intrínsecas del material y no dependen de la geometría del termoelemento. Un buen el material termoeléctrico debe combinar una α elevada con una baja resistividad eléctrica ρ y baja conductividad térmica λ .

El valor de ρ se define como la relación entre el campo eléctrico E y la densidad de corriente paralela i en la misma dirección y en ausencia de gradiente térmico.

Los metales tienen una alta conductividad eléctrica mientras que en los aislantes es muy baja y los semiconductores ocupan una posición intermedia entre los dos [10], como puede apreciarse en la Fig. 5.

En un conductor isotrópico, la conductividad eléctrica σ es el recíproco de ρ , pero en materiales anisotrópicos, para los cuales el campo eléctrico E y los vectores i pueden no estar alineado, siendo $\sigma \neq 1/\rho$

Dado que en presencia de un gradiente de temperatura en un material se produce un flujo de calor se define el valor de conductividad térmica como $\lambda = -\omega \left(\frac{dT}{ds}\right)^{-1}$, donde ω es la conducción de calor por unidad de área en ausencia de corriente eléctrica.

En cualquier material, un gradiente de temperatura conduce a un flujo de calor irreversible que se opone al gradiente. En situación de anisotropía ocurre lo mismo que con la conductividad eléctrica.

1.2.3.- Eficiencia de generación y figura de mérito

Un convertidor termoeléctrico se considera un motor térmico y obedece las leyes de la termodinámica. Funcionando como un generador ideal en el que no hay pérdidas de calor, la eficiencia se define como la relación entre la potencia eléctrica entregada a la carga y el calor absorbido en la unión caliente [11].

Se considera el generador más simple para expresar parámetros importantes en generación termoeléctrica, partiendo de un solo termopar con termoelementos fabricado a partir de semiconductores de tipo n y p, como se muestra en la Fig. 4.

La eficiencia del generador viene dada por:

$$\phi = \frac{\text{energía suministrada a la carga}}{\text{calor absorbido en la unión caliente}} = \frac{W}{Q_H} \quad (8)$$

Despreciando las resistencias de contacto térmicas y eléctricas frente a la resistencia del material termoeléctrico y asumiendo que las propiedades termoeléctricas del material son constantes en los termoelementos (α , ρ , λ), se puede expresar la eficiencia como:

$$\phi = \frac{I^2 R}{\alpha_{AB} I T_H} = \frac{I^2 R}{\lambda' (T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (9)$$

donde λ' es la conductividad térmica de los termoelementos en paralelo y R es la resistencia en serie.

Si se considera un par termoeléctrico de materiales semiconductores n y p la expresión de la eficiencia quedaría:

$$\phi = \frac{I[(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T - IR]}{K \Delta T + (\alpha_p - \alpha_n) I T_H - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (10)$$

Siendo K la conductividad térmica con los termoelementos en paralelo y R la resistencia eléctrica con lo termoelementos en serie, que obedecen tanto la geometría de los termoelementos como a sus propiedades termoeléctricas tal como se expresa en las siguientes ecuaciones.

$$K = \frac{\lambda_p A_p}{L_p} + \frac{\lambda_n A_n}{L_n} \quad (11)$$

$$R = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (12)$$

Las propiedades termoeléctricas de los materiales son dependientes de la temperatura y se deben tener en consideración, pero puede emplearse una expresión más simple de la eficiencia utilizando valores promedios en el rango de temperatura de interés[11].

$$\bar{T} = \frac{T_H - T_C}{2} \quad (13)$$

Siendo la eficiencia de Carnot η_c , se puede expresar la eficiencia máxima ϕ_{max} que se puede obtener en función Carnot tal como expresa la ecuación (15)

$$\eta_c = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (14)$$

$$\phi_{max} = \eta_c \gamma \quad (15)$$

donde

$$\eta_c = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (16)$$

y

$$\gamma = \frac{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (17)$$

Siendo tanto γ como la eficiencia de Carnot η_c inferiores a la unidad y dependiendo de las propiedades de los materiales utilizados, cabe señalar que cuanto mayor sea la diferencia de temperatura de trabajo mayor será la eficiencia de Carnot y cuanto mayor sea la figura de merito Z_c , más próximo a la unidad el valor de γ y por tanto mayor eficiencia termoeléctrica en la generación.



Se define la figura de mérito como:

$$Z_c = \frac{\alpha_{AB}^2 \sigma'}{\lambda'} \quad (18)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad (19)$$

Siendo Z_c la figura de mérito de un par termoeléctrico y Z la expresión de la figura de mérito para un único material.

Para el caso de dos materiales semiconductores expresión maximizada de la figura de mérito sería:

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\lambda_p \rho_p)^{\frac{1}{2}} + (\lambda_n \rho_n)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (20)$$

Siempre y cuando se cumpla la condición de minimización del producto RK que maximiza la figura de mérito y se expresa en la ecuación (21)

$$\frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p \lambda_n}{\rho_n \lambda_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Considerando la expresión de la eficiencia (10) existe un valor de intensidad que la optimiza para cada diseño termoeléctrico y será aquella que circula cuando la carga coincide con la resistencia interna del dispositivo termoeléctrico.

En esa situación, $R_{load} = R_{int}$, se pueden establecer los siguientes valores máximos de potencia eléctrica generada y eficiencia de generación.

Tabla 1. Expresiones de rendimientos ideales para generación termoeléctrica [9]

	W_{max}	Φ_{max}
I	$(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T / 2R$	$(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T / R(\gamma + 1)$
R_{load}	R_{int}	γR_{int}
W	$[(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T]^2 / 4R$	$\gamma [(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T]^2 / R(\gamma + 1)^2$
Φ	$Z \Delta T / (4 + ZT_H + Z\bar{T})$	$(\gamma + 1) \Delta T / [(\gamma + 1)T_H - \Delta T]$

1.2.4.- Materiales termoeléctricos

La figura del mérito (19) incorpora tres parámetros termoeléctricos: el coeficiente Seebeck α , la conductividad eléctrica σ y la conductividad térmica λ . Todas estas propiedades son función de la concentración de portadores y en la Fig. 5 se muestra la dependencia de estos parámetros con la concentración portadores[12]. Hay que tener en cuenta que la concentración de portadores varía con la temperatura, y por lo tanto variarían los valores de los parámetros termoeléctricos y de la Z .

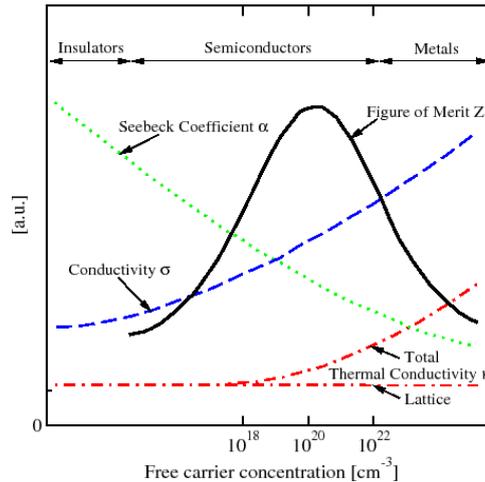


Fig. 5. Dependencia del coeficiente Seebeck α , la conductividad eléctrica σ , y la conductividad térmica de la concentración de portadores libres. [13]

Los materiales termoeléctricos en grado comercial Fig. 13 y Fig. 14 pueden dividirse convenientemente en tres grupos atendiendo al rango de temperatura de trabajo.

- Baja temperatura:
 - Rango de temperaturas de hasta 180 °C.
 - Son aleaciones de bismuto en combinación con antimonio, telurio y selenio que se emplean sobre todo la refrigeración termoeléctrica y no tienen competidores serios para aplicaciones en este régimen de temperaturas.
 - Suelen alcanzar valores de $ZT < 1.1$ [14]
- Temperaturas intermedias
 - Rango de temperaturas de hasta 580 °C.
 - Materiales a base de telurio de plomo muy afectados en su aplicación por la normativa RoHS
- Altas temperaturas
 - Rango de temperaturas de hasta 1000 °C.
 - Habitualmente aleaciones de germanio de silicio de muy baja eficiencia en comparación con los anteriores.

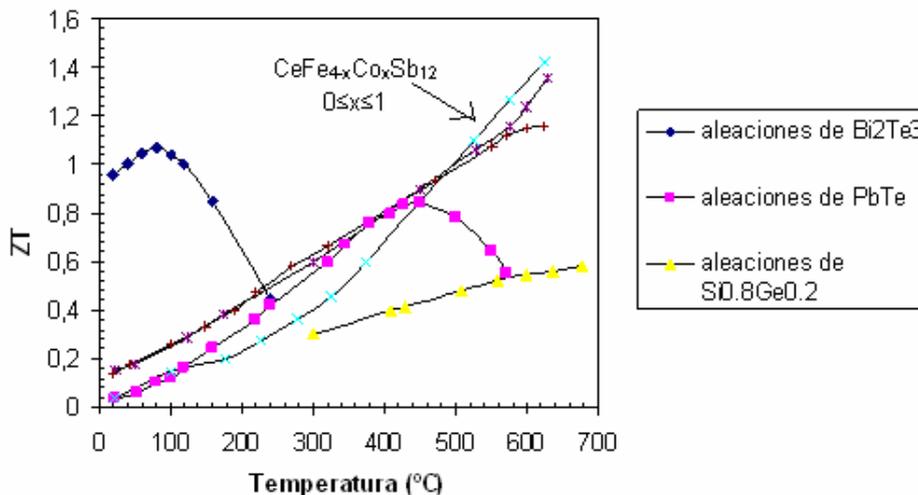


Fig. 6. Figura de mérito en función de la temperatura para varios materiales termoeléctricos [15]

Los esfuerzos en mejorar la figura del mérito se han centrado en la reducción de la conductividad térmica de la celosía mediante la nano estructuración de los materiales que resulta en un aumento de la dispersión de la interfaz de fonones y una consecuente reducción de la dispersión térmica en la red [11].

Sin embargo, hay otros objetivos que también centran, de modo creciente, el interés investigados de la comunidad científica más allá de la mejora de la eficiencia. Entre ellos cabe señalar el aumento del factor de potencia eléctrica, la reducción de costes y el desarrollo de materiales respetuosos con el medio ambiente, y son precisamente estos aspectos los que más motivan el interés de las empresas industriales en la presente tesis.

1.2.5.- Módulos termoeléctricos

Se comercializan dos tipos de módulos termoeléctricos, los conocidos como celda Peltier orientados principalmente al enfriamiento y los módulos de efecto Seebeck para generación potencia eléctrica.

Las celdas Peltier tienen un nicho de mercado, debido a su bajo coste, centrado en pequeñas fresqueras o neveras portales, además de para solución de ingeniería a medida de termo-regulación de pequeños caja o electrónicas. Los de efecto Seebeck se emplean sobre todo en aplicaciones de protección catódica de tuberías de gas montados sobre equipo de combustión de gas. Por lo general son soluciones de muy alto coste y valor añadido.

Un módulo termoeléctrico convencional está constituido por la unión de pares de semiconductores tipo P (huecos libres) y tipo N (cargas libres) que se conectan eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo entre dos placas de cerámica, en número de pares adecuado para obtener las característica térmicas y eléctricas de funcionamiento concretas que se adapten a las necesidades de refrigeración o generación.

La placa inferior se une a un disipador de calor para ayudar en la evacuación del calor y mantener un flujo térmico a través del módulo tal como se muestra en la Fig. 7. Por ello las placas cerámicas deben cumplir dos funciones, aislamiento eléctrico y ser buenos conductores térmicos.

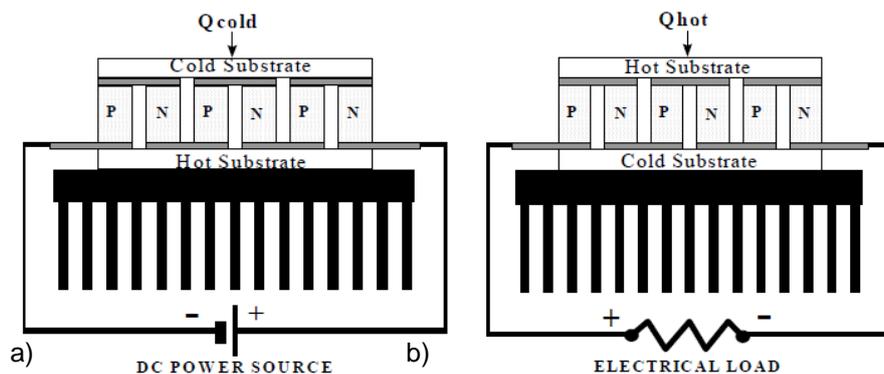


Fig. 7. a) TE module in cooling mode. b) TE module in power generation mode.

Las celdas Peltier pueden ser usadas como módulos generadores de energía usando fuentes de energía térmica de baja intensidad si se tiene en cuenta efectos de la exposición a altas temperaturas. Por otra parte, proporcionan la mayor eficiencia de conversión que los termoeléctricos pueden ofrecer, a temperaturas inferiores a 275 °C, ya que se fabrican del material de mayor rendimiento disponible en ese rango de temperatura [16].

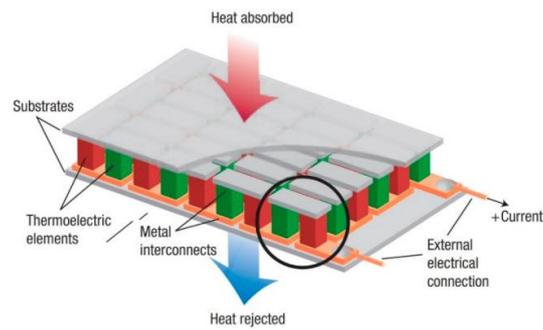


Fig. 8. Detalle constructivo de un módulo termoeléctrico. [17]

Los materiales termoeléctricos semiconductores de baja temperatura se conectan a través de conductores eléctricos de cobre utilizando uniones soldadas con aleación de estaño con bajo punto de fusión para no dañar los termoelementos durante el proceso de soldadura. Contienen además una capa de níquel que funciona como barrera anti difusión [18], para impedir que el estaño se penetre hacia el semiconductor y deteriore las propiedades del material. En la Fig. 9 puede apreciarse el corte analizado por microscopía electrónica de un dispositivo termoeléctrico realizado por Centro Stirling. En la sección 1 de la figura se aprecia el cobre de la pletina, en la sección 2 se puede ver la capa de estaño, mientras que la delgada capa de la sección 3 es la capa de barrera y el semiconductor termoeléctrico en la sección 4.

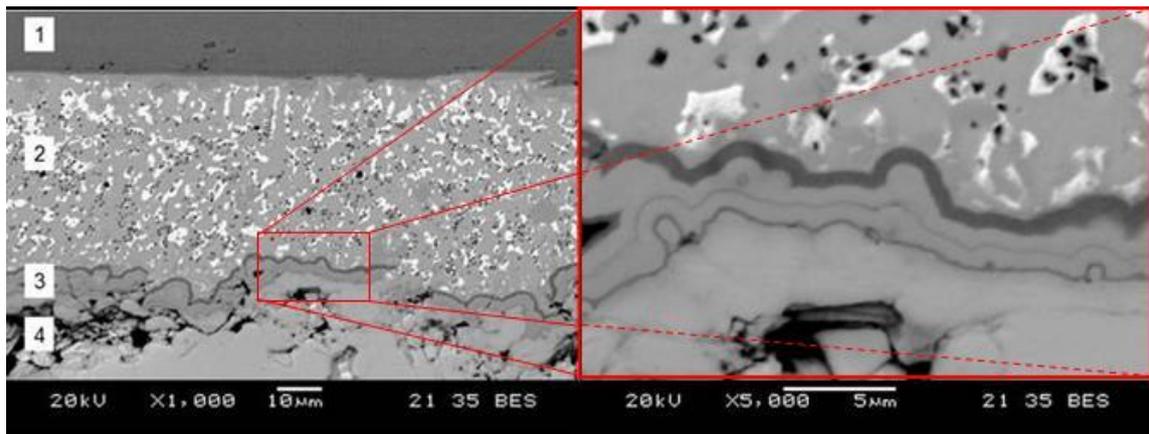


Fig. 9. Imagen de la capa de barrera mediante microscopía electrónica de barrido.

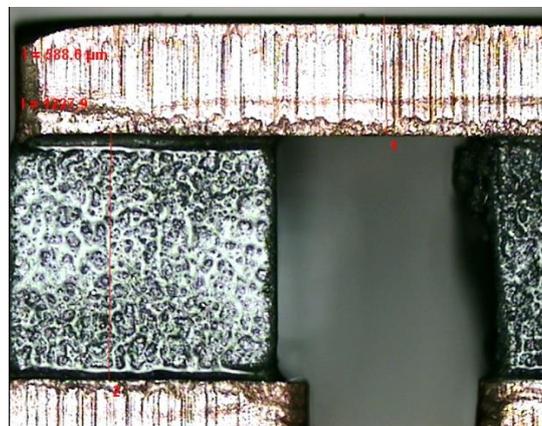


Fig. 10. Detalle de unión de dos termoelementos mediante puente de cobre

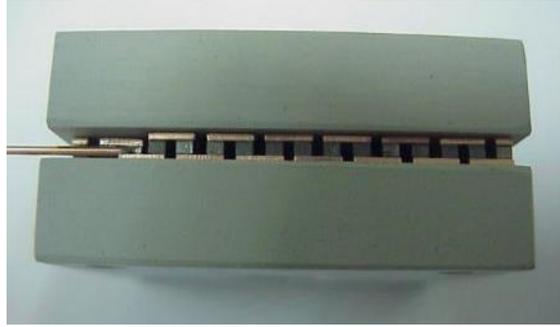


Fig. 11. Montaje de un módulo termoelectrico fabricado en Centro Stirling S.Coop

Los módulos termoelectricos actuales proporcionan un largo periodo de uso, con un rango entre las 100.000 y las 200.000 horas [19] y están disponibles en un amplio rango de dimensiones que puede ir desde 1,5 hasta más de 50 mm² [20].



Fig. 12. Celdas Peltier de Laid Technologies [21], Marlow Industries [22], Melcor [23] , y Hebeild [24]

1.3.- Evolución histórica de la tecnología termoelectrica

El fenómeno termoelectrico fue descubierto hace casi 200 años, aunque no fue hasta mediados del siglo XX que tuvo aplicación práctica.

El científico alemán Thomas Johann Seebeck descubrió el efecto al que da nombre en 1821. El fenómeno descrito consistía en que si los extremos del circuito constituido por dos metales heterogéneos soldados, bajo diferentes condiciones de temperatura estaban cerrados, una aguja magnética colocada cerca de él giraría como si hubiera un imán aplicado, dependiendo el ángulo de rotación del valor de la diferencia de temperatura en las uniones de los circuitos [25]. Este fenómeno físico se conoce como el **efecto de Seebeck**.

Fue 12 años después, en 1834 cuando se descubrió el **efecto Peltier**, por parte del físico francés Jean Charles Athanase Peltier. Este efecto que ocurre cuando la corriente pasa a través del circuito de dos conductores diferentes cuya unión absorbe o libera calor en función de la dirección de la corriente aplicada, es el fenómeno contrario del efecto Seebeck.

En 1854 William Thomson dio una explicación completa de los efectos Seebeck y Peltier descubriendo la relación entre ambos. Esta relación termodinámica permitió a Thomson predecir el tercer efecto termoelectrico o efecto Thomson. Este efecto describe como el calor se absorbe o se produce cuando la corriente fluye en el material con un cierto gradiente de temperatura. El calor es proporcional tanto a la corriente eléctrica como al gradiente de temperatura.

Hoy en día se denominan fenómenos termoelectricos o termoelectricidad a los tres fenómenos relacionados entre sí por las relaciones de Thomson: el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson.

Los descubrimientos desencadenaron el desarrollo de un nuevo campo de ingeniería: la ingeniería de termoenergía, que estudia los procesos de conversión de la energía térmica en energía eléctrica (el efecto Seebeck) y también la calefacción y refrigeración termoeléctrica (el efecto Peltier).

No obstante, no fue hasta mediados del siglo XX cuando Abram Ioffe desarrolló la teoría moderna de la termoelectricidad utilizando el concepto de la "figura de mérito" ZT y aplicando semiconductores fuertemente dopados, como son los telururos de antimonio, bismuto y plomo [26], a la fabricación de termoelementos para optimizar el rendimiento.

Durante y después de las guerras mundiales se estudió activamente la termoelectricidad para usos militares y civiles, principalmente en refrigeración y la generación de energía, alcanzando en la década de 1950 el 5% de eficiencia en los generadores y demostrando que el enfriamiento desde el ambiente hasta temperaturas inferiores a 0°C era viable técnica e industrialmente.

Desde entonces no se ha avanzado mucho en la mejora de la figura de mérito ($ZT \approx 1$), con niveles de rendimiento y eficiencia muy inferiores a otras tecnologías competidoras como motores térmicos convencionales y compresores para la refrigeración, si bien a nivel industrial se ha limitado a escasas aplicaciones nicho como volúmenes de mercado pequeños, sí ha suscitado el interés en grandes corporaciones de electrodomésticos, universidades y laboratorios de investigación.

En la última década, en cambio, muchos centros de investigación arrojan resultados en materiales y técnicas prometedoras de $ZT > 1$, que permiten ser optimistas en cuanto a su potencial de aplicación industrial en el medio plazo.

En cuanto a los materiales para la fabricación de módulos termoeléctricos cabe señalar que un material tenga un elevado factor de potencia termoeléctrica y, por lo tanto, un elevado ZT necesita tener un alto coeficiente de Seebeck y una elevada conductividad eléctrica (propia de los metales de alta concentración de portadores eléctricos). Por lo tanto, el factor de potencia termoeléctrico se maximiza para unas características de material a caballo entre un metal y un semiconductor. Por otro lado, el material también debe tener una baja conductividad térmica (característica de materiales semiconductores de baja concentración de portadores eléctricos o materiales aislantes).

Sobre la base de estas premisas que definen los requisitos que debe cumplir el material termoeléctrico, se han desarrollado una variedad de materiales cuya figura de mérito de muestra a continuación.

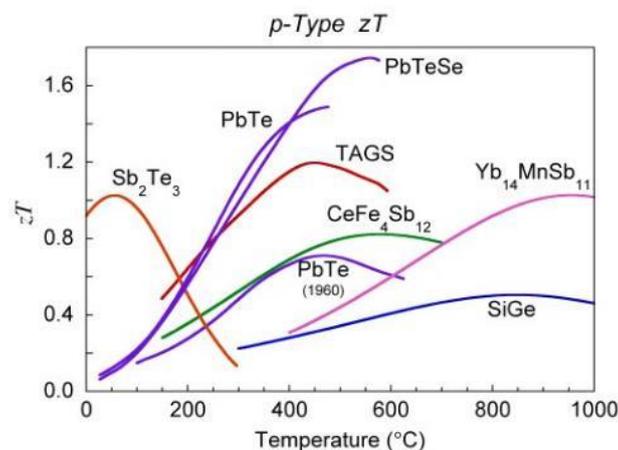


Fig. 13. Figura de mérito para materiales semiconductores tipo P [27]

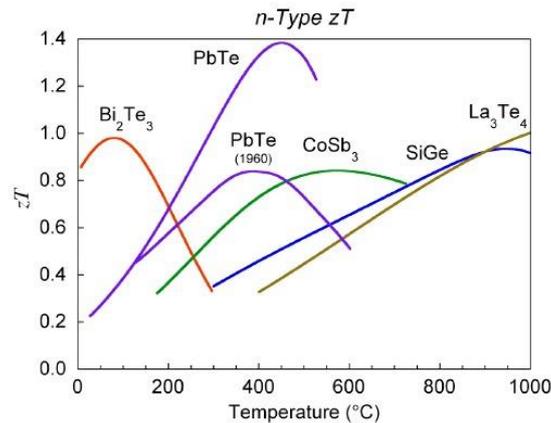


Fig. 14. Figura de mérito para materiales semiconductores tipo N [27]

Muchos de estos materiales tienen una temperatura máxima de funcionamiento a partir de la cual se comportan de forma inestable, otros no cumplen la normativa RoHS y otros, simplemente, no se encuentran disponibles en grado comercial. Por ello, que será necesario realizar una selección del material a utilizar en función de la temperatura de funcionamiento de la aplicación en cuestión.

Por ejemplo, en el rango de temperaturas de 80°C, el telururo de antimonio y el telururo de bismuto son los materiales de mayor ZT para los materiales termoeléctricos tipo P y tipo N respectivamente. Estos materiales parecen ser los más apropiados para temperaturas de trabajo por debajo de los 200°C; a partir de la cual, se abre un abanico más amplio de posibilidades.

1.4.- Motivación del presente trabajo de investigación

Las necesidades marcadas y definidas desde la Comisión Europea de ahorro de energía y mejora de la eficiencia energética mediante el desarrollo tecnológico ponen de manifiesto que existe un gran potencial de mejora donde la propuesta de investigación de la presente tesis encaja de un modo muy adecuado. E igualmente, el interés demostrado por empresas industriales en la presente propuesta respalda la motivación en el desarrollo de este trabajo de investigación.

En este sentido la aportación de la termoelectricidad al campo de los sistemas de calefacción es una alternativa potencialmente competitiva. El presente trabajo de investigación considera una novedosa propuesta mostrada en la Fig. 15.



Fig. 15. Representación gráfica del nuevo concepto de VC-TE.

Los sistemas de calefacción convencionales basan su funcionamiento principalmente en elementos de transferencia de calor al aire por fenómenos de convección, tanto en radiadores como Fan-Coils, pero con algunas diferencias fundamentales. El principio de funcionamiento de ambos sistemas es conceptualmente el mismo, es decir, en ambos casos, el calor procedente del sistema de calefacción (caldera, bomba de calor...) se transfiere al medio ambiente a través de radiadores o Fan-Coils. La principal diferencia es que los radiadores son elementos pasivos a través de los cuales se transfiere el calor a la estancia gracias a fenómenos de convección natural y los Fan-Coils están dotados de un ventilador que fuerza el aire hacia el intercambiador de calor (convección forzada) de forma que se consigue una mayor transferencia de calor a la estancia, permitiendo una homogeneización más rápida de la temperatura ambiente. A cambio, a diferencia de los radiadores, los Fan-Coils requieren cierto consumo de electricidad y una toma de corriente cercana.

El hecho de forzar el proceso de transferencia de calor, reduciendo el tiempo de homogeneización de la temperatura ambiente, resulta en un tiempo de funcionamiento más corto de la caldera o bomba de calor y, por tanto, en un aumento de la eficiencia global del sistema de calefacción [6],[7],[8]. En otras palabras, si se mantiene el tiempo de homogeneización, la temperatura del agua requerida será menor, con la consiguiente reducción del consumo de energía. Diversos investigadores [9] afirman que el uso de un convector de ventilador para forzar el paso del aire a través del intercambiador de calor puede aumentar el confort, restablecer la estratificación de la temperatura y mejorar la eficiencia de la calefacción del 85 al 91%.

Como más adelante se comenta se ha identificado la necesidad de investigar la mejora de la eficiencia real que implica la utilización de un Fan-Coil frente a un radiador, ya que no se han identificado estudios científicos que avalen dichas afirmaciones.

Ambos sistemas tienen su entorno de aplicación, estando el uso de radiador para calefacción más extendido en el entorno doméstico donde sólo se requiere calentamiento y el de los Fan-Coil en el entorno de oficinas o industrial donde además de calor puede aplicarse frío. Sin embargo, ambos sistemas tienen sus limitaciones, ya que si bien, los radiadores tradicionales pueden considerarse menos eficientes, tal como se expone a lo largo de la presente memoria, por realizar una convección natural, pero pueden funcionar sin necesidad de energía eléctrica, los ventiloconvectores en cambio, trabajan con convección forzada mediante el empleo de un ventilador, por lo que requieren de una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento.

Por ello, en la presente tesis se pretende abordar el desarrollo de un nuevo sistema de calefacción que aúne las ventajas de ambos sistemas mediante un nuevo ventiloconvector basado en termoelectricidad, y ahí es donde radica su principal ventaja. Esta tecnología termoeléctrica permite generar electricidad a partir de la energía térmica del agua de calefacción, alimentando *in-situ* al ventilador y a la bomba de recirculación y eliminando la necesidad de una fuente de energía eléctrica y permitiendo su instalación independiente de la proximidad o no de una fuente de energía eléctrica.

Esta propuesta ataca simultáneamente el mercado doméstico y el de oficina, lo que puede implicar un impacto mayor ante la posibilidad de disponer de un producto de alto valor y mayor eficiencia para abordar dos sectores con gran potencial de ahorro con una misma solución tecnológica. El enfoque de este nuevo producto no tiene límites de aplicación y permite ser aplicado tanto en obra nueva, como en rehabilitación, como directamente en la sustitución de radiadores de una manera transparente para el conjunto del sistema de calefacción.

La propuesta que el nuevo VC-TE plantea es la oportunidad para disponer de un producto diferente a todo lo existente, pero cuya fabricación es acorde a las competencias del tejido industrial vasco, lo que permitiría ser fabricado íntegramente en el entorno del País Vasco.

La actuación propuesta en el sistema de calefacción se limita exclusivamente al ámbito del radiador, en ningún caso se plantea la sustitución de las calderas u otros elementos auxiliares. Si bien es cierto que, como se verá a lo largo de la memoria, la eficiencia del sistema permitirá la sustitución de las calderas tradicionales por equipos con clara vocación de eficiencia energética y renovable como es la bomba de calor.

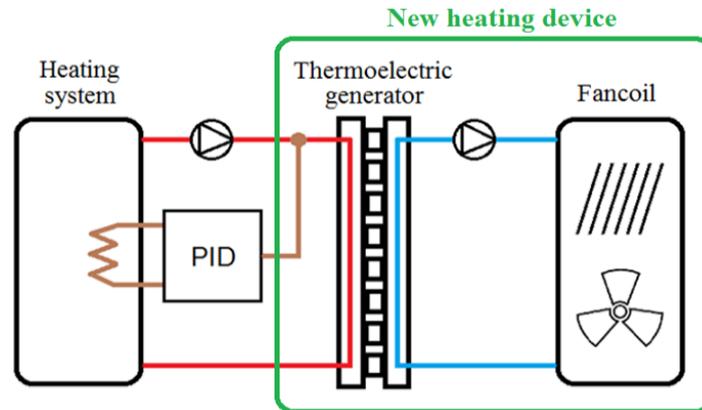


Fig. 16.: Esquema de nuevo dispositivo de calefacción: Generador termoeléctrico integrado en Fan-Coil

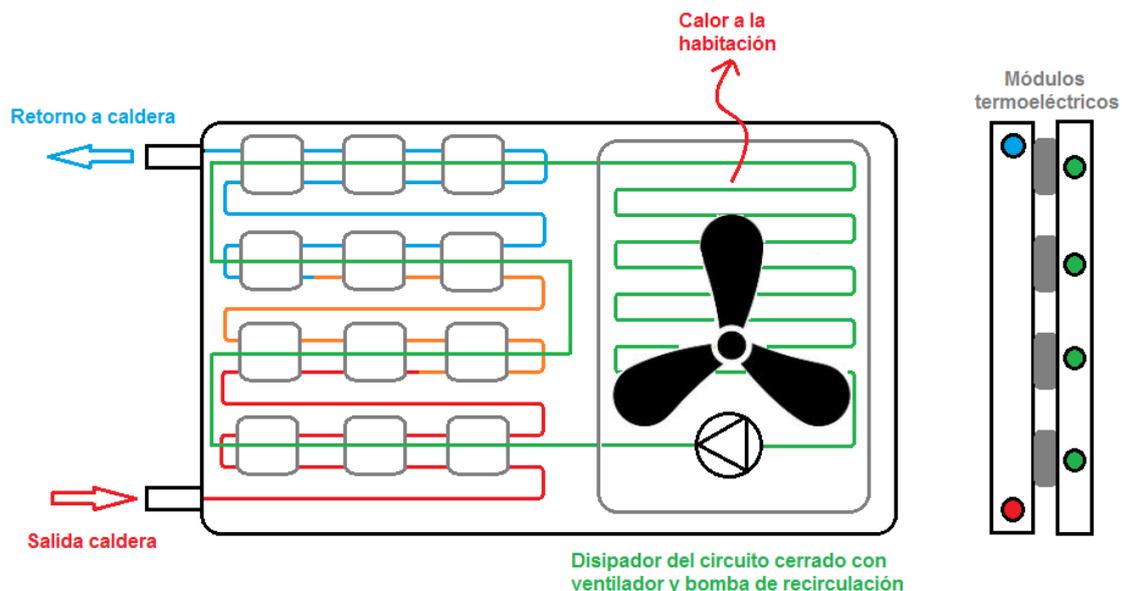


Fig. 17. Descripción conceptual de la propuesta.

Por otro lado, el impacto medioambiental de la generalización de la utilización de este producto en el entorno estatal o autonómico es muy significativo, tal como se expone más adelante, pudiendo representar un porcentaje relevante de cumplimiento de Kyoto de la obligación del país vasco, en cuanto a reducción de emisiones de CO₂ por reducción de consumo debido la mejora de la eficiencia.

Una vez obtenido un diseño preliminar del sistema generador termoeléctrico, el siguiente paso lógico sería abordar una metodología de diseño que contemple con mayor detalle los diferentes elementos constructivos del conjunto del ventilador y optimice cada uno de los elementos que componen el sistema termoeléctrico.

Dada la limitación temporal y de recursos disponibles en el planteamiento del presente trabajo de investigación, se opta por centrar el estudio en el análisis de uno de los componentes del VC-TE, en este caso el sistema generador que es donde radica el diferencial más significativo.

1.5.- Ventiloinvector: definición

En el Anexo A se recogen el conjunto de definiciones de interés relevantes para la comprensión de este documento. Los términos que se exponen muestran conceptos junto con sus definiciones, obtenidas tanto del Código Técnico de la Edificación como del Reglamento (UE) 2015/1188 del Consejo, de 24 de abril de 2015, del Reglamento (UE) 2016/2281 de la Comisión, de 30 de noviembre de 2016, así como de las normas EN 442-1:2014 y EN 16430-2:2014.

Entre ellas y por la relación preferencial con la temática de la tesis cabe señalar la definición concisa de ventiloinvector recogida en el Código Técnico de la Edificación.

“Ventiloinvector: Un dispositivo que proporciona circulación forzada de aire interior con la finalidad de calentar, refrigerar, deshumidificar o filtrar el aire interior, a efectos del confort térmico del ser humano, pero que no incluye la fuente de calentamiento o refrigeración ni un intercambiador de calor de exterior. El dispositivo puede ir equipado de un conducto mínimo para guiar la entrada y salida de aire, incluido aire acondicionado. Puede estar diseñado para ser empotrado o disponer de una carcasa que permita colocarlo en el espacio que deba acondicionarse. Puede incluir un generador de calor por efecto Joule diseñado para ser utilizado exclusivamente como calefactor de reserva” [28].

Es obligado mencionar que ni la definición incluida en el CTE, ni ninguna definición incluida en ninguna otra norma o reglamento define un ventiloinvector con un generador eléctrico en su interior y por tanto tampoco ningún generador termoeléctrico. Es por ello que al correspondiente ventiloinvector objeto de desarrollo y estudio en esta tesis se le procede a denominar **ventiloinvector termoeléctrico** (VC-TE).

1.6.- Legislación vigente

La ruta de descarbonización fijada por Europa marca la normativa ambiental enfocada principalmente en tres campos: la eficiencia energética, las energías renovables y la reducción de emisiones de CO₂.

Europa fija unas directivas que cada país miembro será responsable de transponer a su reglamentación nacional en el plazo que Europa fije. Y esto se hará mediante un Real Decreto o varios.

En este sentido se resumen las directivas más importantes que están afectando al sector de la calefacción y climatización doméstica.

- **Directiva de Ecodiseño:** La Directiva 2009/125, de diseño ecológico de los productos relacionados con la energía.
 - La Directiva de Ecodiseño tiene como objetivo establecer los requisitos comunitarios de diseño ecológico aplicados a los productos que utilicen, transfieran, generen o midan la energía. Se trata de una Directiva Marco, de la que emanan muchos Reglamentos que afectan a diferentes productos, entre otros; productos de calentamiento de aire, unidades de ventilación y a los equipos de aire acondicionado con una potencia inferior a 12 KW.



- **Reglamento (UE) 2016/2281** de la Comisión, de 30 de noviembre de 2016 que aplica la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía, en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos de calentamiento de aire, los productos de refrigeración, las enfriadoras de procesos de alta temperatura y los **ventiloconvectores**
- Reglamento (UE) 2015/1185 de la Comisión, de 24 de abril de 2015, por el que se aplica la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción local de combustible sólido.
- Reglamento (UE) 2015/1188 de la Comisión, de 28 de abril de 2015 por el que se aplica la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción local
- Reglamento (UE) 813/2013 de la Comisión, de 2 de agosto de 2013 por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo respecto de los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción y a los calefactores combinados
- **Etiquetado Energético:** La Directiva 2010/30, de etiquetado energético, recientemente sustituida por el Reglamento 2017/1369.
 - Se reconfiguración la escala de eficiencias, establecido nuevos criterios de clasificación, para volver a los orígenes con una clasificación de la A, a la G dado que con el avance de la tecnología la mayoría de los productos ya contaban con etiquetas A++. Este Reglamento, permite a los usuarios elegir los productos más eficientes comparando las propiedades energéticas de cada uno de una forma clara.
 - Reglamento Delegado (UE) 811/2013 de la Comisión de 18 de febrero de 2013 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al **etiquetado energético** de aparatos de calefacción, calefactores combinados, equipos combinados de aparato de calefacción, control de temperatura y dispositivo solar y equipos combinados de calefactor combinado, control de temperatura y dispositivo solar
- **Eficiencia Energética:** La Directiva 2012/27, de Eficiencia Energética y la Directiva 2010/31, de Eficiencia Energética en los Edificios[2].
 - La Directiva europea sobre eficiencia energética 2012/27/UE obliga a partir de 2017 a que todos los edificios que cuenten con sistemas de calefacción central, alrededor de 1,7 millones en España, tengan que instalar dispositivos de medición individuales, contadores individuales de calefacción o repartidores de costes en los radiadores de calefacción[29]. Por lo que, un sistema generador que permita disponer de una fuente energética en el propio radiador tal como se plantea en la presente tesis, puede suponer un valor añadido.
 - En 2018 se publicó una nuevas Directiva, la Directiva 2018/44 [30] está modificando algunas iniciativas de la Directiva 2010/31, implementando una estrategia para apoyar la renovación de los edificios de todos los estados miembro.
 - También a finales del año 2018 se publicó la Directiva 2018/2002 [31] que modifica algunos aspectos de la Directiva 2012/27 para ayudar a conseguir que los objetivos europeos de eficiencia energética planteados para el 2030.
- **Energías Renovables:** La Directiva 2018/21, de fomento del uso de energías procedentes de fuentes renovables

- Ha sido sustituida recientemente por la Directiva 2011/65/UE de finales de 2011.
- **Directiva RoHS:** La directiva 2002/95/CE de restricción de sustancias peligrosas
 - Esta directiva está orientada a reducir el uso de algunas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos y ha sido sustituida por la Directiva 2011/65/UE que se extiende a otros productos además de los eléctricos y electrónicos.
 - Se restringe el uso de seis sustancias: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, bifenilos polibromados y éteres difenil polibromados.
 - La limitación de uso del plomo (<1000 ppm) ha afectado significativamente al sector de la termoelectricidad ya que el estaño se utiliza con frecuencia aleado con plomo para reducir su punto de fusión, y la utilización a plata, con aleaciones que alcanzan los 220°C de punto de fusión, se ha convertido en la solución tecnológica más extendida.
 - Directiva (UE) 2017/2102 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de noviembre de 2017, por la que se modifica la Directiva 2011/65/UE sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos
- **Normas técnicas de radiadores y convectores:** por las que se establecen las normas técnicas de los tipos de radiadores y convectores de calefacción.
 - EN 442-1:2014 Radiators and convectors - Part 1: Technical specifications and requirements.
 - En España la UNE EN 442-1:2014 Radiadores y convectores - Parte 1: Especificaciones y requisitos técnicos.
 - Esta norma anulará y sustituirá a las Normas UNE-EN 442-1:1996, UNE-EN 442-1/A1:2004 y UNE-EN 442-3:2004
 - EN 442-2:2014 Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating.
 - En España la UNE EN 442-2:2014 Radiadores y convectores - Parte 2: Métodos de ensayo y de evaluación.
 - EN 16430-1:2014 Fan assisted radiators, convectors and trench convectors Part 1: Technical specifications and requirements
 - En España la UNE EN 16430-1:2015 Radiadores y convectores - Parte 1: Especificaciones y requisitos técnicos.
 - EN 16430-2:2014 Fan assisted radiators, convectors and trench convectors Part 2: Test method and rating for thermal output
 - En España la UNE EN 16430-2:2015 Radiadores y convectores - Parte 2: Métodos de ensayo y de evaluación.
- **Código Técnico de la Edificación (CTE) [28]**
 - El CTE contiene un Documento Básico de Ahorro de Energía donde se establecen las exigencias básicas en materia de eficiencia energética y energías renovables que deben satisfacer los edificios de nueva construcción, incluso las intervenciones en edificios existentes. El CTE cuenta además con una sección específica para la limitación del consumo energético y otra para la limitación de demanda energética (calefacción y refrigeración) así como para el rendimiento de las instalaciones térmicas.
 - El Código Técnico favorece el desarrollo de tareas de I+D+i, así como un aumento del uso de las nuevas tecnologías en el sector de la construcción, al integrar de forma más directa los avances logrados[28].

1.7.- Objetivos de la tesis

Tras la revisión bibliográfica realizada, se identifican los siguientes objetivos:

- 1) Desarrollo de un **nuevo dispositivo de calefacción ventiladoconvectivo termoeléctrico (VC-TE) autónomo** sustitutivo del radiador convencional. Ello implica desarrollar un sistema termoeléctrico capaz de generar la potencia eléctrica necesaria para alimentar un ventiladoconvectivo que mejore la eficiencia energética del mismo y que suponga, por extensión, un ahorro energético en calefacción.
- 2) Ampliar los conocimientos sobre el estado del arte de los sistemas termoeléctricos en el entorno doméstico
- 3) Desarrollar un modelo teórico, validado experimentalmente, que caracterice el funcionamiento del nuevo sistema VC-TE y que permita en un futuro el dimensionamiento de este tipo de sistemas para distintas aplicaciones y escalas de una manera rápida y sencilla
- 4) Desarrollar una metodología que permita realizar una comparativa en términos de eficiencia entre radiadores y ventiladoconvectores.
- 5) Estudiar el comportamiento del VC-TE ante situaciones de trabajo comunes como posibles variaciones en el flujo del circuito cerrado de refrigeración y en las temperaturas de trabajo.
- 6) Estudiar el impacto de la mejora de la eficiencia del VC-TE en el contexto actual.
- 7) Analizar la aportación de una nueva arquitectura de pellet a la reducción de costes
- 8) Analizar la aplicabilidad de un nuevo material óxido de alta temperatura al generador termoeléctrico en el rango de trabajo

1.8.- Estructura de la tesis

La tesis se estructura en ocho capítulos con cierta dependencia entre sí, con la finalidad reflejar la consecución del objetivo principal. El orden de los capítulos se organiza para ir de lo particular a lo general partiendo del bloque del sistema termoeléctrico del capítulo 3, pasando al bloque de ventiladoconvectivo completo en el capítulo 4, para evaluar posteriormente su impacto en el capítulo 5 y finalizar estudiando de una propuesta de mejora en el capítulo 6.



Fig. 18. Diagrama de la estructura de la tesis

Entrando más en el detalle del contenido de cada capítulo, el capítulo 1, de carácter introductorio, define los fundamentos teóricos básicos de la tecnología termoeléctrica y la normativa relacionada y de aplicación con los ventilosconvectores y radiadores, así como los objetivos de la presente tesis, mientras que el capítulo 2 se enfoca en el estudio del estado del arte de la tesis, analizando las posibilidades de la tecnología termoeléctrica y los sistemas de generación basados en ella, evaluando el estado, no solo a nivel de investigación, sino también a nivel comercial, así como situación de protección de la propiedad industrial vía patentes.

El capítulo 3 se centra en el estudio de sistema termoeléctrico que supone el componente diferencial del VC-TE y el elemento fundamental del análisis de la tesis. Se inicia el capítulo definiendo el marco teórico y los modelos computacionales, numérico y analítico, con los que se analizan las estructuras novedosas y realizan los cálculos termoeléctricos de módulos convencionales, para pasar a diseñar y construir un prototipo de laboratorio del sistema generador completo, así como su caracterización experimental, y definición de un modelo completo del sistema generador.

El capítulo 4 analiza el VC-TE, partiendo de la integración del sistema termoeléctrico, analizado en el capítulo 3, en el mismo y su diseño completo. Se establece también una metodología que permita realizar un análisis del comparativo de la mejora del consumo y el ahorro, entre el elemento radiante tradicional y un ventilosconvector y suponga una evidencia testada de la mejora de la eficiencia.

En el capítulo 5 se analiza el potencial impacto de un VC-TE en el entorno cercano. Conocida la mejora de la eficiencia se definen los costes asociados al dispositivo y los parámetros técnicos que repercuten sobre los mismos VC-TE.

El capítulo 6 expone nuevos conceptos estructurales de par termoeléctrico y un nuevo material de potencial aplicación para los ventilosconvectores termoeléctricos. Se estudian su comportamiento analizando igualmente su posible impacto, sin llegar de desarrollar un prototipo completo que permita su validación.

En el capítulo 7 se exponen las conclusiones basadas en los resultados y análisis de los capítulos anteriores. Además, se plantean una serie de líneas de investigación que pueden desarrollarse a partir de los trabajos realizados en esta tesis.

El capítulo 8 muestra el resumen de las aportaciones científicas relacionadas con la presente tesis, tanto nivel de publicaciones, como de asistencia a congresos, patentes, etc.

Al final de la tesis se incluyen varios anexos que completan la información recogida en los capítulos principales.

En el ANEXO A se incluye el conjunto de términos y definiciones básicas que recoge la normativa de aplicación.

El ANEXO B presenta un resumen de interfaz gráfico de usuario implementado en Matlab que se utiliza para interactuar con el modelo numérico y el ANEXO C resume la primera simulación de la estructura novedosa realizada en Fluent y con funciones definidas por Usuario, además de una primera caracterización experimenta de dicha estructura con un material óxido.



1.8.1.- Resumen de metodologías y modelos aplicados en la tesis

- 1- Modelo numérico implícito de módulo para la simulación de módulo termoeléctrico unidimensional mediante calculo computacional de elementos finitos discretizados en MATLAB que arrojará como resultado:
 - a. El comportamiento termoeléctrico de estructuras termoeléctricas no convencionales para evaluar su potencial aplicación en el ventiloinvector, incluso con otros materiales en el rango de temperatura de trabajo
 - b. Un modelo base para futuros desarrollos del Centro Stirling en la temática termoeléctrica.
- 2- Modelo analítico de un sistema termoeléctrico no ideal que permita el cálculo computacional completo del TEG mediante Matlab para su caracterización experimental y arroje como resultado
 - a. Valor de la eficiencia total del sistema en función de parámetros termoeléctricos.
 - b. Valor de la eficiencia total del sistema en función de parámetros de diseño de los disipadores.
 - c. Caracterización de los valores de temperatura y flujos térmicos en puntos interiores del sistema termoeléctrico
- 3- Modelo analítico unidimensional simplificado de ventiloinvector que, basado en el modelo anterior, permita el cálculo computacional completo mediante Matlab para su caracterización experimental y arroje como resultado
 - a. Caracterización de los valores de temperatura y flujos térmicos en puntos interiores del sistema termoeléctrico en el régimen de trabajo del ventiloinvector:

CAPÍTULO 2 *ESTADO DEL ARTE*



2.1.- Introducción.

El esquema seguido en la revisión del estado del arte es el siguiente: en primer lugar, se analizan las posibilidades de la tecnología termoeléctrica como alternativa a las tecnologías empleadas tradicionalmente en el campo de generación de electricidad. Para ello se realiza un estudio de los materiales termoeléctricos desde el punto de vista del coste, la robustez y la eficiencia.

Una vez comprobado que la tecnología termoeléctrica es una alternativa real que potencialmente ofrece ventajas desde un punto de vista de eficiencia y respeto al medioambiente, se revisan el estado de las soluciones comerciales, módulos, sistemas y generadores termoeléctricos, en los apartados siguientes atendiendo a las realidades de mercado en este caso, más allá de la literatura a nivel de investigación.

Se revisa a su vez en la literatura referente a ventilosconvectores tanto en su combinación con la termoelectricidad, como en la determinación de su eficiencia en comparación con radiadores. De este modo se pretenden identificar posibles puntos débiles de la configuración objeto de estudio, así como establecer los fundamentos que ayuden en la correcta definición de los objetivos de la tesis.

2.2.- Estado del arte de los materiales termoeléctricos.

2.2.1.- Materiales empleados en los generadores termoeléctricos.

Cabe señalar que la eficiencia no siempre es la característica más buscada en las aplicaciones termoeléctricas, y en ocasiones las aplicaciones industriales anteponen otras características como la fiabilidad y el coste, relegando la eficiencia siempre que se cumplan los requisitos de generación de potencia eléctrica

2.2.1.1.- Coste

Por lo general, los materiales termoeléctricos más habituales en dispositivos termoeléctricos están basados en telururo de bismuto, telururo de plomo y germanio de silicio, si bien últimamente algunas compañías empiezan a ofertar módulos termoeléctricos con óxido CMO (Calcium / Manganese) [32], aunque a precios muy elevados en comparación con los clásicos. El telurio es un material muy escaso y caro [33], igual que el germanio, lo que limita sus posibilidades de aplicación y favorece la investigación en materiales que no usan elementos costosos. El desarrollo de los materiales termoeléctricos de polímero, siliciuro, óxido y tetraedrita está fuertemente motivado por la necesidad de reducir los costes y mejorar la viabilidad comercial de los generadores termoeléctricos. La Tabla 2 muestra los costes de las materias primas asociados con materiales de muestra de los principales tipos de clasificaciones de materiales de termoeléctricos [34].

Tabla 2. Coste de los materiales brutos y purificados [34]

Material type	Material name	Material cost (\$/kg)	
		Raw	Pure
Chalcogenide	Bi_2Te_3	110	806
	$\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$	84	581
SiGe	$\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$	371	7081
Clathrate	$\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{28}\text{Zn}_2$	615	3973
Skutterudite	$\text{Yb}_{0.2}\text{In}_{0.2}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$	24	204
Half-Heusler	$\text{Ti}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{NiSn}$	11	530
Silicide	$\text{Mg}_2\text{Si}_{0.85}\text{Bi}_{0.15}$	7	191
Oxide	$(\text{Zn}_{0.98}\text{Al}_{0.02})\text{O}$	2	50

Si bien los costes de los materiales termoeléctricos son significativos, los costes de los componentes del módulo y del sistema termoeléctrico pueden sobrepasar los costes del material. Por ejemplo, una de las principales contribuciones al coste del módulo termoeléctrico se debe a los sustratos cerámicos (piezas delgadas de alúmina con un coste aproximado de \$ 0.10 / cm²) y también a los intercambiadores de calor [34].

Como se puede observar en la Tabla 2, los óxidos son los materiales que tienen una estimación de coste más baja junto con los siliciuros, mientras que el bismuto de telurio es uno de los materiales más caros.

El montaje es otro de los aspectos a tener en cuenta. El montaje de los termoelementos o el material en *bulk* se realiza de forma manual por parte de la gran mayoría de fabricantes, y esto supone un coste elevado, lo cual ha motivado a muchos fabricantes europeos y americanos a establecer acuerdos con países Low Cost Countries (LCC). La fabricación automática a través de máquinas de *pick&place* abarataría el coste, pero solo una empresa en Japón fabrica de esta manera. Dada la importancia de la técnica de montaje con respecto al coste, el Centro Stirling que ha trabajado durante más de una década en la termoelectricidad, ha dedicado importantes esfuerzos a los procesos automáticos de montaje [35] y la sustitución de la cerámica por aluminio.

2.2.1.2.- Robustez

En cuanto a los materiales termoeléctricos, es importante no sólo seleccionar materiales con un gran valor de Z sino también examinar cuidadosamente su estabilidad térmica e impacto sobre el medio ambiente, la construcción óptima de electrodos, la tecnología de revestimiento y otras tecnologías necesarias para la modularización. En la Tabla 3 se listan los materiales termoeléctricos que se consideran prometedores, atendiendo a razones mecánicas, de estabilidad térmica, de impacto medioambiental y temperatura de trabajo. Es incuestionable que, para el módulo de baja temperatura, los materiales basados en Bi₂Te₃ cuyo rendimiento ha sido plenamente demostrado por los módulos Peltier son los más adecuados. Para los módulos de alta temperatura, por otro lado, hay muchas opciones tanto para el tipo N como para el tipo P. Incluyen, por ejemplo, materiales basados en TAGS y PbTe, compuestos basados en Skutteruditas, y óxidos. Se aprecia además que, aparte del Bi-Sb-Te-Se o los PbTE, que están muy probados, los materiales presentan una considerable incertidumbre sobre su estabilidad térmica.

Tabla 3. Características de varios materiales termoeléctricos de generación [36]

Material	Composition	Conduction type	Optimum temperature (°C)	Production process	ZT	Mechanical properties	Thermal stability	Environmental impact
Silicides	Mn-Si	p	300 – 600	Melting & refining	0.80	Young's modulus: 12,000MPa Poisson's ratio: 0.34	○	○
	Mg-Si	n	380 – 600	Melting & refining	1.07	-	Unstable without coating.	○
Si-Ge-based	Si _{0.8} Ge _{0.2}	n	730	Hot press	1.00	Compressive strength: 653 MPa	Stable for over 10 years.	○
	Si _{0.8} Ge _{0.2}	p	730	Hot press	0.70	Compressive strength: 473 MPa		○
Oxide-based	NaCo ₂ O ₄	p	30 – 500	Flux	1.20	-	○	○
	(Ca,Sr,Bi) ₂ Co ₂ O ₅	p	330 – 730	Glass annealing	-	-	○	○
	(ZnO) ₅ (In _{0.97} Y _{0.03}) ₂ O ₃	n	430 – 800	RTGG	0.31	-	○	○
	Zn _{0.98} Al _{0.02} O	n	430 – 700	Solid phase reaction	0.42	-	○	×
PbTe-based	PbTe	n	230 – 577	Hot press	0.70	-	Subject to heat history.	-
TAGS-based	GeTe-AgSbTe ₂	p	430		1.40	-	○	-
LaTe	LaTe [~] 1.4	n	-730		1.17 – 1.43	-	-	-
filled-Skutterudites	YbCo _{0.9} (PtPd) _{0.1} Sb ₃	n	330 – 630	Plasma sintering	1.12	-	-	-
	Ce _{0.12} Fe _{0.7} Co _{3.29} Sb ₁₂	p	330 – 630	Plasma sintering	0.93	-	-	-
Bi-Sb-Te-Se	Bi-Sb-Te-Se	n, p	-180 – 250	Hot press	0.3 – 1.01	-	Sufficient data available.	-
Zn ₄ Sb ₃ -based	Zn ₄ (Sb _{0.97} Sn _{0.03}) ₃	p	230 – 480	Plasma sintering	1.00	-	Somewhat unstable.	-
	Zn ₄ Sb ₃	p	230 – 480	Plasma sintering	1.22	-		-

2.2.1.3.- Eficiencia

Existen numerosas alternativas en cuanto a materiales termoeléctricos de generación se refiere, todas ellas con eficiencias superiores a los óxidos cuya figura de mérito ronda el 0,5 [37]. Es la menor figura de mérito de los materiales considerados en la Tabla 4. Sin embargo, su coste y sus propiedades de robustez resultan muy interesantes para las aplicaciones comentadas.

Tabla 4. ZT media y máxima y eficiencia de los materiales termoeléctricos [38]

Material	ΔT (°C)	T_{avg} (°C)	ZT_{max}	Efficiency w/ ZT_{max}	ZT_{avg}	Efficiency w/ ZT_{avg}	
n-type	Bi_2Te_3	290	150	0.98	10.9%	0.78	9.3%
	PbTe	580	310	0.79	13.4%	0.63	11.5%
	CoSb ₃	550	450	0.85	11.1%	0.66	9.3%
	SiGe	610	680	1.04	10.8%	0.80	9.0%
p-type	Sb_2Te_3	270	160	1.02	10.5%	0.67	7.7%
	Tc-Ag-Ge-Sb	440	370	1.20	12.5%	0.98	11.0%
	$CeFe_4Sb_{12}$	540	410	0.82	11.0%	0.64	9.2%
	$Yb_{14}MnSb_{11}$	600	690	1.03	10.2%	0.73	8.0%
	SiGe	690	640	0.62	8.7%	0.50	7.4%
	PbTe	500	340	0.71	10.2%	0.63	9.4%

2.2.2.- Materiales termoeléctricos basados en óxidos

En los próximos años, se espera que la generación de electricidad por medio de materiales cerámicos termoeléctricos permita la conversión de una gran cantidad de calor perdido por automóviles, fábricas, centrales eléctricas, etc [34]. Estos sistemas de generación termoeléctrica pueden transformar directamente el calor en energía eléctrica sin necesidad de utilizar partes móviles, como turbinas, o de producir emisiones de CO₂ u otros gases. Desde hace algunas décadas, se han utilizado materiales termoeléctricos para producir electricidad en casos en los que otro tipo de generación no era posible. Este es el caso de las sondas espaciales enviadas al espacio profundo (como la Voyager I), cuya única posibilidad de obtener energía es utilizando materiales termoeléctricos. Para ello, se han diseñado los denominados RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators), en los que el calor es producido por la desintegración de un isótopo radiactivo [39].

Esta aplicación demuestra la viabilidad de la producción de energía eléctrica utilizando estos materiales, aún a pesar de que su rendimiento no es todavía lo suficientemente elevado para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Estas prestaciones vienen dadas por la denominada Figura de Mérito (ZT), la cual define su eficiencia como [11]

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \lambda} \quad (22)$$

Siendo α el coeficiente Seebeck, T la temperatura absoluta, ρ la resistividad eléctrica y λ la conductividad térmica. De esta expresión puede deducirse que un material termoeléctrico eficiente debe tener un elevado coeficiente de Seebeck, una resistividad eléctrica y conductividad térmica lo menor posible, y una elevada temperatura de trabajo. Sin embargo, la obtención de dichas características no es un reto sencillo, ya que los tres primeros parámetros están relacionados entre sí y tienden a variar en sentidos opuestos. Hoy en día existen sistemas termoeléctricos basados en materiales intermetálicos, como Bi₂Te₃ o CoSb₃, que poseen altos



valores de ZT [40] [41] a relativamente bajas temperaturas. Por otro lado, muchos de estos materiales no cumplen la directiva RoSH, son escasos en la corteza terrestre [42], y pueden degradarse y/o liberar metales pesados cuando están sometidos a altas temperaturas en aire [43]. Todos estos problemas conllevan una drástica limitación de sus aplicaciones prácticas. Sin embargo, la solución a estos problemas se encontró en 1997, cuando se descubrió un compuesto cerámico, basado en óxidos, con altas prestaciones termoeléctricas (hasta diez veces las esperadas), el NaCo_2O_4 [44], con conducción por huecos (tipo p). A partir de este descubrimiento, numerosos materiales, basados en óxidos de cobalto han presentado prestaciones termoeléctricas muy prometedoras. Así, se encontraron algunos sistemas cerámicos con elevado coeficiente de Seebeck y pequeña resistividad eléctrica, como BiPbSrCoO [45] y CaCoO [46]. Este último compuesto es considerado actualmente el más prometedor para aplicaciones prácticas a altas temperaturas (~ 1000 K), además de estar formado por materiales abundantes y amigables con el medio ambiente.

En definitiva, puede decirse que se ha logrado un progreso significativo en el desarrollo de materiales termoeléctricos. Sin embargo, la estabilidad y la toxicidad de los compuestos se han convertido en un problema crítico para algunas aplicaciones. Estos materiales termoeléctricos basados en óxidos son menos tóxicos, tienen una estabilidad relativamente alta y presentan una reducida degradación por efecto de la temperatura, además de por roturas por shock térmico, ciclado térmico... lo que hace innecesaria la utilización de cámaras de acero para mantener una atmósfera de vacío libre de oxígeno.

2.2.3.- Materiales termoeléctricos basados en polímeros

Los materiales orgánicos han sido considerados como materiales termoeléctricos prometedores debido a la abundancia de los materiales que utiliza y sus elementos en la naturaleza, su baja conductividad térmica, flexibilidad, etc [47].

Se han demostrado valores de ZT de 0,42 (tipo p) y 0,20 (tipo n) en PEDOT: PSS y polímeros poly [K x (Ni-ett)], comparables a los de los nanomateriales inorgánicos empleados para generar termoelectricidad a partir de cristales [48] [49] y los termoeléctricos orgánicos están siendo ahora ampliamente explorados debido a que tienen potencial para dispositivos de calefacción y refrigeración vestibles y para generación de energía cercana a temperatura ambiente [50].

2.3.- Situación comercial de los dispositivos termoeléctricos

2.3.1.- Módulos termoeléctricos comerciales

Teniendo en consideración el rango de temperaturas de la aplicación objeto de la tesis, se ha realizado un comparativa de la oferta comercial de módulos termoeléctricos de baja temperatura de telururo de bismuto, en aras de conocer la topología más común de los mismos y las características termoeléctricas que las hojas técnicas de los fabricantes ofrecen sobre los mismos.

En la Tabla 5, de elaboración propia, se puede apreciar la variedad de catálogo de módulos termoeléctricos que ofertan los principales fabricantes. Muy pocos de ellos están en Stock, sólo las tipologías más comunes, y la gran mayoría tienen un tiempo de entrega que puede rondar entre las 3 y 11 semanas. Los módulos termoeléctricos más habituales contienen 127 pares n+p (con 40×40 mm²), 71 pare n+p (con 30×30 mm²) y 31 pares n+p (con 20×20 mm²).

Tabla 5. Variedad de catálogo de módulos termoeléctricos de los principales fabricantes

	PAÍS	Nº de tipos módulos ¹	Variedad de pares ²	Variedad de dados ³	Tª max. de Trabajo	Tolerancia I _{max}	Tolerancia R _{ac}
Tellurex	EEUU	4	2	2	175	---	---
Kryotherm	RUSIA	>80	13	22	200	± 10%	± 10%
CrystalTherm	RUSIA	>30	8	12	150	± 10%	±10%;±5%
Melcor	EEUU	>30	5	14	225	---	---
Marlow	EEUU	>20	≈8	≈12	130	---	---
Hebeiltd	CHINA	16	6	≈8	225	---	---

Con respecto a las geometrías de termoelementos, que cabe señalar que el formato siempre es un prisma rectangular de base cuadrada, quedando definida su esbeltez por el factor geométrico (L/A).

- Las áreas más habituales son dos 1.4x1.4 mm² y 1.0x1.0 mm²
- Las alturas habituales tanto en son dos: 1.60 mm y 1.15 mm
- El factor de forma más comunes es 1.4x1.4x1.6 mm³

Todos los fabricantes disponen de módulos de 127 pares con las geometrías de termoelementos más habituales.

Tabla 6. Características técnicas del módulo TE más habitual de los principales fabricantes

	V _{max}	I _{max}	Q _{max}	ΔT _{max}	R _{ac}	Altura
Tellurex	16.1	8.1	80.6	79	---	3.2
Kryotherm	15.7	7.9	76.0	69	1.50	3.6
CrystalTherm	15.7	8.5	79.0	70	1.59	3.8
Melcor	15.4	8.5	72	65	1.55	3.3
Marlow	14.7	7.4	71	66	1.6	3.56
Hebeiltd	15.4	8.5	85	68	1.55	3.5

Tras analizar la oferta comercial del módulo termoeléctrico más habitual, se recoge en la Tabla 6 un extracto de las características técnicas a 25°C mostradas en catalogo por los principales fabricantes. Estos módulos son principalmente utilizados para refrigeración por lo que las características que muestran están relacionadas con este modo de funcionamiento, aunque pueden inferirse los datos para su funcionamiento en generación a partir de estos [16].

Los fabricantes que muestran tolerancias indican que rondan el ±10%, salvo gamas específicas de mayor calidad y costes que puede rondar ±5%. Excepto Tellurex, todos los fabricantes ofrecen una gama muy amplia de catálogo y prácticamente todos ofertan el desarrollo de módulos a medida.

¹ Se entiende por “tipo de módulo” aquel que presenta diferente geometría de dado o diferente número de elementos.

² “Variedad de pares” indica cuantos módulos tienen diferente número de pares,

³ “Variedad de dados” indica el número total de dados con diferente geometría.

Analizando el caso concreto de Kryotherm [51] (Tabla 7), por tener la mayor oferta de todos los fabricantes, se observa que oferta una gama de 3 tipos de Temperatura de trabajo: de 120°C, 150°C y 200°C y sus tolerancias de I_{max} , U_{max} , Q_{max} así como en R_{AC} son $\pm 10\%$.

Tabla 7. Oferta de módulos de la empresa Kryotherm en función de la geometría de los dados.

Área de dados	Altura de dados								
	0.8	1.15	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.5
0,8					127				
1.0	195			127-83	127-83			127-83	127-83
	127			71-63	71-63			71-63	71-63
	32	63		31-17	31-17			31-17	31-17
				7	7			7	7
1.4	99	127			241-161			161	127-123
	49	71			127-123			127	99-71
		63	127		99-71		71	63	63-48
		31			63-48				31-17
		17			31-17				7
		7			7				
2.0		127			127-71				127-71
	127	71			31-17		127		31-17
					7				7
2.2	199								
2.8		127							
5.0					31		31		

2.3.2.- Costes de los módulos termoelectrónicos.

El coste es un parámetro tan importante en la toma de decisión sobre la elección de generadores termoelectrónicos como pueda serlo la eficiencia o la potencia generada en aplicaciones de recuperación de calor residual o industrial.

Minimizar el coste del sistema obliga a un determinado diseño que en ocasiones puede ser muy diferente de un diseño orientado a máxima eficiencia o de otro orientado a máxima generación de potencia.

Los costos de los intercambiadores de calor suelen ser los que más afectan al sistema termoelectrónico, recomendándose unos costes de intercambiador de $\$1/(W/K)$ para lograr costes del sistema termoelectrónico $\$1/W$ [52] (en máxima potencia generadas).

Durante muchos años, los únicos módulos disponibles para aplicaciones industriales a un precio razonable fueron módulos de telururo de bismuto (Bi_2Te_3), con una $ZT \approx 1$ y temperaturas máximas de trabajo inferiores a 300 °C.

El período de tiempo entre el descubrimiento de nuevos materiales y la producción de módulos industriales es largo, aunque los nuevos y prometedores materiales están marcando la ruta para fabricantes e investigadores.

Algunos de estos materiales se pueden encontrar disponibles en el mercado o cerca de ser comercializados (half heusler, skutterudites, óxidos, siliciuros de magnesio, ...), presentando figuras de mérito prometedoras que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Listado de módulos termoeléctricos y sus propiedades [53]

Manufacturer	Materials	Temperature difference ΔT	Power weight	Status	Maximum temperature	Information, outlook
HiZ, Thermonamic, Lairdtech, Marlow, Komatsu etc.	Bi_2Te_3	300 K	20 W 115 g	€40-€100	300 °C	Scarce (rare earth), toxicity
Evident Thermoelectric	Half-Heusler	500 K	15 W	Coming soon	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
Shanghai Institute of Ceramics	Skutterudites	510 K	25 W	Coming soon	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TEGMA	Skutterudites			s still in development		Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TECTEG MFR	Calcium/Manganese oxide	750 K	12.3 W	Available	800 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
TECTEG MFR cascade modules	Calcium/Manganese oxides with Bi_2Te_3	435 K	11 W	Available	600 °C	
TECTEG MFR hybrid modules	BiTe-PbTe	320 K	21.7 W	Available	360 °C	Scarce (rare earth), toxicity
Hotblock Onboard	Silicon-based alloy	500 K	3.6 W 6 g	Available	600 °C	Environmentally-friendly, low cost, availability of raw materials
Romny Scientific	Magnesium silicide			Coming soon	600 °C	Low S/Watt target: 1\$/W
Alphabet Energy	p-type tetrahedrites n-type magnesium silicide	300 K	9.2 W	Available	600 °C	Tetrahedrite is a naturally-occurring p-type mineral
OTEGO CDT	Organic TEG	Small temperature gradients		Coming soon	130 °C	Environmentally-friendly, low cost, easily scalable

Cabe mencionar que otros proveedores como Huimao [54] ofertan un coste por módulo rondando los 5 €, incluso alguno como Hebeiltd [55] publica los precios online, que pueden alcanzar \$5.69 para la referencia TEC1-12705 (40x40x4.2mm³ y 127 pares) y sobre los que en función de cantidades pueden llegar a aplicar descuentos de hasta el 40%. Incluso Amazon comercializa una disparidad de marcas desconocidas con referencias idénticas a un coste unitario < 1 € (0,79€ [56]-1,17€) comprado al por menor.

2.3.3.- Generadores termoeléctricos comerciales

Debido a la falta de alternativa en generación de electricidad para baja temperatura con materiales termoeléctricos, más allá del Bi_2Te_3 se ha extendido el estudio a todo tipo de generadores termoeléctrico que incluyen sistemas termoeléctricos de mayor temperatura que la ambiente. Se ha llevado a cabo un análisis de los generadores termoeléctricos disponibles hoy en día en el mercado y se ha realizado una comparación frente a sus mercados objetivos, fuentes de calor, temperaturas de funcionamiento, sistema de disipación y generación eléctrica, entre otras.

A continuación, se muestra un resumen de las empresas fabricantes de este tipo de sistemas, con una breve explicación de los generadores de los que disponen:

Alphabet Energy, Inc. [57]

Dispone de equipos de generación eléctrica remota, con dispositivos como el Power Generating Combustor™ [58].



Fig. 19. Power Generating Combustor™



Alphabet Energy afirma producir hasta 850W de electricidad con el PowerModule- γ TM [59] a partir de gases de escape entre 300°C-600°C, con el mejor rendimiento de cualquier producto similar que se encuentre en el mercado, sin embargo, no hay pruebas independientes que lo confirmen [60].



Fig. 20. Alphabet Energy PowerModule- γ TM

RGS Development [61]

Dispone de un equipo de cogeneración remota que genera electricidad y agua caliente a partir de la recuperación del calor residual de los procesos industriales y de los gases de escape de motores de combustión interna para la alimentación autónoma. RGS Development está investigando sobre materiales termoeléctricos de siliciuro de manganeso desde 2013 [62].



Fig. 21. Modelo Thermagy.

Un panel típico genera del orden de 1,5kW-2,5kW/m² cuando se expone a una fuente de calor de 700-1200°C [61].

Kryotherm [51]

Disponen de equipos de generación eléctrica desde 15 a 1000W a partir de la combustión de gas natural, propano y mezclas de propano y butano (Modelos GTEG) y también a partir de vapor.



Fig. 22 modelos de generadores termoeléctricos GTEG de Kryotherm.

El núcleo de los GTEGs es un módulo termoeléctrico encapsulado herméticamente, que contiene una serie de elementos de materiales termoeléctricos semiconductores de temperatura media. [63].

Gentherm, Inc. [64]

Esta compañía dispone de generadores termoeléctricos orientados a la recuperación de energía de procesos industrial; la fabricación de vidrio, incineración de basura, forjado de metales, síntesis de productos químicos, ... Al ser tan amplio el rango de aplicaciones, cada solución tiene una tipología distinta en cuanto a fuente de calor, foco de disipación y tipo de termoeléctrico interno distinto.



Fig. 23. Generador 8550 de Gentherm

Hoy en día, la empresa Gentherm (antes Global Thermoelectric) es líder mundial en la producción de generadores de electricidad para zonas remotas. La empresa existe desde hace 30 años y ha realizado unas 22.000 instalaciones por todo el mundo. [65].

En su funcionamiento, el quemador calienta directamente una sección de los módulos termoeléctricos que son enfriados mediante convección natural dispuestas en sus lados fríos. Los generadores tienen potencias de entre 15 y 550 W y puede combinarse para instalaciones de hasta 5000 W. Por ejemplo, el 8550 Global Thermoelectric (Fig. 23) produce 500 W con una eficiencia de alrededor de 2.3 % [65].

Estas aplicaciones tienen un valor añadido muy elevado, pero el mercado es muy limitado.

RIF Corporation [66]

Esta empresa rusa ofrece un generador termoeléctrico de gas natural como fuente de energía eléctrica. Está orientado al suministro de corriente continua para el funcionamiento de dispositivos radioelectrónicos, automatismos, comunicaciones, protecciones catódicas de líneas de gas y otros que, a pesar de no disponer una fuente de alimentación eléctrica, disponen de una fuente de gas cerca. [67]



Fig. 24. Generador termoeléctrico de gas (TGG-150)

Disponen de generadores con potencias de 150 W, 200 W, 300 W, 500 W con fiabilidad demostrada en su operativa de campo de larga duración sin servicio de mantenimiento.

Este generador también provee de una fuente de calor para el calentamiento del aire.



Telgen Thermoelectric [68]

En los generadores GTG de Telgen, el foco frío está compuesto por unos radiadores de aluminio con una superficie desarrollada para favorecer la convección natural. Aunque su fuente principal de energía es el gas natural, pueden ser adaptados a otros combustibles gaseosos de menor calidad fruto de procesos industriales. Existe la posibilidad de usar quemadores de premezcla atmosféricos o quemadores infrarrojos, pero todos ellos emplean cámaras de combustión cerradas por seguridad.



Fig. 25. Generador termoeléctrico GTG-200 de Telgen

Telgen oferta una vida útil 30 años en los generadores GTG cuya potencia de generación oscila entre 60W y 550W [69].



Fig. 26. Thermoelectric oven de Telgen

Telgen ha desarrollado una caldera de gas para entorno doméstico con generador termoeléctrico arrojando una potencia eléctrica de 150W y térmica de 5-7 KW a un coste que ronda \$800 [70]. Aunque cabe señalar que existe muy poca literatura al respecto.

Thermonamics [71]

Disponen de una gran variedad de generadores termoeléctricos para distintos rangos de temperatura y potencias, desde 5W hasta 200W (escalable hasta 600W). Los sistemas de disipación generalmente son mediante circulación de agua o aceite y el aporte térmico puede ser o bien mediante aceite a alta temperatura o mediante el contacto directo con una fuente de calor externa.



Fig. 27. Generador TEG-LL30-12V de Thermonamic

Aunque Thermonamic dispone de módulos de generación para temperaturas medias (PbTe) los generadores termoeléctricos están desarrollados con Bi₂Te₃ y no disponen de fuente térmica. Están diseñados para aprovechar el calor residual de agua caliente o fuentes térmicas de baja temperatura

2.3.4.- Análisis comparativo de las soluciones comerciales.

De todos los modelos identificados, los de Thermonamics son los más susceptibles de poder ser aplicados en un sistema de calefacción como el que se está desarrollando en este proyecto, debido al rango de temperaturas de trabajo y potencias generadas, así como las fuentes de calor y métodos de disipación para los que están preparados.

Tabla 9. Comparativa de sistemas de generación termoeléctricos de los principales fabricantes.

Fabricante	Fuente de calor	Sistema de disipación	Material	Solución constructiva	T ^o s de trabajo	Potencia generada	Tipo de salida
Alphabet Energy	Productos de la combustión	Bloque de agua	Silicio y tetrahedritas	Módulos	Lado caliente 400-600 °C Lado frío 50 °C	417-803 W	129-144 VDC
RGS Development	-Calor residual procesos industriales -Productos de la combustión	Bloque de agua	Silicio	Paneles	Lado caliente 700-1200 °C	1.5-2.5 kW/m ²	-
Kryotherm (Modelos GTG)	Combustión gas natural, propano o mezclas propano-butano	Disipador de aletas	Pb-Te	Módulos encapsulados de media T ^a	Lado caliente: 510°C	15-1000W Escalable hasta 5000W	12-24-48 VDC
Gentherm, Inc.	Combustión de gas natural, propano...	Bloque de agua, disipadores, heat pipes...	Pb-Te	Módulos	-	21-500 W	12-48 VDC
RIF Corporation	Productos de la combustión	Convección natural por aletas	-	Módulos	Lado caliente 400-600 °C	150-500 W	-
Telgen Thermoelectric	Productos de la combustión	Convección natural por aletas	GeTe (Tipo P) PbTe (Tipo N)	Módulos	Lado caliente 450 °C Lado frío: 80 °C	60-150 W	6-48 VDC

Por lo general, todos aquellos sistemas que utilizan módulos termoeléctricos convencionales, como los que se pueden observar en la Tabla 10, están sujetos a los problemas de fiabilidad y robustez debido a las roturas producidas por los ciclados térmicos a los que están sujetos.

Por otro lado, aunque algunas de las soluciones son económicamente más asequibles, el coste de todos estos generadores comerciales es muy elevado.

La eficiencia de todos ellos no es muy elevada debido a las ineficiencias intrínsecas de la solución constructiva de los módulos convencionales; como se ha comentado con anterioridad a lo largo de la memoria, estas ineficiencias se deben sobre todo al elevado número de soldaduras que aportan una elevada resistencia de contacto tanto térmica como eléctrica. Las soluciones de Alphabet y RGS Development gozan de mayores eficiencias debido a las elevadas temperaturas de trabajo.

Por último, se observa que no todos los generadores cumplen con la normativa ROHS debido a los materiales termoeléctricos utilizados en sus módulos.



Tabla 10. Ventajas y desventaja de las soluciones comerciales de generadores termoeléctricos

Fabricante	Mercado objetivo	Ventajas	Desventajas
Alphabet Energy	Generación en ubicaciones remotas. Instalaciones industriales de frío.	-Reducción emisiones GEI -Valorización de subproducto (calor). -Bajo mantenimiento.	-Gran tamaño -Diseñado para escalas muy grandes. -Incumplimiento de RoHS
RGS Development	Generación en ubicaciones remotas.	Escalable Facilidad de instalación Cogeneración (8-20kW/m2)	-
Kryotherm	Protección catódica de conductos de gas, plataformas marinas, infraestructuras petrolíferas. Detectores de gas, medidores de consumo, transmisión de datos, control remoto...	Bajo coste de adquisición y de mantenimiento Robusto	-
Gentherm, Inc.	Instalaciones químicas, forjas, incineradoras, automoción. Protección catódica de conductos de gas.	-Soluciones para un amplio rango de potencias.	-No es un sistema flexible.
RIF Corporation	Dispositivos aislados de la red eléctrica	-Fiabilidad -Durabilidad en cualquier condición -El calor generado se puede emplear en otros usos (calentamiento de aire)	-Quema de combustible fósil expresamente para la generación. -Solo un combustible posible.
Telgen Thermolectric	Telecomunicaciones en lugares remotos. Control y mantenimiento redes de gas.	-Amplia variedad de combustibles gaseosos. -Vida útil 30 años. -Sin necesidad de ventiladores	-Quema de combustible fósil expresamente para la generación. -Incumplimiento de RoHS

Tras este análisis cabe mencionar que un concepto de generador termoeléctrico basado en materiales óxidos de alta temperatura podría ser novedosa y presentar claras ventajas competitivas frente a los sistemas presentes hoy día en el mercado por las siguientes razones:

- El hecho de utilizar materiales termoeléctricos basados en óxidos que no presentan los problemas típicos de los materiales termoeléctricos convencionales como son la degradación por efecto de la temperatura, roturas por shock térmico y ciclado térmico... añade una ventaja clara desde un punto de vista de robustez y fiabilidad.
- Una configuración en la que se utilizarán menor número de dados de material termoeléctrico de mayor tamaño reduciría el número de soldaduras y por tanto las ineficiencias generadas asociadas a las resistencias de contacto tanto eléctricas como térmicas. Esta reducción del número de soldaduras mejoraría a su vez la robustez y la fiabilidad del sistema respecto a las soluciones con módulos termoeléctricos convencionales. Esta configuración, además, simplificaría en gran manera el proceso de montaje y la unión de los distintos elementos entre sí, lo que podría repercutir en el coste final del sistema.
- La eliminación de estas soldaduras hace pensar que se podrían mantener e incluso superar las eficiencias de los sistemas actuales.
- Se cumplirá la normativa ROSH debido a la utilización de materiales no tóxicos
- La utilización de material óxido podría suponer una estrategia de mejora a evaluar en su aplicación en baja temperatura para el VC-TE.

2.3.5.- Estudio de sistemas termoeléctricos

En lo que respecta a los sistemas de generación comerciales basados en termoelectricidad, a parte de los elementos termoeléctricos, existe en el mercado una variedad de sistemas generadores termoeléctricos que contemplan también los intercambiadores de calor necesarios. Los más comúnmente utilizados se dividen en dos grandes grupos en función de cómo se realiza la transferencia térmica en los focos caliente y frío:

- Líquido-Líquido: la transferencia de calor en el foco caliente y frío se realiza desde o hacia un fluido líquido.
- Líquido-Aire: en uno de los focos la transferencia de calor se realiza a través de un medio líquido y en el otro foco mediante aire movido por la acción de un ventilador.
- Aire-Aire: la transferencia de calor en ambos focos frío y caliente se realiza mediante aire movido por la acción de ventiladores.



Fig. 28. Sistemas termoeléctricos con intercambiadores Aire-Aire desarrollados por Centro Stirling [72]

Un ejemplo de sistema termoeléctrico con intercambio líquido-líquido es el desarrollado por Thermonamic. El modelo TEG-200-24V [71] como el que se muestra en la Fig. 27 es capaz de generar 200W eléctricos si se mantienen unas condiciones de diferencia de temperatura entre la el foco frío y caliente (30°C - 270°C).

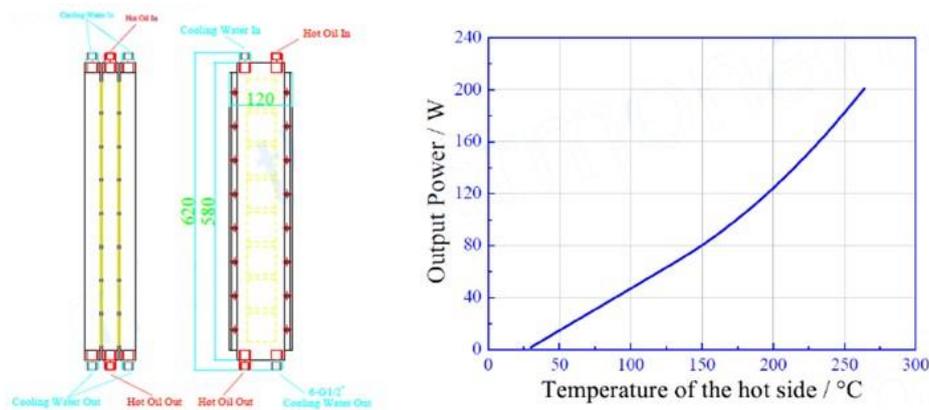


Fig. 29. Sistema de generación termoeléctrico TEG-200-24V con intercambio Líquido-Líquido



Este sistema está compuesto por 16 módulos termoeléctricos de 56mmx56mm. Únicamente genera los 200W de potencia eléctrica cuando se introduce como fuente térmica aceite a 270°C por el foco caliente y por el foco frío se hace circular agua a 30°C como refrigerante.

El coste del sistema de la Fig. 29, alcanza los \$1100/unidad, lo que aleja la posibilidad de ser aplicado en cada Fan-Coil para su autoabastecimiento, tal como se pretende en la presente tesis, además de contar con unas dimensiones relativamente voluminosas para ajustarse a los tamaños comerciales de los Fan-Coils en entorno doméstico.

Este mismo fabricante tiene una gran variedad de sistemas líquido-líquido y aire -líquido para distintas potencias eléctricas, desde 5 hasta 5000W.

Laird Technologies [73] es otro fabricante de sistemas termoeléctricos. Entre sus productos se pueden encontrar sistemas con ambos intercambiadores de calor de aire, líquido-líquido o una combinación de ellos, aire-líquido.

El modelo LL-060-12-00-00, es uno de los ejemplos de sistema líquido-líquido, en este caso para utilizarlo con agua o con mezcla de agua y glicol.



Fig. 30. Modelo LL-060-12-00-00 de Laird Technologies

Por último, se muestra otro ejemplo de un sistema termoeléctrico, también de Laird Technologies, en el que uno de los intercambiadores de calor es para líquido y el otro para aire. Este ejemplo en concreto es el modelo LA-045-24-02-00-00, en el que como se puede ver en la Fig. 31, uno de los intercambiadores de calor es para líquido y el otro es un intercambiador aleteado por donde se hará circular el aire impulsado gracias a la acción de un ventilador.



Fig. 31. Modelo LA-045-24-02-00-00 de Laird Technologies

Sin embargo, ya sea por el rango de temperaturas de funcionamiento o por los fluidos de trabajo (agua-glicol, líquido-aire), ninguno de estos sistemas está diseñado para el funcionamiento en el ámbito doméstico donde los fluidos a emplear son la ida y el retorno del agua de calefacción y donde las temperaturas de trabajo pueden alcanzar los 85 °C. Los modelos previamente mostrados han sido diseñados para trabajar en refrigeración y no soportan temperaturas superiores a 75°C, para lo que contiene un switch térmico de protección.

En cuanto a dispositivos comerciales que compitan directamente con el producto proyectado, no se ha encontrado ninguno que comparta las características del mismo. Sin embargo, sí que existe un accesorio modular que convierte un radiador convencional en uno similar al que se quiere conseguir. Este accesorio es el RadFan (intercambio similar a aire-aire), comentado en la sección de la revisión del estado del arte en sistemas de calefacción, que sigue teniendo el inconveniente de necesitar una conexión a la red en sus inmediaciones para su alimentación. En cualquier caso, el nicho de mercado en unidades emisoras de calefacción es extenso e interesante.

2.4.- Sistemas alternativos de generación de energía

En este apartado se centra el análisis en tecnologías competidoras de la termoelectricidad que puedan ofrecer ventajas competitivas. No se trata de ahondar en el conocimiento de ellas y sus características que han sido ampliamente estudiadas por parte del centro Stirling como dispositivos de cogeneración [74] [75] sino de evaluar su comportamiento con diferencias de temperaturas bajas cuando la fuente térmica no es una llama sino una fuente de calor residual.

2.4.1.- Ciclo Stirling

Diversos estudios analizan en este sentido su aplicación en calefacción como elemento de sustitución de la caldera tradicional, y funcionando como bomba de calor [76]. Este ciclo reversible puede funcionar como motor y junto con un alternador generar la potencia eléctrica necesaria para alimentar un ventilador. En este sentido, Clucas et al. [77] pone de manifiesto que solo una de las configuraciones, la gamma, es adecuada para aplicaciones de baja y ultra baja diferencia de temperatura, que pueden incluir energía solar de baja o nula concentración, energía geotérmica de baja temperatura, recuperación de energía de residuos, aplicaciones de laboratorio y educativas, etc.

Otras variantes en estudio como la termoacústica [78] pueden ofrecer un potencia de aplicación a tener en consideración debido a su sencillez y bajo coste.

2.4.2.- Ciclo Erikson

Se ha demostrado que la viabilidad de aplicar el efecto piroeléctrico al ciclo termodinámico Erikson [79], aporta mejoras 100 veces superiores al efecto piroeléctrico lineal. Según Sebald et al. [80] la eficiencia es mucho más alta que la de los mejores materiales termoeléctricos basados en el efecto Seebeck. Sin embargo, esta tecnología no resulta inmediatamente aplicable, ya que realiza la recuperación de energía de las variaciones de temperatura de la fuente térmica y no de la existencia de una diferencia de temperatura entre un foco frío y uno caliente. Sin embargo, es un concepto interesante sobre el que podría establecerse una línea de trabajo futura.

2.4.3.- Ciclo Rankine Orgánico.

Los Ciclos Rankine Orgánicos (ORCs) son una posible tecnología para trabajar con fuentes de baja temperatura, por tener más adaptabilidad a diversas fuentes de calor, ser una tecnología probada con gran madurez, contar con menos complejidad y menos mantenimiento, y la posibilidad de ser desarrollada a pequeña escalas, además de contar con bajos costes de inversión y mantenimiento y proveedores de mercado conocidos [81].

La eficiencia típica de un ORC se encuentra alrededor del 16% [82] y la temperatura de trabajo de los Ciclos Rankine orgánicos puede variar desde 20°C a 450 °C [83] en función del tipo de arquitectura, aunque otros autores [81] señalan que los fluidos orgánicos para pequeños

sistemas son solo posibles para temperaturas $< 300^{\circ}\text{C}$, donde el agua falla por razones económicas y técnicas.

La termoelectricidad, comparativamente menos eficiente, presenta como ventaja, la ausencia de partes móviles, y la fácil modularidad y aplicabilidad a pequeña escala, así como el coste, especialmente si se tienen en consideración el coste de su instalación, su fiabilidad y mantenimiento [84], ya que en los ORC puede rondar los \$4-5 /W.

2.5.- Estado del arte de los emisores de calor de sistemas de calefacción.

A continuación, se muestra un resumen del estado del arte de los emisores de calor con respecto a la eficiencia, los sistemas alternativos en cuantos a emisores de calor y, por último, los sistemas termoeléctricos que podrían ser integrados en estas tecnologías de transmisión de calor.

2.5.1.- Eficiencia de ventilosconvectores frente a radiadores

Es importante no confundir un radiador de baja temperatura con ventilador con un Fan-Coil, los primeros son sistemas de calefacción “potenciados” y los segundos son sistemas de climatización (calor y frío) con alto caudal de aire, bandeja de recogida de condensados, filtros de aire, etc. A primera vista, los Fan-Coils son muy similares a los radiadores, sin embargo, son mucho más eficientes que éstos últimos.

Existen referencias [85] que afirman que los ventilosconvectores pueden ser hasta un 300% más eficientes que los radiadores convencionales. Sin embargo, al igual que los radiadores de baja temperatura, requieren de una conexión eléctrica cercana a la zona de instalación del Fan-Coil.

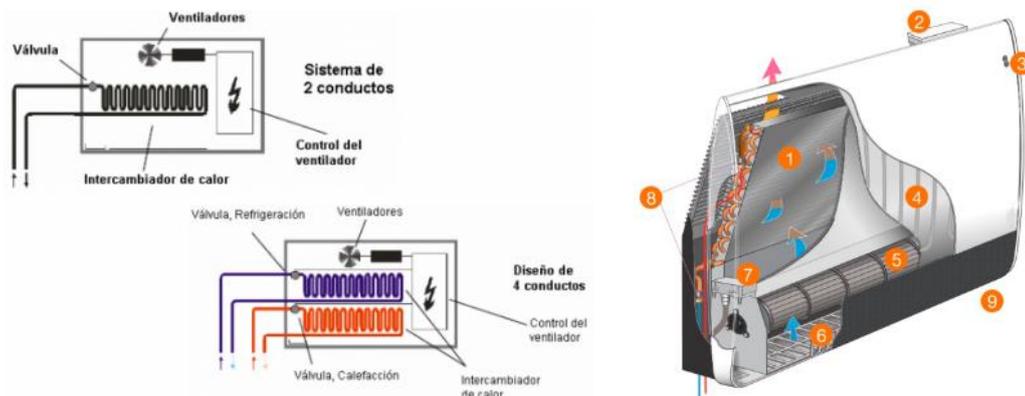


Fig. 32. Esquema de un ventilosconvector [85]

En combinación con bombas de calor, los Fan-Coils son especialmente adecuados para alcanzar la temperatura ambiente deseada, incluso en sistemas de calefacción de baja temperatura. De esta manera se garantiza que, en el modo calefacción, la bomba de calor opere más eficazmente y sea posible ahorrar aún más costes debido a que, una disminución de tan sólo 1°C en la temperatura de ida permite reducir los costes de calefacción en aprox. 2.5%.

Gracias a una circulación activa de aire los Fan-Coils alcanzan una mejor potencia de caldeo en comparación con los radiadores. De esta forma, igualmente se consigue un aumento de confort considerable, al obtener una temperatura mucho más homogénea en todo el recinto calefactado.

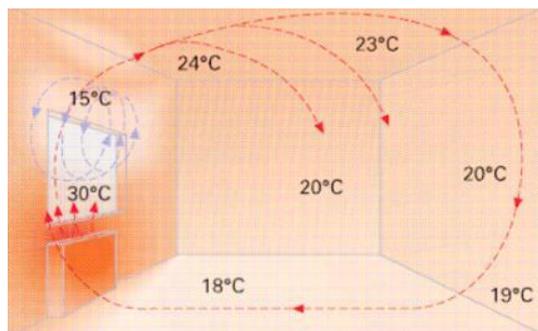


Fig. 33. Ejemplo de distribución de temperatura en una habitación

Como contrapartida, tienen un mayor consumo eléctrico que los radiadores convencionales ya que se basan en la convección forzada por acción de un ventilador, pero pueden operar en ambos modos y la distribución del calor se realiza más rápidamente, a costa de un inferior confort térmico debido al movimiento forzado del aire.

Además de los dispositivos testeados en ámbitos académicos también existe una amplia variedad de empresas que actualmente ofertan sus radiadores o Fan-Coils asegurando una mayor eficiencia respecto a radiadores convencionales. Algunos fabricantes de Fan-Coils aseguran que sus productos son cerca de un 30% más eficientes, tal como se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 11. Mejoras de eficiencias de ventiloconvectores comerciales

Fabricante	Modelo	Mejora de eficiencia
Panasonic	Aquarea Air [86]	32%
PHNIX	Ultra-Thin Fan-Coil [87]	30%
HTP	Ultra-Thin Hydronic Fan-Coil [88]	Más de un 30%
123 ZEROENERGY	Ultra-Thin Fan-Coil Unit [89]	30%

2.5.2.- Sistemas alternativos en emisores de calor: radiadores ventilados

La cuantificación de la eficiencia de los elementos finales de los sistemas de calefacción, los emisores de calor, resulta compleja debido a que su función no es realizar una transformación de energía, sino simplemente emitir el calor entregado por el generador térmico. Por lo tanto, podría decirse que la característica más importante de estos elementos no es cuánto emite, sino cómo lo hace.

Sin embargo, es posible establecer un criterio de eficiencia refiriendo el comportamiento del emisor al generador, es decir, observando el tiempo necesario para alcanzar el confort térmico y viendo qué gasto energético tendría un sistema frente a otro. Este criterio, que realmente permite cuantificar un ahorro (comparativo) tanto económico como en combustible y por lo tanto en emisiones de gases de efecto invernadero, es el que presenta una oportunidad de mercado para los sistemas emisores potenciados con convección forzada. Esto es debido a que la convección forzada podría reducir el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de confort en el punto deseado, con su consiguiente ahorro de combustible.

Actualmente existen dispositivos experimentales, con los que se han llevado a cabo ensayos con prototipos y emplazamientos reales, que pretenden ser capaces de inducir ahorros gracias a la inclusión de sistemas de ventilación en los radiadores, aunque con poca validación independiente.



RadFan

Entre ellos destaca el dispositivo modular RadFan [90], creado en el Reino Unido y distribuido actualmente a nivel comercial con éxito. Con una supuesta mejora de la eficacia y un precio contenido.

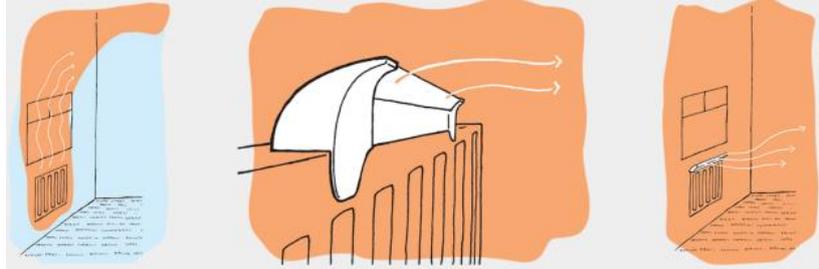


Fig. 34. Infografía de funcionamiento de dispositivo RadFan

Su operativa, tal como muestra la infografía de la Fig. 34 consiste en colocar sobre el radiador un adaptador que desvía el flujo mediante su geometría curva y unos ventiladores colocados en el interior de su estructura que provocan convección forzada. Estos ventiladores son de muy baja potencia (1-3W) por lo que su consumo y ruido son prácticamente inapreciables.



Fig. 35. Producto Radfan para instalación en radiadores.

Según se comenta en un foro [91], se han realizado las pruebas de campo, controladas e independientes, por la Energy House de la Universidad de Salford con 10 asociaciones de viviendas para estimar el impacto en el comportamiento. Únicamente se ha encontrado un documento de carácter publicitario [92] que hace referencia, sin mayor detalle, a la realización de unos ensayos por parte del departamento de edificación y eficiencia energética de la Universidad de Salford en el Energy House, pero no se ha encontrado ninguna publicación en revista científica sobre el dispositivo Radfan. Comentan en dicho documento que han usado sensores para tomar datos de la temperatura de la superficie del radiador, la temperatura del aire a varios puntos de la habitación, mediciones de flujo de calor, consumo de gas y el consumo eléctrico de los dispositivos Radfan. Tras los cuales han obtenido como resultado una reducción de la estratificación térmica reducida en 2,5 °C, una reducción del consumo de gas en toda la casa, ahorrando cerca de 30 libras esterlinas al año de la factura del gas y 1,85 toneladas de CO₂ durante la vida útil del dispositivo.

Indican también [91] que reduce la pérdida de calor a través de la ventana en aproximadamente un 35% al desviar un poco el flujo de aire de la ventana y con respecto a la estratificación de la habitación comentan que han observado diferencias de temperatura de 10 grados centígrados entre el suelo y el techo, pero la típica es de alrededor de 4/5 grados centígrados.



Fig. 36. Imagen térmica radiador con y sin dispositivo Radfan

Termik

La empresa checa C.E.L. Šumperk comercializa el dispositivo Termik [93]. Comenta que debido a la mayor eficiencia del radiador es posible reducir la temperatura del circuito de calefacción hasta 20 °C, acortando el calor inicial de la habitación hasta una quinta parte del tiempo normalmente requerido como muestra la Fig. 38 y por lo tanto el consumo de energía de calefacción.



Fig. 37. Dispositivo Termik de la empresa CEL Sumperk

Comentan también, siempre a nivel publicitario, que el tiempo para subir 1°C una habitación de 40m³ pasa de 1 hora a 10 minutos, pero no arrojan información sobre la eficiencia ni presentan datos avalados por entidades independientes.

The time required for heating with Termik and without Termik

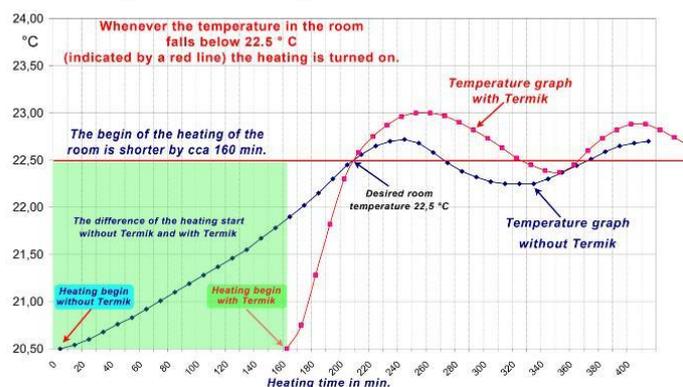


Fig. 38 Reducción del tiempo de calentamiento requerido con Termik



En la tesis doctoral de Myhren [94] en School of Architecture and the Built Environment de la Royal Institute of Technology de Suecia, se estudian los sistemas de calefacción de baja temperatura, proponía el calentamiento directo del aire de ventilación en lugar de emplear por separado los sistemas de calefacción y ventilación mediante radiadores ventilados debido a su potencial como sistema de bajo consumo de energía, fácil de operar y respetuoso con el medio ambiente, que también puede garantizar la salud y el bienestar de los ocupantes.

El autor concluye que los radiadores de ventilación son más eficientes térmicamente que los radiadores tradicionales. Concluye también que pueden sustituirse los ventiladores tradicionales por los de ventilación y mantener las condiciones de confort con una reducción de temperatura de 55°C a 35°C (con una temperatura exterior de -15 °C) con la misma producción de calor. Esta reducción de 20°C en la temperatura del agua de alimentación según el autor podría suponer un ahorro de energía combinado para calefacción y ventilación del 14-30 % en un sistema que utilice una bomba de calor.

Finalmente, el autor recoge los resultados finales del estudio en una tabla comparativa que evalúa los aspectos más importantes de confort térmico y eficiencia energética de los diferentes sistemas.

Tabla 12. Comparativa entre el rendimiento en cuanto a confort térmico y eficiencia para las distintas unidades terminales [94]

Performance criteria	Floor Heating	Wall Heating	Medium temperature radiator	Ventilation Radiator A	Ventilation Radiator B	Improved ventilation radiator
<i>Thermal Comfort</i>						
Cold draught hazard	--	---	0	++	+	+++
Vertical temp. difference	+++	--	+	++	++	+++
Air fluctuations	++	++	+	-	--	--
Radiant heat share	+++	+++	+	--	--	---
<i>Energy aspects</i>						
Water temperature level	+++	+++	+	++	+	++
Transmission heat losses	--	-	0	0	0	0
Thermal response	---	---	-	++	+++	+++
Pump work	---	---	0	0	0	0
Operative temperature	++	+++	+	--	---	---
Cooling possibilities	+	++	0	0	0	+

Los resultados sitúan a los sistemas de suelo radiante como la mejor opción en cuanto a confort térmico, mientras que el radiador ventilado con las mejoras implementadas ofrece el mejor rendimiento en aspectos energéticos. Cabe destacar que los radiadores de media temperatura están igual de equilibrados que los dos sistemas anteriores, con un balance positivo de 4. Por lo tanto, puede decirse que las tres opciones son válidas, y la decisión de decantarse por uno o por otro tendría que ser provocada por otros factores como el coste de la instalación o la facilidad de la misma.

2.5.3.- Sistemas termoeléctricos con ayuda a la ventilación

En la BRNO University of Technology han intentado alimentar un ventilador aprovechando la energía térmica directamente de la superficie del radiador con celular Peltier [95]. Un concepto que apunta en la línea de investigación de esta tesis, pero que cuenta con varios elementos diferenciales en su planteamiento.

- No todo el calor que se transfiere a la habitación ha sido calor útil que atraviesa las células Peltier, lo que limita la energía eléctrica generada en su utilización diaria y por tanto el flujo de aire total provocado, lo que deriva en una reducción de ahorro percibido.
- La temperatura máxima de la superficie de los radiadores está limitada por normativa por cuestiones de seguridad. Por lo que se limita la ΔT conseguible y por tanto su eficiencia y su potencia generada.
- Tampoco cuenta entre sus conclusiones con información relativa a la mejora de eficiencia alcanzada.

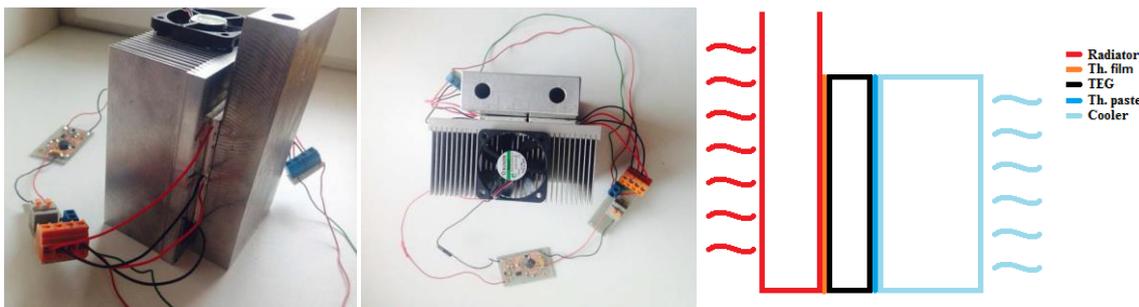


Fig. 39. Esquema y maqueta de elemento radiante termoeléctrico de la BRNO University of Technology

Champier realiza una extensa revisión de las aplicaciones de la termoelectricidad en diversos ámbitos [53] y entre ellos los generadores termoeléctricos (TEG) domésticos en los países desarrollados, de los que desataca tres actividades para mejorar la eficiencia de las estufas que se resumen a continuación.

Ecofan [96] vende ventiladores térmicos para calentadores de estufa. El flujo de aire creado por el ventilador distribuye el aire caliente de la estufa de manera más uniforme en la habitación. Según Ecofan [97], el uso de un ventilador Ecofan 800 durante el funcionamiento de la estufa de leña proporciona un ahorro medio de combustible del 14% en una serie de condiciones de prueba estándar estudiadas, manteniendo al mismo tiempo los niveles de confort del usuario durante períodos prolongados.

Zheng [98] presentó un sistema doméstico combinando una caldera de gas y un concentrador solar con dos bloques TEG. El agua caliente sanitaria se precalienta en el lado frío de las unidades TEG y el calor es suministrado por el gas caliente de la caldera o por el aceite caliente del TEG.

Codecasa [99] por otro lado, investiga la adición de generadores termoeléctricos a los calentadores de gas. El primer TEG fue probado en un calentador de gas autónomo de radiación térmica para ambientes comerciales al aire libre [100] [101] y obteniendo una potencia de 8 W. Se ha desarrollado otro prototipo para unidades radiantes de calor por combustión de gas (estufas de exterior) utilizadas en entornos residenciales e industriales [99]. Estos calentadores funcionan de forma autónoma con una alimentación de gas local. El uso de un ventilador para forzar el paso del aire a través del intercambiador de calor puede aumentar el confort, reducir la estratificación de la temperatura y mejorar la eficiencia de la calefacción. El TEG puede permitir la producción local de energía eléctrica para alimentar el ventilador sin necesidad de ninguna conexión a la red eléctrica.



2.6.- Estudio de patentes en sistemas de calefacción termoeléctricos

En esta tarea, se ha llevado a cabo una búsqueda de patentes enfocada en los siguientes puntos:

- Fan-Coils donde el ventilador es alimentado con sistemas termoeléctricos sin necesidad de conexión eléctrica a la red.
- Fan-Coils donde el ventilador es alimentado con otros sistemas como, por ejemplo, sistemas Stirling (también sin necesidad de conexión eléctrica).

La búsqueda se ha centrado en el empleo de ventiladores para distribuir el calor en la estancia correspondiente. Se han identificado algunos documentos relevantes, que se resumen en los siguientes apartados.

2.6.1.- Ventiladores con sistemas termoeléctricos:

La búsqueda se ha enfocado en radiadores donde se aplica el concepto de termoelectricidad para provocar que el calor se distribuya por la estancia (preferentemente mediante ventiladores). De los resultados localizados es destacable el documento de patente WO2016030773A1 [102], en el que se divulga un dispositivo (kit) para distribuir el calor en la estancia, y puede emplearse para actualizar radiadores u otro tipo de fuentes de calor. En el kit se emplean ventiladores para distribuir el calor en la estancia que en este caso puede ser activado mediante un controlador. Para alimentarlos deja abierta la posibilidad de que se pueda emplear la termoelectricidad, aunque sin entrar en mayor detalle.

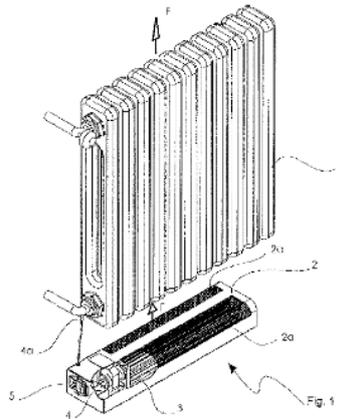


Fig. 40. Sistema del documento de patente WO2016030773A1

Tras analizar estos resultados, se considera que el nuevo concepto que se pretende desarrollar ya está anticipado al menos por este documento. En todo caso, lo que podría ser patentable es la posible configuración específica que se desarrollase, pero a la vista de este documento, se considera que, a priori, sólo desarrollos muy concretos resultantes de este proyecto podrían ser susceptibles de ser protegidos.

2.6.2.- Ventiladores con sistemas Stirling

A pesar de que el proyecto no se centra en este tipo de tecnología, se ha considerado interesante ampliar el análisis a este ámbito, por si pudieran salir resultados aprovechables de cara a la consecución de los objetivos del proyecto.

En este caso, la búsqueda se ha enfocado en radiadores donde se aplica el concepto de Stirling para provocar que el calor se distribuya por la estancia (preferentemente mediante ventiladores). De los resultados localizados se ha seleccionado el documento de patente US4369626 [103] como el más relevante.

En este documento de patente hace referencia a un sistema auto-alimentado para distribuir aire caliente en una estancia, mediante Stirling y se enfatiza además en la no necesidad de electricidad externa (sin enchufes). El Stirling aprovecha el calor proveniente de un *fireplace* (chimenea), pero indica que también se pueden emplear otros tipos de fuentes de calor. Aunque no lo indica expresamente, se considera que un radiador entraría dentro de “otros tipos de fuente de calor”, puesto que se centra en fuentes de calor para calentar estancias. Parece que en principio se centra más en fuentes de calor con fuego, pero se considera que la defensa de que “un radiador es diferente” es muy débil. El sistema que se divulga en este documento puede ser un kit, cuya configuración dependerá además del dispositivo al que se asocie.

Por estas razones, se considera que presentar “un radiador tipo Fan-Coil con Stirling” no sería patentable como tal, aunque la configuración específica del mismo sí pudiera serlo. En tal caso, sería necesario analizar si cumple los requisitos de novedad y actividad inventiva.

2.7.- Conclusiones y análisis crítico del estado del arte

2.7.1.- Resumen breve del estado del arte y ventajas del sistema propuesto

En la actualidad los equipos ventiloconvectores requieren de una fuente de alimentación de energía eléctrica para alimentar al ventilador y a la bomba de recirculación del sistema. Esto obliga a que su instalación dependa de la cercanía a una fuente eléctrica.

Por su parte, en comparación con los otros sistemas de calefacción tradicionales, los radiadores, la principal ventaja que presenta la nueva propuesta es la transferencia de calor mediante convección forzada. A diferencia de los radiadores tradicionales donde la transferencia de calor se realiza por convección natural, la propuesta de la tesis mediante el desarrollo y fabricación de ventiloconvectores termoeléctricos, realiza la transferencia de calor por convección forzada mediante un ventilador alimentado por termoelectricidad, lo que no requiere de conexión a la red eléctrica.

El hecho de forzar el proceso de transferencia de calor, reduciendo el tiempo de homogeneización de la temperatura ambiente, resulta en un tiempo de funcionamiento más corto de la caldera o bomba de calor y, por lo tanto, en un aumento de la eficiencia global del sistema de calefacción [88],[86],[89]. En otras palabras, si se mantiene el tiempo de homogeneización, la temperatura del agua requerida será menor, con la consiguiente reducción del consumo de energía. Codecasa [104] afirma que el uso de un convector de ventilador para forzar el paso del aire a través del intercambiador de calor puede aumentar el confort, restablecer la estratificación de la temperatura y mejorar la eficiencia de la calefacción del 85 al 91%. La posibilidad de calefactar a partir de temperaturas de fluido menores permitiría, además, la entrada de equipos con clara vocación de eficiencia energética y renovable como es la bomba de calor.

En el estudio del estado del arte realizado se ha identificado un interesante nicho de mercado, ya que no se han encontrado sistemas de calefacción que traten de combinar las ventajas de las dos tecnologías de calefacción utilizadas tradicionalmente, los radiadores y los ventiloconvectores, y que sean directamente instalables en un sistema de calefacción doméstica que sustituya a los radiadores convencionales. A pesar de ello resulta muy significativo que las



mejoras de eficiencia de los ventilosconectores arrojan una mejora de la eficiencia energética que puede alcanzar el 30%, lo que permite ser optimista en los objetivos que se establecen en el proyecto. RadFan [90] y Radiator Booster [105] son aparatos innovadores que redireccionan el calor y lo expulsan hacia la habitación para mejorar la homogeneización de la temperatura ambiente. Pero ambos necesitan una fuente de alimentación para alimentar un ventilador. Codecasa [104] integra un cogenerador TEG en una estufa de gas natural portable (estufa de exterior), sin embargo, no ha sido concebido para sustituir a los radiadores convencionales. Por ello, el foco de este trabajo, centrado en el desarrollo de un nuevo concepto de dispositivo de calefacción, un VC-TE aislado para aplicaciones domésticas que sustituye al radiador convencional (Fig. 15), se considera novedoso con respecto al estado del arte.

En el estado del arte realizado, también se han identificado distintos tipos de materiales para la fabricación de los módulos termoeléctricos. Su uso dependerá de las temperaturas de funcionamiento del dispositivo. Teniendo esto en cuenta, se considera que la opción más acertada para este caso sería el uso de telururo de antimonio y telururo de bismuto para los materiales termoeléctricos tipo P y tipo N respectivamente, aunque los materiales óxidos pueden ser una opción prometedora.

Por otro lado, se ha observado que los sistemas de generación basados en tecnología termoeléctrica disponibles en el mercado están optimizados para temperaturas superiores a las que generalmente se tienen en el agua del circuito de calefacción de una vivienda. Por ello, en este proyecto se deberá diseñar un sistema termoeléctrico ad-hoc cuyo rendimiento sea óptimo para unas temperaturas de trabajo cercanas a los 60-80°C, temperatura que puede alcanzar el agua del circuito de calefacción.

En este trabajo se presenta un nuevo dispositivo de calentamiento basado en la termoelectricidad, que combina las ventajas de los radiadores y de los ventilosconectores. Este nuevo sistema aprovecha el calor procedente del sistema de calefacción para generar electricidad, que se consume in situ para alimentar un ventilador, eliminando la necesidad de una toma de corriente cercana. Montecucco et al. [106] consideran este tipo de sistemas, donde todo el calor que fluye a través de ellos se utiliza para fines domésticos, 100% eficientes, a pesar de la baja eficiencia de los generadores termoeléctricos.

2.7.2.- Conclusiones del estado del arte

De la revisión del estado del arte llevada a cabo se extraen las siguientes conclusiones:

- 1) Se identifican materiales termoeléctricos susceptibles de ser aplicados en el rango de las temperaturas de trabajo de los radiadores y ventilosconectores (telururo de bismuto) y otros (óxido) por gran potencial que cuyo interés para futuro viene avalado por sus buenas características, más allá de la eficiencia (cumplimiento de normativas, abundancia, coste, ...).
- 2) Existe una amplia oferta de módulos termométricos cuya geometría tiene gran potencial de acomodación a la solución propuesta, así como un coste no limitante tanto para la experimentación como para ofrecer un producto competitivo en comparación con el coste de radiadores y ventilosconectores.
- 3) La práctica totalidad de los generadores termoeléctricos identificados utilizan gas como fuente energética y no están orientados a la recuperación de calor residual. Utilizan materiales que por lo general no cumplen la normativa RoHS por lo que son totalmente inviables en su aplicación en entorno doméstico. Thermonamic [71] es la única excepción identificada con un dispositivo de generación que aprovecha el calor de un fluido (agua) con

validez en el rango que interesa a esta tesis. Si bien su coste la convierte en una solución de difícil encaje, y su diseño además de mantener oculto el diseño no se adapta a las geometrías necesarias, puede ser un punto de partida interesante para la validación del modelo computacional.

- 4) Entre sistemas termoeléctricos comerciales analizados, salvo el mencionado de Thermonamic, los de intercambio líquido-líquido están diseñados para trabajar en modo refrigeración y sus temperaturas de trabajo suelen ser inferiores a las necesarias para la aplicación de generación (<85°C).
- 5) Otros sistemas alternativos aportan características que podrían competir en prestaciones con la termoelectricidad. De ellas la tecnología Stirling merece una mención especial siempre que pudieran contenerse los costes. El hecho de no requerir materiales especiales para trabajar a alta temperatura permite contemplar la opción de trabajar con materiales más económicos, como el plástico, y proceso de bajo coste, para el rango de temperaturas de trabajo del circuito de calefacción.
- 6) Se ha encontrado información comercial relativa a la mejora de la eficiencia de los ventiloconvectores frente a los radiadores. Esta información que apunta a un 30% de mejora (muy extendido y similar el dato), no viene avalada por ningún estudio o publicación que se haya identificado. Tampoco se explicita cómo afecta al cálculo de esa mejora el consumo extra en electricidad que los ventiloconvectores requieren para funcionar y del que los radiadores están exentos.
- 7) Se han identificado sistemas alternativos basados en aplicar ventilación a radiadores convencionales (RadFan, Termik) que apuntan datos distintos de mejora de eficiencia y adolecen, al igual que los ventiloconvectores, del inconveniente de requerir conexión eléctrica además de carecer de evaluaciones independientes que avalen las informaciones de eficiencias.
- 8) Se identifican trabajos tanto teóricos como experimentales en el estado del arte donde los resultados obtenidos en sistemas termoeléctricos con ayuda a la ventilación ponen de manifiesto tanto que existe una comunidad científica cuya investigación versa en torno a esta temática como que la propuesta de la presente tesis ha sido escasamente estudiada.
- 9) Existe potencial para la protección de algunos de los desarrollos y conceptos si bien la idea general puede considerarse anticipada por alguna de las patentes referencias.



CAPÍTULO 3 ARQUITECTURA Y MODELIZADO DEL SISTEMA TERMOELÉCTRICO



3.1.- Introducción

El Capítulo 3 se centra en el estudio de sistema termoeléctrico que compone la pieza diferencial del ventiloincubador y el elemento fundamental del análisis de la tesis. Se inicia el capítulo definiendo el marco teórico y modelo numérico de computación que se aplicará a resoluciones en capítulos posteriores, para pasar a diseñar y desarrollar el sistema completo basándose en un modelo analítico y una versión de este modelo analítico corregido sobre el que se realizan los cálculos. Finalmente se plantea una versión del modelo analítico completo del sistema de generación termoeléctrico y una simplificación de este. El modelo analítico simplificado se valida experimentalmente mediante la construcción del sistema TEG y su ensayo.

3.2.- Marco teórico y modelización de un módulo termoeléctrico

Centro Stirling tiene una dilatada experiencia en el desarrollo de proyecto de termoelectricidad por lo que el modelo teórico que se ha desarrollado será un activo de gran utilidad más allá de la presente tesis, y se espera que suponga un elemento diferencial y que complemente el valor percibido de las competencias y capacidades.

Este apartado se centra en el modelo teórico desarrollado. La simulación el comportamiento de los módulos TEG se desarrolla mediante un modelo transitorio de generador termoeléctrico, utilizando como herramienta computacional MATLAB.

A la par, que, para el desarrollo del modelo, se aprovecha el potencial de MATLAB para generar un entorno amigable de interacción con el mismo mediante una interfaz gráfica de usuario, el cual, por carecer de aportación científica se muestra únicamente en el ANEXO B para mostrar el alcance del desarrollo realizado.

3.2.1.- Estado del arte de los modelos

3.2.1.1.- Modelos analíticos existentes.

Las investigaciones de la literatura que se muestran han sido principalmente identificadas en el detallado análisis que Andreas realiza en su tesis doctoral [107] sobre modelizado de dispositivos termoeléctricos. Las investigaciones que se mencionan se centran en el modelado analítico de sistemas termoeléctricos individuales o múltiples para la generación de energía termoeléctrica, y proporcionaron algunas directrices importantes para el diseño de las instalaciones termoeléctricas.

Wu [108] explicó que el rendimiento de un generador termoeléctrico está influenciado tanto por irreversibilidad interna como externa. En su teoría analiza los generadores termoeléctricos de calor residual donde la irreversibilidad interna está causada por las pérdidas óhmicas y la transferencia de calor por conducción, y la irreversibilidad externa está causada por las diferencias de temperatura entre las uniones frías y calientes, y la fuente y el disipador de calor en un generador termoeléctrico real. Desarrolló un modelo analítico con una capacidad de predicción de la eficiencia y la potencia eléctrica más realista que la del generador termoeléctrico ideal.

Rowe y Min [109] encontraron una aproximación útil para los valores de potencia generada y eficiencia, teniendo en cuenta efectos de contacto térmico y eléctrico en condiciones isotérmicas en los lados caliente y frío del módulo. Concluyeron que los dispositivos termoeléctricos tienen potencial como dispositivos para la recuperación de calor residual a baja temperatura.



Chen et al. [110] analizaron el rendimiento de un generador termoeléctrico de múltiples pares con irreversibilidad interna y externa, estableciendo el rango óptimo de los parámetros de diseño y discutiendo los problemas asociados con la máxima potencia de salida y la máxima eficiencia. Stevens [111] desarrolló un procedimiento para el diseño de un sistema termoeléctrico utilizando pequeñas diferencias de temperatura. Para una resistencia térmica fija en los intercambiadores de calor, la configuración óptima divide la caída de temperatura total por igual entre los módulos termoeléctricos y los intercambiadores de calor.

Chen et al. [112] estudiaron la influencia de la transferencia de calor y el número de elementos en el rendimiento de un generador termoeléctrico de múltiples pares.

3.2.1.2.- Modelos numéricos existentes

Las investigaciones de la literatura que se muestran han sido principalmente identificadas utilizando la misma fuente que el apartado anterior.

En la práctica, un generador termoeléctrico combina siempre módulos termoeléctricos con intercambiadores de calor en instalaciones a gran escala para producir cantidades útiles de electricidad a partir de fuentes de calor de baja calidad [113].

Suzuki y Tanaka [114] estudió la generación termoeléctrica con una superficie plana a gran escala de módulos termoeléctricos expuestos a dos fluidos térmicos. La energía eléctrica era estimada y las potencias de salida de los 15 sistemas propuestos fueron deducidas analíticamente de la teoría de la transferencia de calor, y descritas por funciones no-dimensionales.

Crane y Jackson [115] investigaron generadores termoeléctricos con intercambiadores avanzados de calor para la recuperación de calor residual. Crearon y validaron modelos de intercambiadores de calor numéricos integrados con modelos para módulos termoeléctricos Bi_2Te_3 .

En general, en el caso del generador termoeléctrico que implica diferentes tipos de intercambiadores de calor, el problema de la transferencia de calor a través de un intercambiador de calor y la conversión de energía térmica se complejiza [113]. El análisis numérico proporciona un enfoque eficaz para evaluar el rendimiento de los generadores termoeléctricos. Las aproximaciones numéricas pueden ofrecer información mucho más detallada que los métodos analíticos [113].

3.2.1.3.- Conclusiones

De cara a analizar el comportamiento del generador termoeléctrico, el modelo numérico resulta más interesante. Permite adaptarse a geometrías inusuales como las que se plantean en el capítulo 6 (Unileg metalizada) y hacerlo unidimensionalmente, permitiendo desarrollos en entornos como MATLAB frente a herramientas de simulación CFD, lo que mejora la rapidez de computación y hace más accesible la interacción con el modelo a perfiles variados de la empresa. El modelo que se planteará será una herramienta en constante evolución para el desarrollo de proyectos de Centro Stirling en el entorno de la termoelectricidad.

Los modelos numéricos explícitos pueden suponer mayor rapidez de desarrollo y simplificación de la programación frente a los implícitos, pero adolecen de una potencial falta de convergencia.

3.2.2.- Modelo numérico teórico

3.2.2.1.- Definición de las ecuaciones del sistema

3.2.2.1.1.- Análisis térmico

El sistema en estudio está formado por seis materiales diferentes por los cuales el calor se transmite por conducción, debido a las entradas y salidas establecidas de flujo térmico.

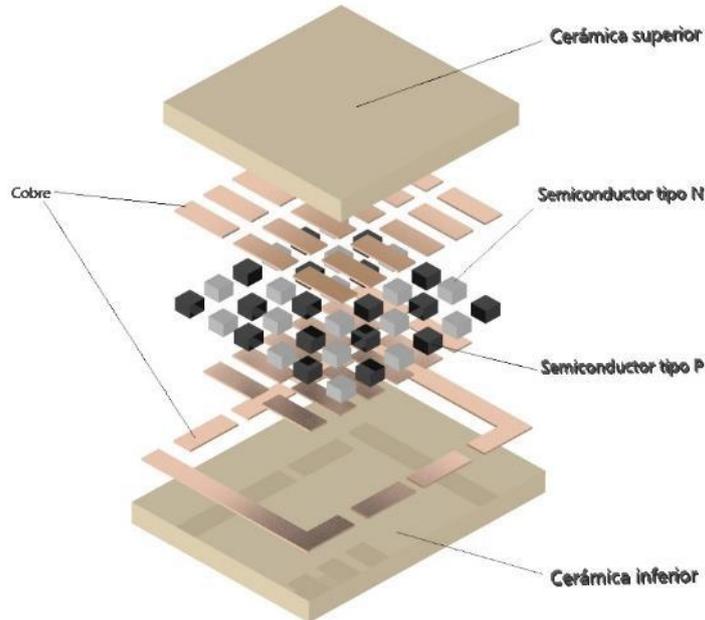


Fig. 41. Componentes del generador termoeléctrico a resolver

De acuerdo a la teoría de la conducción [53], [116] la ecuación en estado transitorio para un sistema no termoeléctrico puede expresarse de la siguiente manera:

$$C_{pi}\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(\kappa_i \nabla T_i), \quad i = 1, \dots, \text{nodos} \quad (23)$$

Siendo la expresión de su ecuación de estado transitorio unidimensional:

$$C_{pi}\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{d}{dx} \left(\kappa_i \frac{dT_i}{dx} \right), \quad i = 1, \dots, \text{nodos} \quad (24)$$

Donde C_{pi} , ρ_i , T_i , κ_i y t son la capacidad calorífica del material, la densidad del material, la temperatura del material, la conductividad térmica del material y el tiempo. El subíndice i indica el nodo analizado.

La ecuación de conducción para los semiconductores N y P contiene la generación interna de calor debido a los efectos Joule, Peltier y Thomson:

$$C_{pi}\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(\kappa_i \nabla T_i) + \rho_i J^2 - T_{ij} \left(\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T_i + (\nabla \alpha)_T \right), \quad i = 1: \text{nodos} \quad (25)$$

Donde el segundo término de la derecha es el calor producido por el paso de corriente (efecto Joule), y el tercer término corresponde al calentamiento y enfriamiento debido al efecto Thomson-Peltier.

Para el análisis en el nodo de intersección entre materiales, se tiene que:

$$\left(\frac{\Delta x_{iA}}{2} A_{iA} C_{piA} \rho_{iA} + \frac{\Delta x_{iB}}{2} A_{iB} C_{piB} \rho_{iB} \right) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(\kappa_i \nabla T_i), \quad i = 1, \dots, \text{nodos} \quad (26)$$



3.2.2.1.2.- Análisis Eléctrico

Para realizar el análisis eléctrico, es necesario conocer la distribución de temperaturas en los nodos del sistema. Con ello se calcula la tensión total producida por el efecto Seebeck y el valor de las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura.

Se hace la suposición de que el análisis eléctrico se realiza para el estado estacionario de modo que la tensión no varía con el tiempo y depende únicamente del perfil de temperaturas.

La ecuación que gobierna el sistema eléctrico en el estado estacionario puede expresarse de la siguiente manera.

$$\nabla J = 0 \quad (27)$$

$$\nabla V_i = -\alpha_i \nabla T_i - \rho_i J \quad i = 1, \dots, \text{nodos termoelectricos} \quad (28)$$

Donde el primer término de la derecha es la fuerza electromotriz generada por el efecto Seebeck y el segundo término la caída de tensión debido al paso de corriente en el volumen de control.

La ecuación que gobierna el sistema eléctrico en el estado estacionario **unidimensional** puede expresarse de la siguiente manera.

$$\frac{\partial J}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x_i} = -\alpha_i \frac{\partial T_i}{\partial x} - \rho_i J \quad i = 1, \dots, \text{nodos termoelectricos} \quad (30)$$

3.2.2.1.3.- Discretización de las ecuaciones

Las ecuaciones que gobiernan el sistema son EDPs de primer y segundo orden. Por ello, para discretizar dichas ecuaciones, se aplicará un método de aproximación en diferencias finitas.

Aproximación diferencial central de primer orden:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x_i} = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta x_i}, \quad \phi = T, V, \alpha \quad (31)$$

Aproximación diferencial de segundo orden:

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_{x_i} = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta x_i^2}, \quad \phi = T, V \quad (32)$$

Aproximación diferencial de la derivada del tiempo por diferencia directa:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{t_{m+1}, x_i} = \frac{\phi_i^{m+1} - \phi_i^m}{\Delta t}, \quad \phi = T, V \quad (33)$$

3.2.2.1.4.- Condiciones de frontera.

En el presente análisis se introducirán dos tipos de condiciones de frontera, las llamadas condiciones de frontera Dirichlet y condiciones de frontera Neumann.

Una condición de frontera Dirichlet, significa imponer el valor de la temperatura en un borde del dominio unidimensional, es decir, fijar el valor de la temperatura para la solución en dicho borde.

Por otro lado, la condición de frontera Neumann significa imponer el flujo de calor con el que se calienta o enfría el borde deseado. Por ejemplo, si la condición de frontera Neumann es 0 para el borde, significa que el borde está perfectamente aislado y por tanto no entra ni sale calor de él.

3.2.2.1.4.1 Condición de frontera Dirichlet.

Una condición de frontera Dirichlet fija a uno o ambos bordes del sistema con una temperatura (análisis térmico) o tensión (análisis eléctrico) invariable.

$$T(x = 0, t) = T_{left} \quad (34)$$

$$T(x = L, t) = T_{right} \quad (35)$$

$$V = V_o \quad (36)$$

3.2.2.1.4.2 Condición de Neumann.

La condición de frontera Neumann especifica la entrada o salida de un flujo térmico (análisis térmico) o eléctrico (análisis eléctrico) en los bordes del sistema.

Para el sistema eléctrico:

$$J = J_o \quad (37)$$

3.2.2.1.5.- Ecuación general de transferencia de calor

Para plantear la ecuación general de transferencia de calor con condición de frontera Neumann para el sistema térmico, se parte de la ecuación del balance energético.

El balance energético puede representarse como:

$$\sum_{\text{Todos los lados}} \dot{Q}^{m+1} + \dot{E}_{gen,elemento}^{m+1} = \rho V_{elemento} C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (38)$$

Donde la energía que atraviesa por conducción el elemento de control, más la energía generada en el elemento de control es igual a la variación de la energía interna dentro del elemento de control.

Aplicando la discretización correspondiente:

$$\kappa A \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x} + \kappa A \frac{T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x} + \dot{\theta} A \Delta x = \rho V_{elemento} C_p \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \quad (39)$$

Entrada o salida de calor por el extremo derecho:

$$Q_{derecha} A + \kappa A \frac{T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x} + \dot{\theta} A \Delta x = \rho \frac{V_{elemento}}{2} C_p \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \quad (40)$$

Entrada o salida de calor por el extremo izquierdo:

$$\kappa A \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x} + Q_{izquierda} A + \dot{\theta} A \Delta x = \rho \frac{V_{elemento}}{2} C_p \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \quad (41)$$

3.2.3.- Modelización del comportamiento termoeléctrico.

3.2.3.1.- Metodología implícita unidimensional de un sistema bidimensional.

Dado que la distribución de la temperatura y la distribución del potencial eléctrico del sistema están gobernados por ecuaciones diferenciales parciales y las condiciones de frontera establecidas pueden ser funciones complejas dependientes de la temperatura y de la posición, es complicado obtener una solución exacta del sistema.

Para solucionar dicho sistema se recurren a métodos numéricos para generar una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan el sistema. Existen varios métodos que pueden ser utilizados para generar una solución en régimen transitorio. Dichos métodos incluyen métodos



explícitos, implícitos o incluso métodos híbridos que combinan los dos anteriores como el método de Crank-Nicolson [117]

Los métodos explícitos son sencillos de derivar y de programar, sin embargo, presentan inestabilidades en la solución, por lo que imponen un límite sobre el intervalo de tiempo admisible. En cuanto a los métodos implícitos, presentan una mayor exactitud en los resultados obtenidos, pero resultan más complejos de programar ya que requiere que las temperaturas nodales del sistema se resuelvan de forma simultánea. Estos métodos son incondicionalmente estables para EDPs lineales, lo que significa que no imponen limitación alguna sobre el intervalo de tiempo admisible. Esto hace que los métodos implícitos converjan más rápido que los explícitos. La complejidad del método implícito se limita a su aplicación en casos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales u otros sistemas de coordenadas.

Para describir el método implícito utilizado para obtener las soluciones a las ecuaciones, se considera un módulo generador termoeléctrico compuesto de dos materiales cerámicos, $2n$ pares de conductores y n pares de materiales semiconductores tipo p y n, cada uno de ellos con sus dimensiones y propiedades térmicas y eléctricas. Los pasos para resolver el sistema son:

- 1) Discretizar el dominio.
- 2) Discretizar las EDPs: Reemplazar las EDP por ecuaciones algebraicas.
- 3) Especificar el algoritmo para la solución.



Fig. 42. Módulo termoeléctrico completo

Cada uno de los pasos se describe a continuación.

Para el análisis térmico, se simplificará el problema de tal forma que se estudiará y analizará un único par termoeléctrico del elemento en cuestión. De este modo se simplifica el análisis a un elemento que estará compuesto por únicamente seis volúmenes que podrían representar hasta 6 materiales distintos.

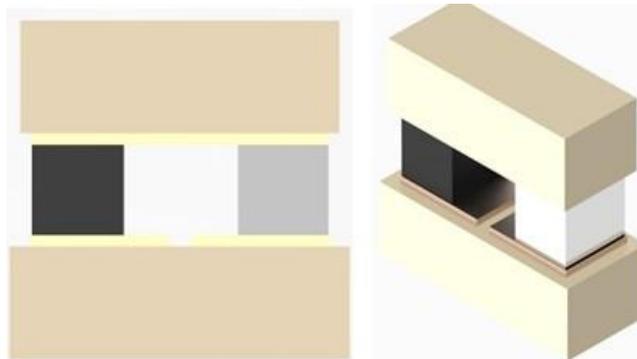


Fig. 43. Simplificación adoptada del módulo termoeléctrico

A la hora de plantear el análisis en estado transitorio unidimensional aparece una dificultad importante. Debido a la geometría del sistema simplificado, cuando se aplique un flujo de calor, el calor será conducido a través de la superficie cerámica y los conductores de cobre. Sin embargo, cuando el calor atraviese todo el material de cobre, se topará con dos caminos posible para fluir; el material semiconductor y el medio aislante eléctrico. Aparece por tanto un problema bidimensional que no se puede solucionar sin adecuar las ecuaciones que gobiernan el sistema al sistema bidimensional. Para ello se plantea un método que reduce el problema bidimensional a uno unidimensional.

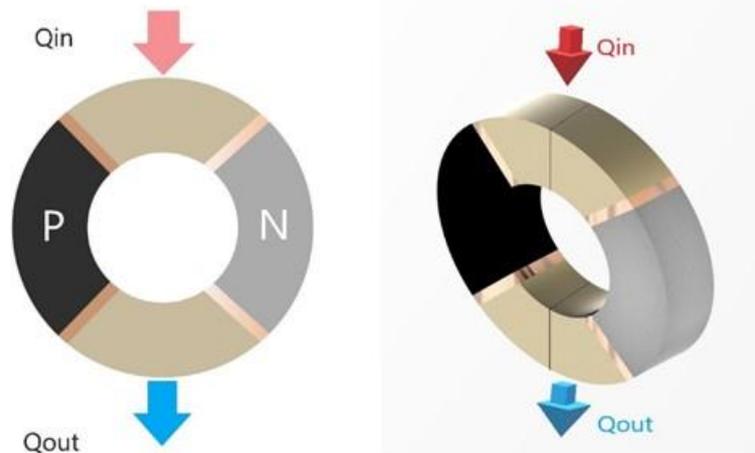


Fig. 44. Transformación del sistema bidimensional a unidimensional

Se tratará el sistema como un único vector unidimensional con las zonas que se identifican en la Fig. 45 en la que el flujo de calor entra por ambos extremos y sale por la zona central.

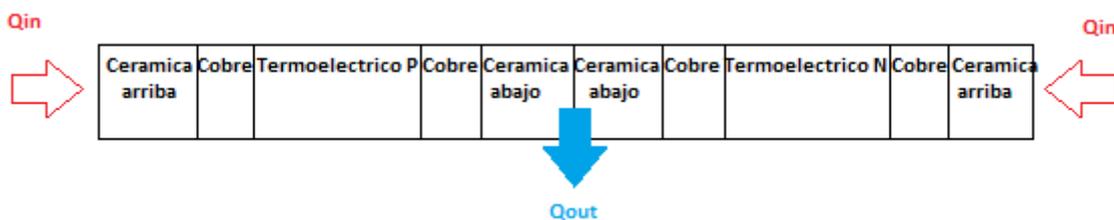


Fig. 45. Modelo de transferencia térmica unidimensional del TEG

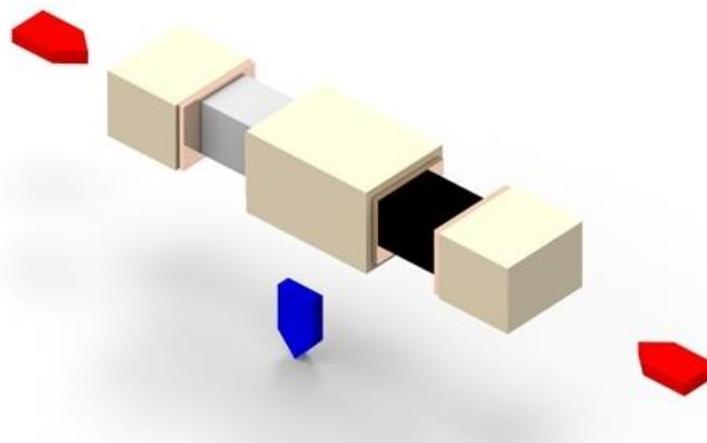


Fig. 46. Representación gráfica del modelo de transferencia térmica unidimensional.

3.2.3.1.1.- Discretización del dominio

En el presente estudio, el dominio del problema es discretizado dividiendo las longitudes de cada uno de los elementos por el número de nodos deseados para cada elemento. Con esta división se crean celdas con igual distribución en cada uno de los materiales. Esta metodología da libertad, si se desea, para añadir mayor precisión de cálculo a una zona concreta ya que el número de nodos analizados puede ser mayor.

$$\Delta x_i = \frac{L_i}{\text{nodos}_i}, \quad i = 1,2,3,4,5 \quad (42)$$

Siendo Δx_i el espaciado entre nodos, L_i la longitud del material i y nodos_i el numero de nodos deseados en dicha longitud.

El volumen para cada nodo presente.

$$v_i = \text{Area}_i * L_i \quad (43)$$

3.2.3.1.2.- Discretización de las EDPs:

El siguiente paso consiste en reemplazar las EDPs por ecuaciones algebraicas y para obtener dichas ecuaciones algebraicas, se aplica el método de diferencias finitas.



Fig. 47. Relación entre problemas continuos y discretos

La ecuación que gobierna la distribución térmica de los nodos internos en los materiales no termoeléctricos es:

$$\begin{aligned} \Delta x_i A_i C_{pi} \rho_i \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \\ = \kappa_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x_i} A_i + \kappa_{i-\frac{1}{2}}^{m+1} \frac{T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x_i} A_i + \theta \Delta x_i A_i \end{aligned} \quad (44)$$

$$\kappa_{i\pm\frac{1}{2}}^{m+1} = \frac{\kappa_{i\pm 1}^{m+1} + \kappa_i^{m+1}}{2} \quad (45)$$

Donde $\kappa_{i\pm\frac{1}{2}}^{m+1}$ es la conductividad térmica entre nodos dependiente de la temperatura.

Para el análisis en las intersecciones entre dos materiales, la ecuación (44) es modificada de forma que contenga a ambos materiales. Obteniendo una ecuación válida tanto para los nodos como para las intersecciones entre materiales no termoeléctricos.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta x_{iA}}{2} A_{iA} C_{piA} \rho_{iA} + \frac{\Delta x_{iB}}{2} A_{iB} C_{piB} \rho_{iB} \right) \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} \\ = \kappa_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x_{iB}^2} \Delta x_{iB} A_{iB} + \kappa_{i-\frac{1}{2}}^{m+1} \frac{T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x_{iA}^2} \Delta x_{iA} A_{iA} \\ + \theta \frac{\Delta x_{iB}}{2} A_{iB} + \theta \frac{\Delta x_{iA}}{2} A_{iA} \end{aligned} \quad (46)$$

Donde Δx_{iA} , A_{iA} , $C_{p iA}$, ρ_{iA} , T_i^{m+1} , T_i^m , κ , θ son el espaciado entre los nodos del material A, el área del material A, el calor específico del material A, la densidad del material A, la temperatura del nodo i en el instante de tiempo $(m+1)$, la temperatura del nodo i en el instante de tiempo m , la conductividad térmica del material a la temperatura del nodo i , la generación interna de calor del material A. Las variables con subíndice A corresponden al material A, y las del subíndice B al material B.

Se obtienen, para todos los distintos nodos del sistema, una serie de ecuaciones implícitas que se pueden resolver fácilmente de forma matricial para T_i^{m+1} .

$$AX = B \quad (47)$$

Sin embargo, el problema del sistema implícito reside en que $\kappa_{i+1/2}^{m+1}$, depende de T_i^{m+1} por lo que se hace necesario recalcular A hasta hallar la T_i^{m+1} verdadera para así avanzar en el tiempo.

Y la misma discretización se aplica para las ecuaciones para el sistema eléctrico (27-28).

La distribución de tensiones se resuelve por separado para el caso estacionario.

La caída de tensión por el paso de flujo de corriente viene dada por:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_i} \nabla V_{i1} \right) = 0 \quad (48)$$

Siendo $\nabla V_{i1} = -\rho_i J$

Aplicando la discretización de segundo orden:

$$\rho_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} (V_{i+1}^{m+1} - V_i^{m+1}) + \rho_{i-\frac{1}{2}}^{m+1} (V_{i-1}^{m+1} - V_i^{m+1}) = 0 \quad (49)$$

Y para la tensión generada por el efecto Seebeck:

$$\nabla(\nabla V_{i2}) = \nabla(-\alpha_i \nabla T_i) \quad (50)$$

Siendo $\nabla V_{i2} = -\alpha_i \nabla T_i$

Aplicando la discretización de segundo orden:

$$V_{i-1}^{m+1} - 2V_i^{m+1} + V_{i+1}^{m+1} = \alpha_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} (T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}) + \alpha_{i-\frac{1}{2}}^{m+1} (T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1}) \quad (51)$$

Al igual que en el caso de las temperaturas, las ecuaciones para obtener la distribución de tensiones se calculan de la forma $AX = B$

3.2.3.2.- Algoritmo de cálculo computacional

Con el dominio discretizado y las ecuaciones que gobiernan el sistema discretizadas, se puede describir el algoritmo de cálculo de la siguiente manera:

1. Se importan los datos geométricos de todos los componentes a analizar.
2. Se importan las propiedades térmicas y eléctricas de todos los materiales.
3. Se especifican las condiciones de frontera deseadas por medio de las ecuaciones. (29-36)
4. Se calculan las áreas de los nodos y el espaciado entre sus centros para cada material mediante las ecuaciones (37-38).
5. Se establece el tiempo total a simular y el tiempo de paso entre soluciones (Δt) que converja rápidamente al estado estacionario
6. Se especifican las condiciones iniciales de temperatura en cada uno de los nodos que conforman el conjunto, y el potencial eléctrico inicial en todos los nodos de los materiales termoeléctricos. Estos pueden tomar valores constantes o ser linealmente interpolados bajo las condiciones de contorno.

7. Se calculan las propiedades de los materiales ($\kappa, \sigma, \alpha, \rho$) para cada uno de los nodos en función de T_i^m .
8. Se calcula la distribución de temperaturas en todos los nodos (T_i^{m+1}) en el instante de tiempo ($m + 1$) mediante las ecuaciones (39-41) y utilizando las propiedades calculadas en el paso anterior.
9. Se recalculan las propiedades de los materiales ($\kappa', \sigma', \alpha', \rho'$) para cada uno de los nodos en función de T_i^{m+1} .
10. Se resuelve nuevamente el sistema para $T_i^{(m+1)'}$ con las propiedades de los materiales ($\kappa', \sigma', \alpha', \rho'$).
11. Se examina la convergencia para it (iteración actual) e (it-1) (iteración anterior).
 - a. Si se cumple que $\frac{\max(\text{abs}(T_i^{it} - T_i^{it-1}))}{\max(\text{abs}(T_i^{it}))} < \varepsilon_T$ en todos los nodos del sistema, significa que la solución para el instante de tiempo ($m + 1$) ha convergido. El criterio de convergencia ha sido establecido como 10^{-4} .
 - b. En caso contrario, se repiten los Pasos 8 a 11.
12. Se calcula la distribución de tensiones en el instante de tiempo ($m+1$) en los nodos de los materiales termoeléctricos (V_i^{m+1}) utilizando las ecuaciones (43-46) y las temperaturas calculadas anteriormente (T_i^{m+1}).

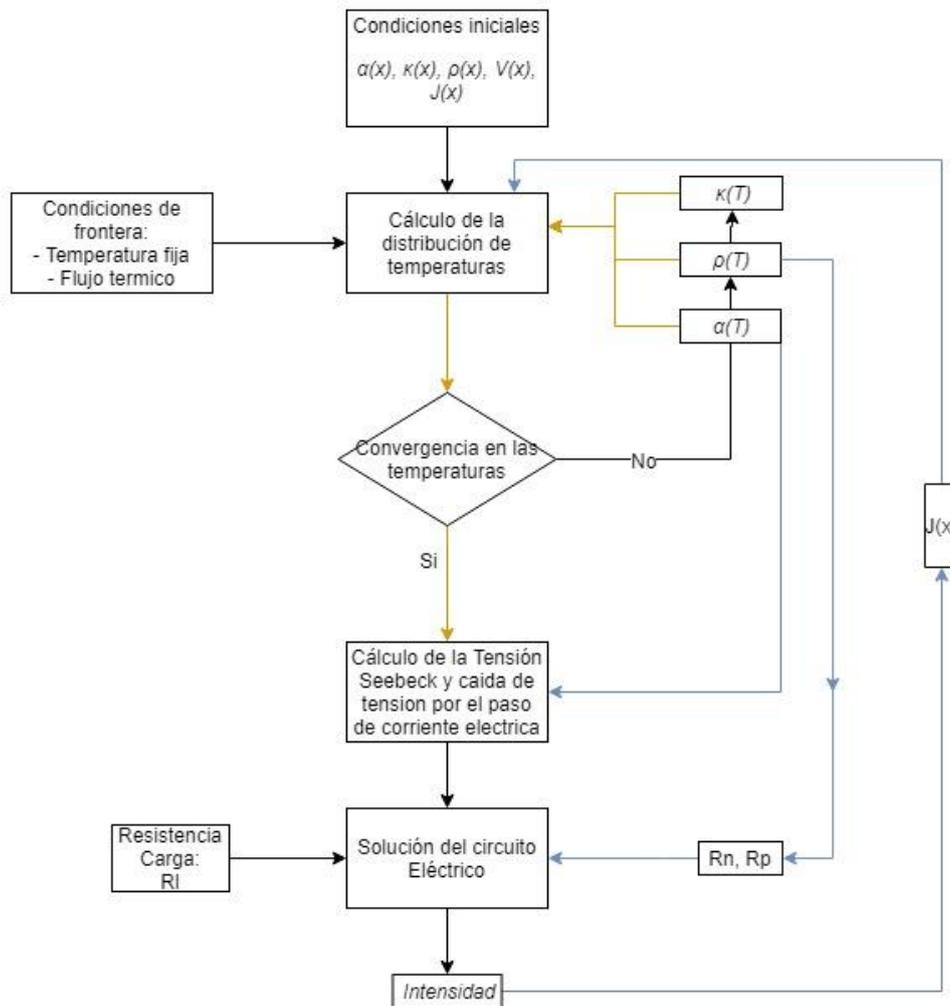


Fig. 48. Diagrama de flujo del proceso de cálculo computacional

3.2.3.3.- Precisión de los resultados

Los resultados obtenidos de la distribución de temperatura por el método numérico pueden ser aproximados a los de la solución exacta (real). La diferencia entre dichos resultados es el error que comete la solución numérica y viene definido por dos fuentes diferentes.

3.2.3.3.1.- Error de discretización

El error de discretización es el debido al reemplazo de las derivadas por las diferencias finitas en cada uno de los nodos analizados.

Se considera la solución de la distribución de temperaturas para el problema en el instante inicial $dt = 0$. En dicho instante, como es de esperar, tanto la solución exacta como la del método numérico coinciden, sin embargo, a medida que se incrementa el tiempo, la solución numérica se aleja de la solución real. La diferencia entre ambos resultados en un $t = \Delta t$ se conoce como error local de discretización. Debido a este error, en cada intervalo de tiempo la solución se aleja más de la real ya que utiliza un valor erróneo como punto de partida y se añade un segundo error a este. La acumulación de errores locales de discretización continua al aumentar el número de escalones de tiempo.

3.2.3.3.2.- Error por redondeo

El error de redondeo es un error de precisión cometido por el software matemático, en este caso, MATLAB. Las soluciones con decimales son aproximadas por el software de modo que es inevitable que exista un error por redondeo.

3.2.3.3.3.- Control del error en el método numérico

El error total cometido por el método numérico en cualquier solución es la suma del error de discretización y el error por redondeo. El error de discretización aumenta al reducir el tamaño del intervalo de tiempo mientras que el error de redondeo se incrementa con el aumento del intervalo. Esto significa que disminuir demasiado el tamaño del intervalo para obtener resultados más precisos, puede no ser una buena idea ya que hace que el error de redondeo aumente.

Existen procedimientos de ayuda a la hora de valorar los resultados obtenidos.

- 1) Inicializar los cálculos con un Δx y Δt razonable para el mallado.
- 2) Repetir los cálculos reduciendo el tamaño de Δx a $\Delta x/2$.
- 3) Comparar los resultados obtenidos en 1) y 2).
 - Si los resultados obtenidos no varían significativamente, se considera que el error de discretización está a un nivel aceptable.
 - Si la diferencia es notable se repite el paso 2) con un tamaño $\Delta x/4$ y se vuelve a comparar.
- 4) Se continua hasta que el error de discretización sea aceptable.

Teniendo en cuenta el error que se puede llegar a cometer, el código se ha programado de modo que ejecute el método para un dx predefinido por el material más pequeño, y posteriormente para un $dx/2$ de modo que compruebe si el error es aceptable. En caso de no ser aceptable, habría que variar disminuir el dx inicial, hasta que el error de discretización sea despreciable.

3.2.4.- Validación teórica del modelo numérico termoeléctrico

Para validar el modelo numérico, se comparan los resultados obtenidos con los obtenidos por E. Massaguer et al [118], en el desarrolla un nuevo tipo de TRNSYS, un componentes TEG, que valida utilizando datos experimentales. Los resultados teóricos y experimentales de Massager muestran que el componente TEG es capaz de hacer frente tanto a la dinámica térmica como a

la eléctrica, con errores cuadráticos medios normalizados del 3,53% para la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente, y del 2,33% para la potencia de salida eléctrica. Utilizando los datos de dimensiones y propiedades descritos en la Tabla 13. Se analizan los resultados para el Caso 1 y Caso 2 recogidos en la Tabla 13, contrastando los resultados obtenidos para el mismo módulo termogenerador.

Tabla 13. Diferentes casos analizados por Massager et al [118]

Parameters	Case 1	Case 2	Case 3	Unit	Source
Q_m	23.60	33.50	53	W	Measured
$T_{c\infty}$	16.45	17.34	18.20	°C	Measured
R_L	2.5	2.5	2.5	Ω	Measured
α_n	163.546	167.273	171.659	$\mu\text{V/K}$	Manufacturer
α_p	-178.098	-188.726	-201.897	$\mu\text{V/K}$	Manufacturer
λ_n	1.510	1.453	1.415	W/m K	Manufacturer
λ_p	1.954	1.925	1.792	W/m K	Manufacturer
σ_u	10.896	12.001	13.767	$\mu\Omega\text{ m}$	Manufacturer
σ_p	11.196	13.100	15.910	$\mu\Omega\text{ m}$	Manufacturer

Como resultado de la simulación, se obtiene la diferencia de temperaturas entre las caras de los semiconductores N y P. Estas temperaturas reflejan la potencia generada, la tensión en la resistencia de carga y el calor absorbido por el sistema en el generador termoeléctrico.

Se han realizado dos tipos de simulaciones con un tiempo de simulación de 3500 s.

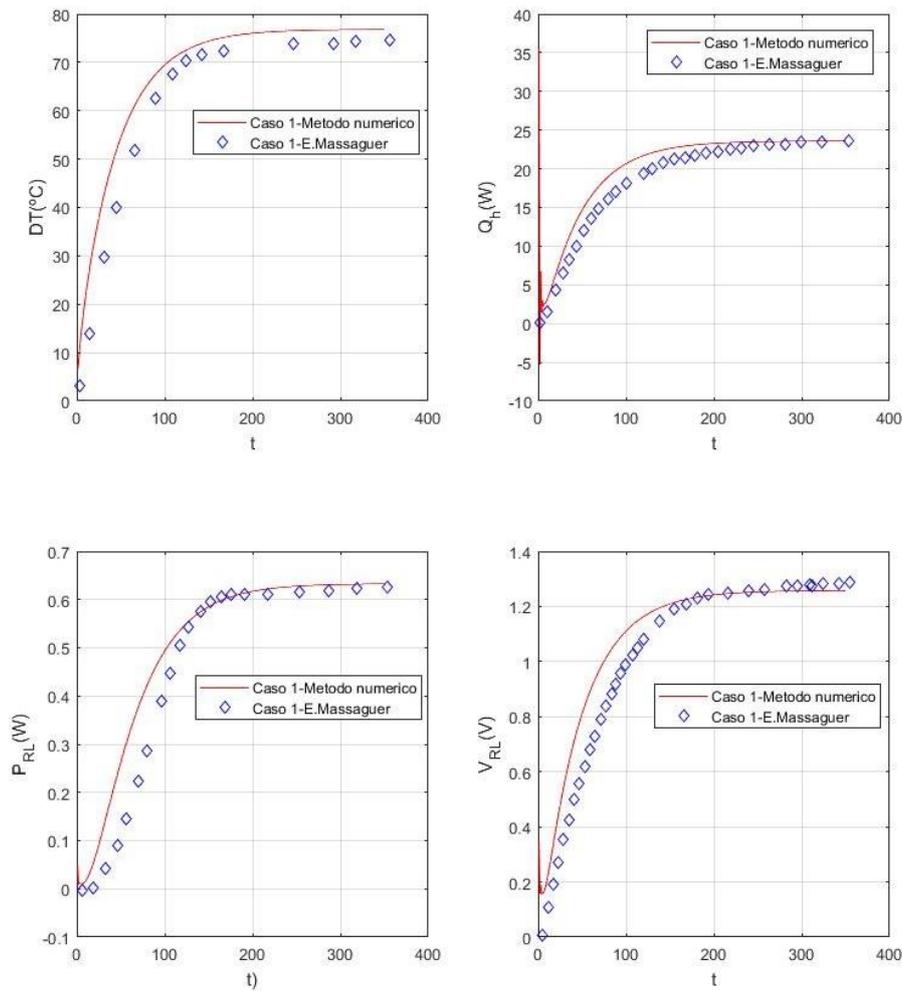


Fig. 49. Resultados de la simulación realizada para el Caso 1. (a) Diferencia de temperaturas entre lado frío y caliente, (b) Calor total de salida del sistema, (c) Potencia eléctrica generada, (d) Tensión en la resistencia de carga. t representa el tiempo $\times 10$

El **primer análisis** se ha realizado para la situación de máxima potencia entregada: la carga aplicada es igual a la resistencia interna del generador ($R_L = 2.5 \Omega$).

En las Fig. 49 y Fig. 50 se muestran los resultados del modelo con los obtenidos por [118] para los Casos 1 y 2.

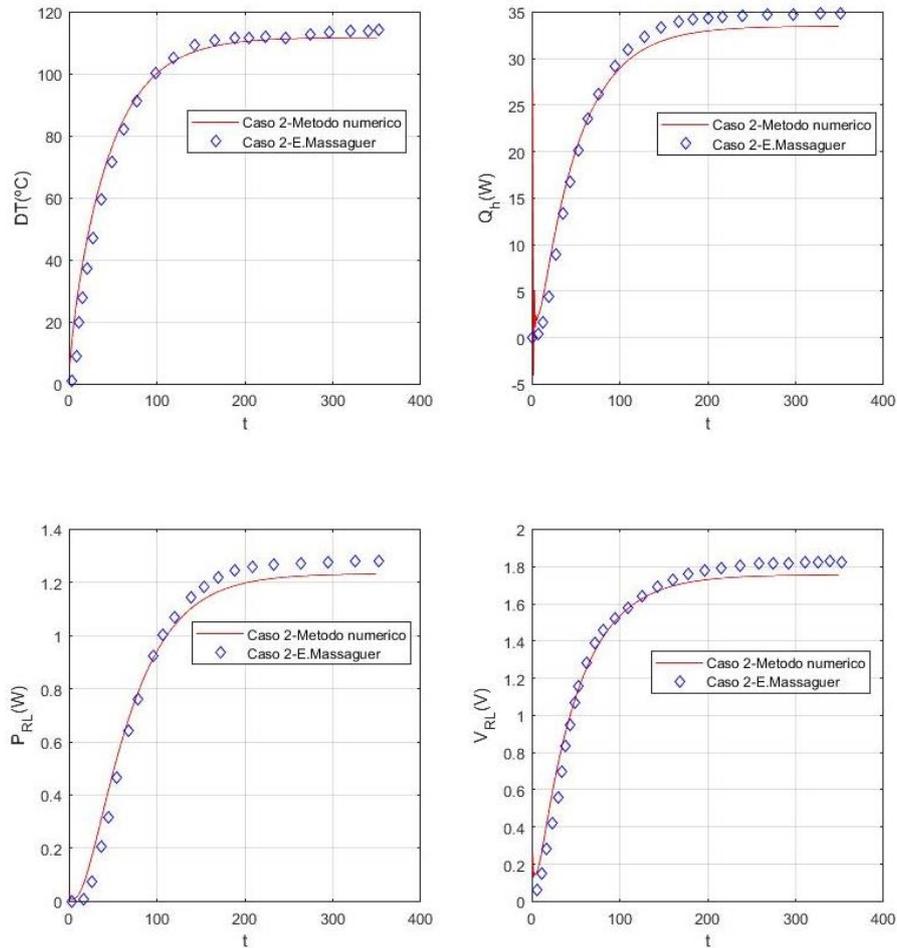


Fig. 50. Resultados de la simulación realizada para el Caso 2. (a) Diferencia de temperaturas entre lado frío y caliente, (b) Calor total de salida del sistema, (c) Potencia eléctrica generada, (d) Tensión en la resistencia de carga. t representa el tiempo $\times 10$.

El **segundo análisis** se realiza con un vector de resistencias de carga distintas. Se comienza realizando la simulación para $R_L = 0$. Se soluciona el sistema para 3500 s y, tras finalizar, se vuelve a iniciar con una $R_L = R_L + \Delta R_L$ y continuando hasta realizar la simulación con todas las resistencias. En el análisis se ha definido un rango de resistencias de 0 hasta 100 Ω con intervalo ΔR_L muy pequeño al principio y ΔR_L grande al final. Se realiza de esta manera para enfatizar el interés de los datos en el entorno cercano a la resistencia interna o de máxima potencia.

Los datos obtenidos corresponden a la intensidad, tensión y potencia en el estado estacionario del sistema, transcurrido el tiempo de simulación (3500s)

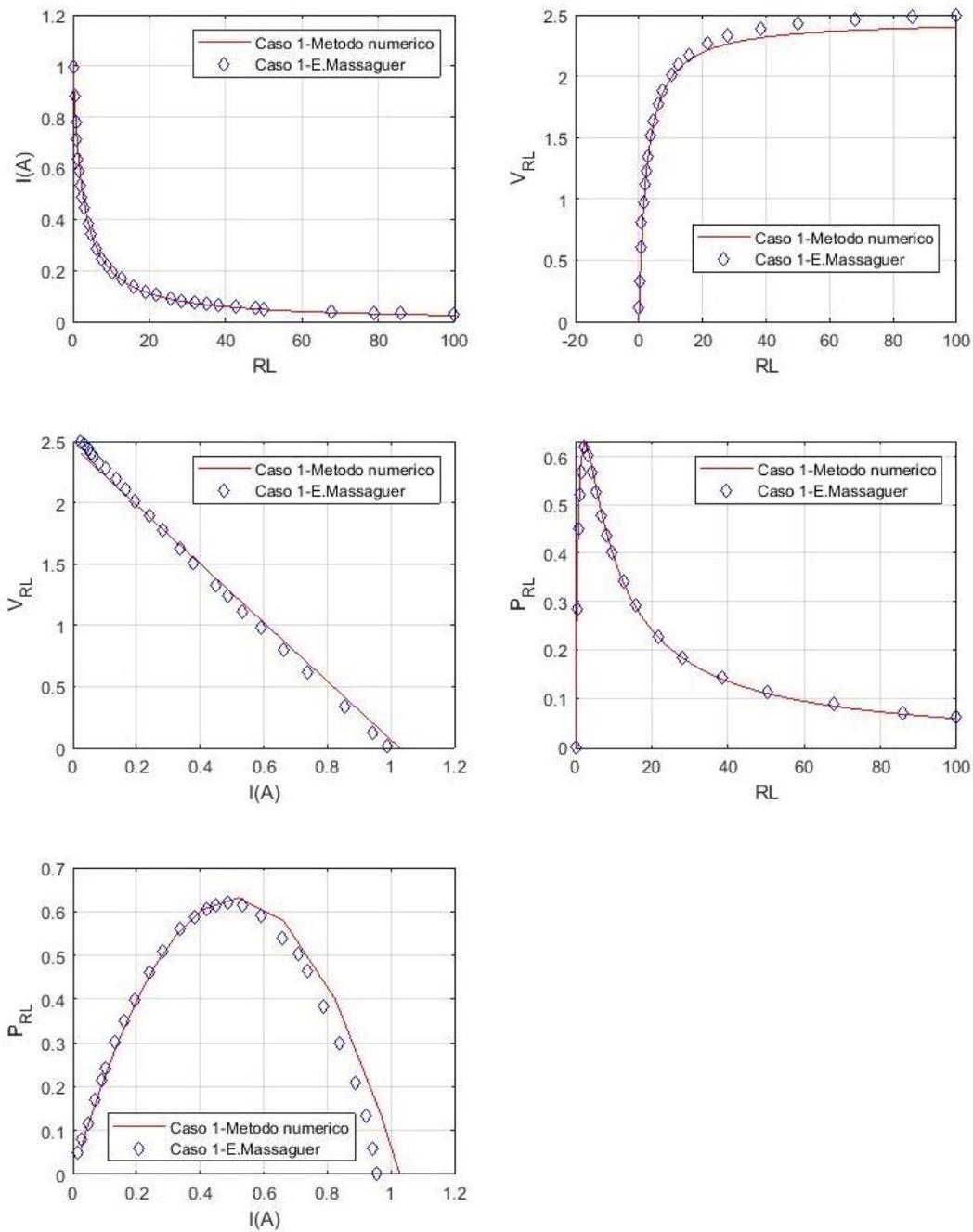


Fig. 51. Resultados del sistema solucionado para un rango de resistencias de 0 hasta 100 Ω para el Caso 1. (a) Intensidad. (b) Tensión de carga. (c) Tensión frente Intensidad. (d) Potencia generada. (e) Potencia generada frente Intensidad.

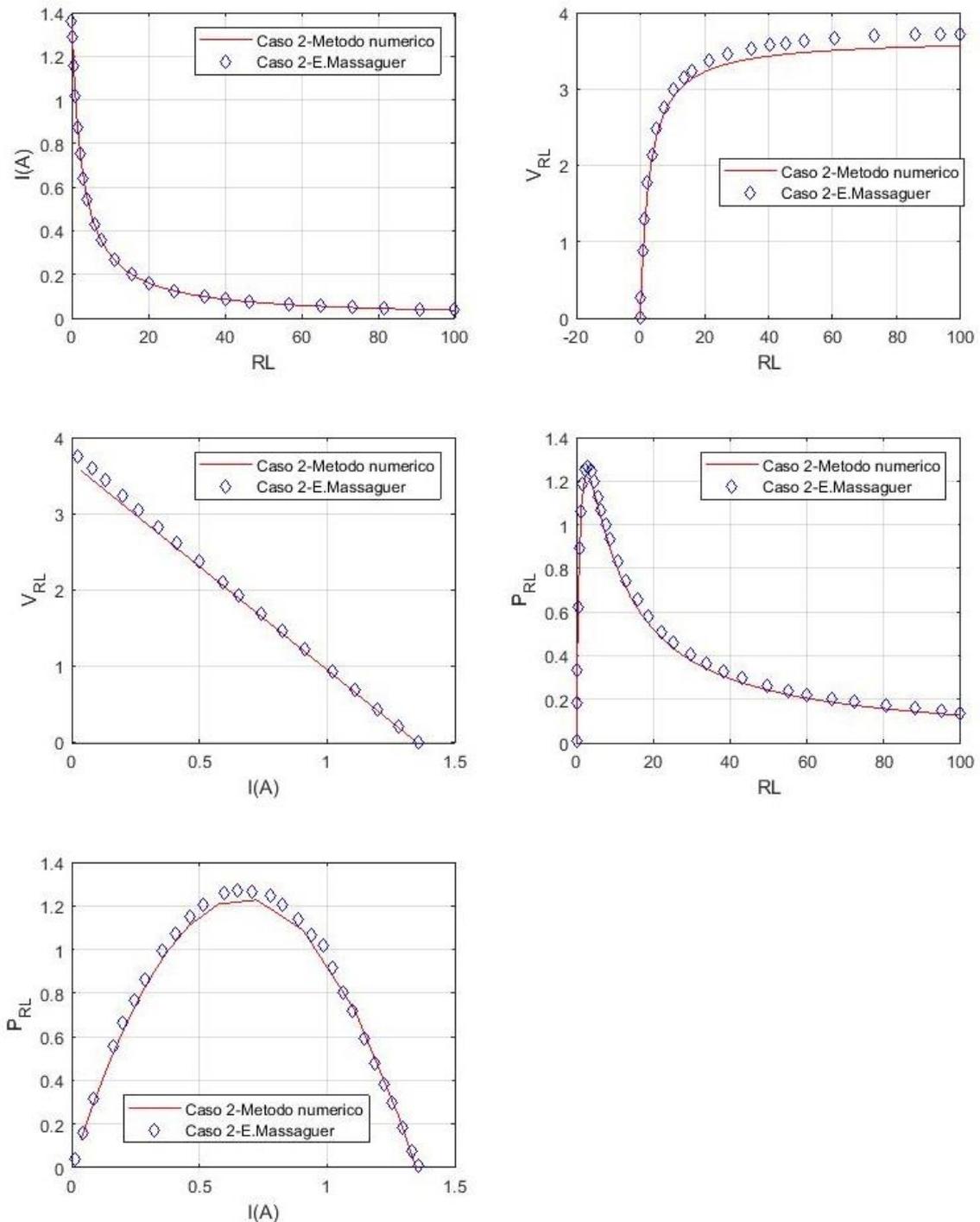


Fig. 52. Resultados del sistema solucionado para un rango de resistencias de 0 hasta 100 Ω para el Caso 2. (a) Intensidad. (b) Tensión de carga. (c) Tensión frente Intensidad. (d) Potencia generada. (e) Potencia generada frente Intensidad

La precisión de las simulaciones realizadas en este estudio demuestra que, mediante el método desarrollado se puede predecir con buenos resultados el funcionamiento de un generador termoeléctrico.



3.2.5.- Limitaciones del modelo teórico

Pese a que los resultados obtenidos son satisfactorios, el modelo creado en este trabajo presenta ciertas limitaciones. Como bien se ha explicado ya, las propiedades como las conductividades térmicas, resistividades eléctricas y coeficientes de Seebeck, son dependientes de la temperatura. Sin embargo, existen otras propiedades como la densidad o el calor específico que también pueden variar con la temperatura y que el método no contempla. El uso de únicamente 6 volúmenes hace que no se pueda incluir ningún volumen adicional para su análisis, lo que limita el diseño del termogenerador.

3.3.- Diseño y desarrollo del sistema de generación termoeléctrico

3.3.1.- Especificaciones técnicas del ventiloinvector de partida

3.3.1.1.- Potencias y consumos

En primer lugar, es necesario definir el cuaderno de especificaciones del sistema en su globalidad; es decir, del VC-TE. De esta manera, a partir de las especificaciones generales del sistema, será posible definir los requisitos específicos del sistema termoeléctrico.

Para ello, se ha definido un Fan-Coil de referencia, que servirá como punto de partida para el diseño del nuevo VC-TE y que se utilizará para la comparativa experimental.

El Fan-Coil de referencia seleccionado es el modelo Aermec OMNIA ULP 11 (OMNIA ULP 11, con carcasa), cuyos datos técnicos se muestran en la Tabla 14.



Fig. 53. Modelo de ventiloinvector Aermec OMNIA ULP 11

Tabla 14. Características técnicas del ventilador OMNIA ULP 11

Omnia UL		11		
Velocidad del ventilador		H	M	L
Prestaciones en calefacción				
Instalación de 2 tubos				
Potencia térmica (70 °C)	(1) kW	2,01	1,46	1,06
Caudal de agua	(1) l/h	176	128	93
Pérdidas de carga	(1) kPa	2	1	1
Potencia térmica (50°C)	(2) kW	1,15	0,87	0,65
Caudal de agua	(2) l/h	145	117	94
Pérdidas de carga	(2) kPa	2	1	1
Potencia térmica 45°C)	(3) kW	1,00	0,73	0,53
Caudal de agua	(3) l/h	174	126	92
Pérdidas de carga	(3) kPa	2	1	0,5
Rendimientos en enfriamiento				
Pot. frigorífera total	(4) kW	0,84	0,68	0,54
Pot. frigorífera sensible	(4) kW	0,70	0,53	0,39
Caudal de agua	(4) l/h	145	117	94
Pérdidas de carga	(4) kPa	2	1	1
Contenido de agua	l		0,4	
Ventilador				
Ventilador Centrifugo	n°			1
Caudal de aire	m³/h	180	120	80
Niveles sonoros				
Nivel de potencia sonora	(5) dB(A)	46	37	31
Nivel de presión sonora	dB(A)	38	29	23
Diámetro de los racores				
Batería estándar	Ø		1/2"	
Características eléctricas				
Potencia absorbida	W	18	12	8
Corriente absorbida	A		0,09	
Conexiones eléctricas		V3	V2	V1
Alimentación	V/ph/Hz			
Datos EUROVENT				
Clasificación de energía FCEER			D	
Clasificación de energía FCCOP (6)			D	

H velocità massima; M velocità media; L velocità minima

(1) Aire ambiente 20°C b.s.; Agua (in/out) 70°C/60°C;

(2) Aire ambiente 20°C b.s.; Agua (in) 50°C; Caudal de agua como en enfriamiento (EUROVENT)

(3) Aire ambiente 20°C b.s.; Agua (in/out) 45°C/40°C (EUROVENT)

(4) Aire ambiente 27°C b.s./19°C b.u.; Agua (in/out) 7°C/12°C (EUROVENT)

(5) Potencia sonora basada en medidas realizadas de acuerdo con la normativa Eurovent 8/2

(6) FCCOP en referencia a: Aire ambiente 20°C b.s.; Agua (in) 50°C; Caudal de agua como en enfriamiento

Presión sonora (ponderado A) medido en ambiente con volumen V=85 m³, tiempo de reverberación t=0,5 s factor de direccionalidad Q=2; distancia r=2,5 m.

A continuación, se recogen las características técnicas que deberá cumplir el nuevo VC-TE teniendo en cuenta que su aplicación será únicamente la de calefacción.

Tabla 15. Características técnicas del nuevo VC-TE

	70°C	50°C	45°C
Potencia térmica (kW)	2.01	1.15	1
Caudal de agua (l/h)	176	145	174
Potencia eléctrica consumida (W)	18	18	18
Caudal de aire (m³/h)	180	180	180

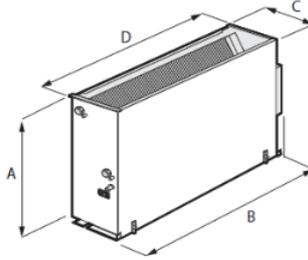
En esta tabla se han recogido las condiciones más críticas en cuanto a consumo del ventilador se refiere ya que ésta será la potencia eléctrica máxima que deberá ser capaz de generar el sistema termoeléctrico, y por tanto, los valores a tener en cuenta a la hora de realizar su dimensionamiento.



En caso de ser necesario un sistema de disipación adicional (circuito secundario) con una bomba adicional, será necesario cuantificar el consumo eléctrico de dicha bomba y dimensionar el sistema termoeléctrico teniendo en cuenta este consumo adicional.

3.3.1.2.- Dimensiones generales

Por otro lado, el nuevo sistema deberá tener unas dimensiones globales similares al sistema actual, 465x420x171mm aproximadamente, de manera que pueda ser instalado junto con una carcasa igual o similar en dimensiones a la actual. Por esta razón, el sistema termoeléctrico deberá ser incluido en su interior, lo que probablemente obligará a la redistribución espacial e incluso al redimensionamiento de algún componente del ventiloincubador.



OMNIA UL P / PAF			11
Altura	A	mm	465
Anchura	B*/D	mm	420.5/360.5
Profundidad	C	mm	171
Peso ¹		kg	10.2
dimensiones del embalaje			
A/B/C		mm	590/275/710

Fig. 54. Dimensiones generales del OMNIA ULP 11

Las entradas y salidas de agua se mantendrán en la misma posición, de manera que el sistema ventiloincubador actual sea directamente sustituible por el nuevo sistema desarrollado.

3.3.2.- Cálculo y dimensionado del sistema generador termoeléctrico

En primer lugar, se realiza un dimensionado del número de dados necesario para generar los 18 W, objetivo que el ventiloincubador requiere para su funcionamiento. Seguido se definen los criterios para calcular la relación I-V más adecuada en la que el sistema debe suministrar esta potencia.

En base a los resultados obtenidos, se calculan las características que se esperan obtener del sistema generador termoeléctrico, en función de los parámetros de funcionamiento esperables.

3.3.2.1.- Características del material de termoeléctrico de partida

Por lo general, los proveedores de material termoeléctrico de baja temperatura suministran el valor de los parámetros termométricos a temperatura ambiente, dando a entender que estos no varían con la temperatura. Nada más lejos de la realidad. Su valor es muy variable con la temperatura, y es más significativa esta variación cuanto mayor sea el rango de estudio. Existe mucha literatura que muestra curvas de laboratorio de materiales termoeléctricos tanto N como P [119]. No obstante, se ha preferido trabajar con datos reales suministrados por un fabricante de módulos termoeléctricos de generación. Trabajando con los coeficientes de un polinomio $f(T^a)$ de grado 4, para cada uno de los parámetros termoeléctricos del polinomio (α , ρ , λ). Estos coeficientes pueden observarse en la Tabla 16 y Tabla 17.

$$P(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (52)$$

Tabla 16. Coeficientes del material N de dependencia de α , ρ , λ con la temperatura

Material N	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Coeficiente Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$]	-442,76	3,4691	-0,014202	2,3254E-05	-1,3E-08
Resistividad eléctrica [$\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$]	-0,8072	0,0045066	7,8272E-06	-2,305E-08	1,317E-11
Conductividad térmica [$\text{mW}/(\text{cm}\cdot\text{K})$]	101,24244	-0,7414466	0,0022458	-3,019E-06	1,5365E-09

Tabla 17. Coeficientes del material P de dependencia de α , ρ , λ con la temperatura

Material P	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Coeficiente Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$]	161	1,818175	0.01113344	0,00002035	1,1344E-08
Resistividad eléctrica [$\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$]	-5,01	0,03519405	0,0000774	8,9397E-08	4,32E-11
Conductividad térmica [$\text{mW}/(\text{cm}\cdot\text{K})$]	-469,7059	4,5698175	0,0157451	2,3307E-05	1,242E-08

A pesar de que esta curva no limita la temperatura de trabajo del material, los materiales que se van a utilizar tienen una cota superior en torno a los 150-200°C tal como se comenta en el estado del arte. Y la mayor limitación en este caso viene determinada por la propia aplicación donde la temperatura del agua del circuito de calefacción no supera los 85°C ni es habitual que baje de los 10°C. Las Fig. 55, Fig. 56 y Fig. 57 muestran un detalle de la variación de estos parámetros en el rango de temperatura de trabajo de la aplicación y si bien puede apreciarse que su variación es mínima, más si se tienen en cuenta condiciones de trabajo más restrictivas, se tendrán en cuenta esta dependencia en el modelo computacional para realizar los cálculos.

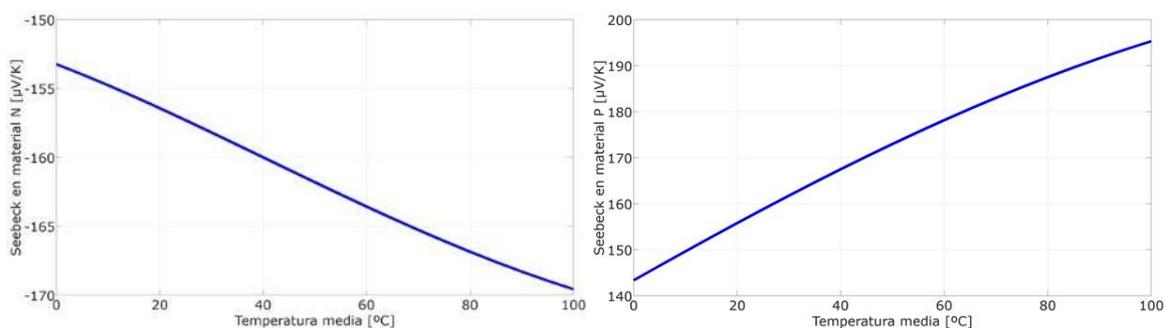


Fig. 55. Coeficiente Seebeck N, P en el rango de temperaturas de trabajo

En las gráficas mencionadas la variación del coeficiente Seebeck alcanza el 35% en el rango de 0-100°C para el material P, siendo de solo el 10% para el material N, mientras que en el rango de 30-70°C, la variación del material P se reduce al 15%, y la del N al 6%.

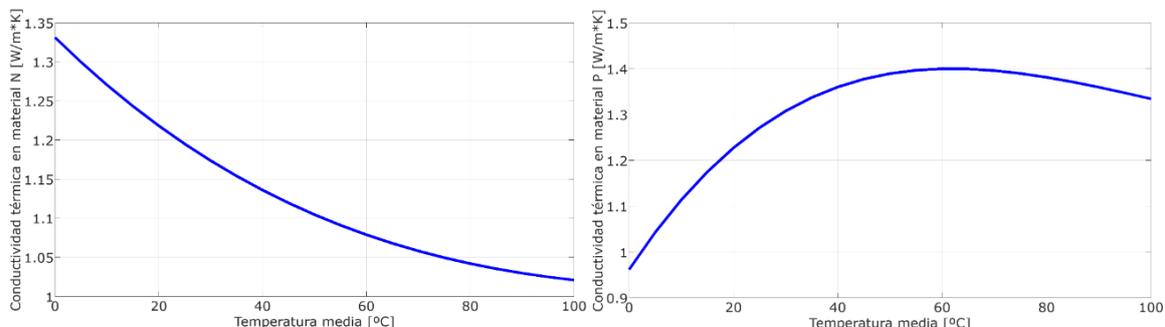


Fig. 56. Conductividad térmica N, P en el rango de temperaturas de trabajo

En la conductividad térmica la variación en el rango de 0-100°C se incrementa un 38% para el material P, reduciéndose un 23% para el material N, mientras que en rango de 30-70°C, la variación del material P se alcanza el 9%, y la reducción el N se limita al 5%.

Observando la resistividad eléctrica, la variación en el rango de 0-100°C se incrementa un 190% para el material P, alcanzando el 69% para el material N, mientras que en rango de 30-70°C, la variación del material P y el N son más similares, siendo de 26% y 23% respectivamente.

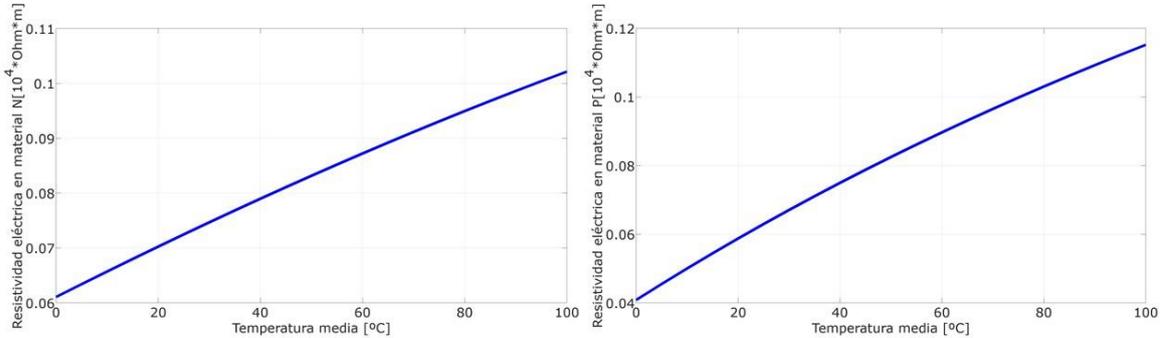


Fig. 57. Resistividad eléctrica N, P en el rango de temperaturas de trabajo

Se ponen por tanto de manifiesto, dos hechos. El primero es que la variación de los parámetros con la temperatura es significativa, y el segundo es que los dos materiales se comportan de distinta manera con el incremento de temperatura tanto en tendencia creciente o decreciente como en el porcentaje de la variación que se produce, excepto la resistividad eléctrica que se comporta de manera similar.

Ninguno de estos parámetros individualmente determina la calidad de un material como material termoeléctrico, siendo, como ya se ha explicado con anterioridad, la figura de mérito Z el parámetro que se utiliza como indicador para tal fin.

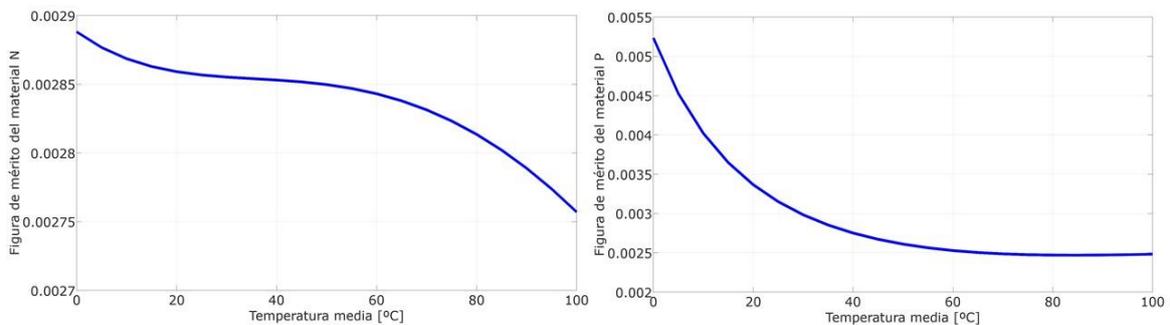


Fig. 58. Figura de mérito (Z) del material N, P en el rango de temperaturas de trabajo

Analizando la figura de mérito representada en la Fig. 58 se observa que al variar la temperatura de 0-100°C se produce una reducción del valor inicial de un 54% en el material P, alcanzando solo el 4% para el material N, mientras que en rango de 30-70°C, la reducción por el menor rango de temperatura considerado alcanza una variación del material P del 17%, y la del N se queda en el 1%.

Se concluye que, a medida que aumenta la temperatura, la figura de mérito del material disminuye. El material más afectado es el de tipo P, mientras que el de tipo N experimenta muy poca variación.

Analizado el comportamiento del material N y P en el rango de 0 a 100°C se puede apreciar en la Fig. 59 como la gran variación de la figura de mérito es adimensional.

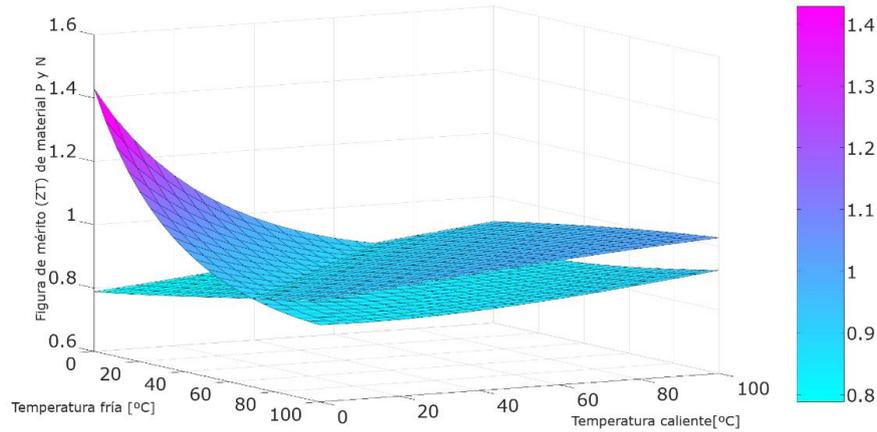


Fig. 59. Figura de mérito (ZT) de materiales N y P en el rango de 0-100°C

En cuanto a la eficiencia (ratio entre producción eléctrica y flujo térmico), tal como se aprecia en la Fig. 60, las curvas de ambos materiales son muy similares, pronunciándose más la diferencia a media que se amplía el ΔT , aunque no de modo significativo.

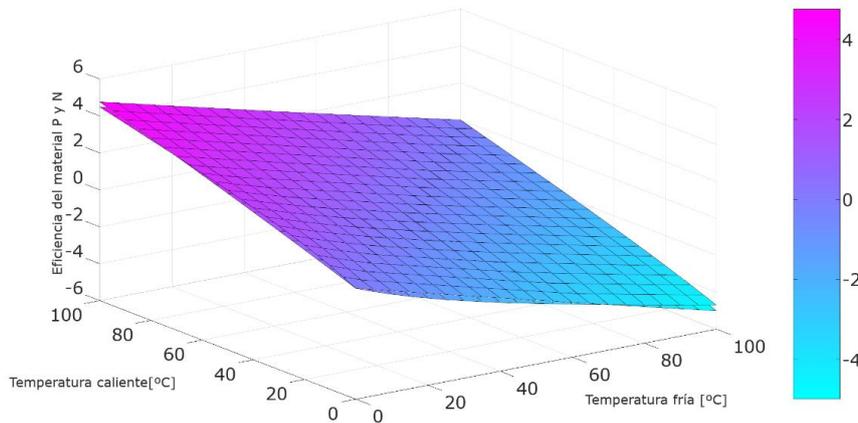


Fig. 60. Eficiencia de los materiales N y P en el rango de 0-100°C

La máxima eficiencia en ambos materiales se alcanza según el modelo computacional cuando la diferencia de temperatura es máxima (100°C), marcado la cifra superior al 4% en condiciones ideal, sin tener en consideración resistencias térmica ni eléctricas de contacto.

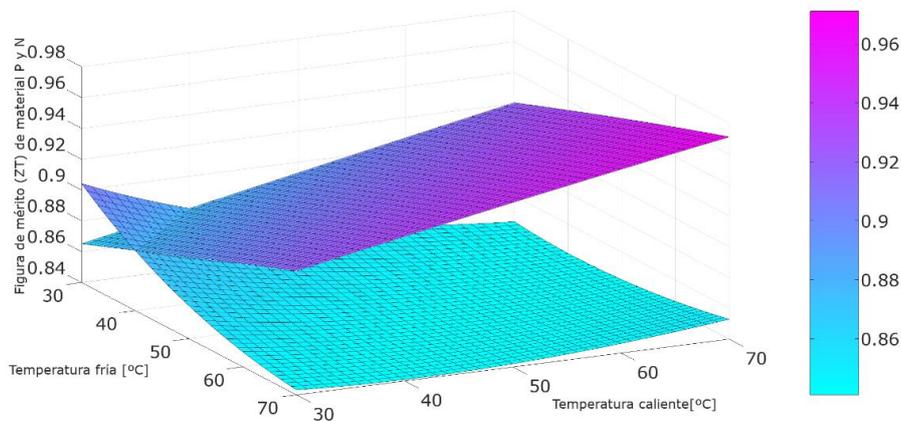


Fig. 61. Figura de mérito (ZT) de materiales N y P en el rango de 30-70°C

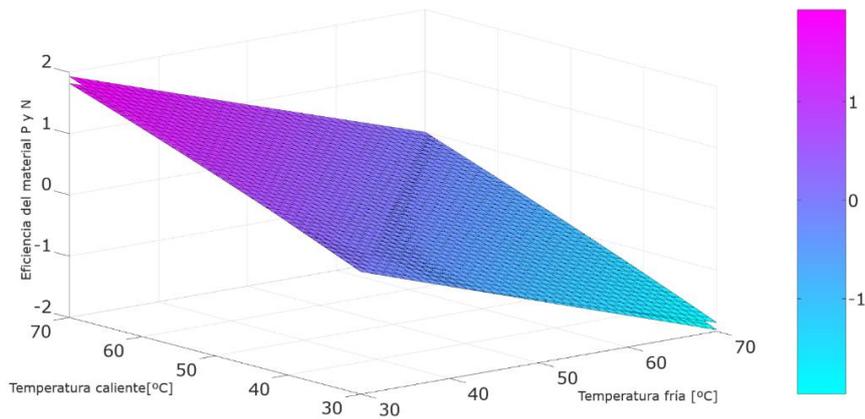


Fig. 62. Eficiencia de los materiales N y P en el rango de 30-70°C

La eficiencia en el rango de temperatura de 30°C a 70°C cae por debajo del 2%, produciéndose el máximo con la ΔT de 40°C. Con esta eficiencia satisfacer el objetivo de 18W de generación eléctrica implicaría un flujo térmico en condiciones ideales de 900W.

3.3.2.2.- Cálculo de número de módulos y configuración óptima

De acuerdo con el análisis realizado en el estado del arte sobre la disponibilidad comercial de los módulos termoeléctricos y las características de sus termoelementos y con la intención de orientar el diseño a mínimo coste, se opta por imponer un módulo concreto como condición de diseño. Se empleará el módulo más habitual de 127 pares con termoelementos de 1,4x1,4x1,6 mm.

3.3.2.2.1.- Condiciones no ideales

Como se ha podido observar en el apartado anterior la eficiencia de recuperación de calor de la tecnología TEG es relativamente baja aun considerando condiciones ideales, por lo que es de imaginar que, en las aplicaciones prácticas de baja temperatura consideradas, tanto la eficiencia como la potencia generada se vean perjudicadas principalmente por motivo de las resistencias de contacto. Estas son de dos tipos: Resistencias de contacto térmico, y resistencias de contacto eléctrico.

La resistencia de contacto térmico afectará en una reducción de diferencia de temperatura en las caras del TEG, mientras que la resistencia de contacto eléctrico supondrá un incremento de la R_{int} del TEG.

Si bien resulta obvio que, para mejorar la viabilidad económica, es necesario mejorar la eficiencia de la conversión termoeléctrica, en el presente apartado se tratará de limitar el impacto de estas resistencias, acotando sus valores y adaptando el modelo.

3.3.2.2.1.1 Resistencia térmica de contacto

Obviamente, la mejora de la transferencia de calor en los intercambiadores de calor de los lados caliente y frío de un TEG repercutiría en el aumento de la diferencia de temperatura efectiva entre ambos lados del módulo termoeléctrico. Sin embargo, el contacto térmico estable entre el TEG y la fuente caliente, y entre el TEG y la fuente fría, tiene un impacto significativo en el rendimiento del sistema. Cabe señalar que ninguna superficie es perfectamente lisa y existe un espacio de aire entre las dos interfaces. Además, la gran diferencia entre las conductividades térmicas del aire y de los sólidos causa la reducción del flujo de calor a través de la interfaz de contacto, lo que resulta en la generación de una resistencia de transferencia de calor, es decir, la resistencia de contacto térmica.

La existencia de la resistencia de contacto térmico disminuye la diferencia de temperatura real entre los dos lados del módulo termoeléctrico, reduciendo así la potencia de salida. Estudios previos [120] [121] han demostrado que la resistencia al contacto térmico puede disminuir si se utiliza grasa o pasta térmica para eliminar los espacios de aire en las interfaces de contacto. Esto se debe a la mayor conductividad térmica de la grasa con respecto a la del aire.

Se han realizado otras investigaciones sobre diferentes aspectos de los TEG, incluyendo la reducción de las resistencias de contacto térmico entre el TEG y las fuentes calientes y frías, mejorando el conjunto del rendimiento del sistema y el establecimiento del mecanismo de formación de la resistencia de contacto térmico y su efecto en el rendimiento del sistema TEG. Rowe et al.[122] analizaron los factores que influyen en la resistencia de contacto térmico de un TEG, y encontró que esta limita significativamente el rendimiento del sistema. Astrain et al. [123] examinaron el impacto de las resistencias de contacto térmico entre un TEG y las fuentes de calor y frío sobre el rendimiento del sistema. Concluyeron que una reducción del 10% de las resistencias de contacto térmico entre los dos lados del intercambiador de calor aumentaba el rendimiento del TEG en un 8%. Del mismo modo, existen datos sobre el valor usual de las resistencias térmicas de contacto de los módulos comerciales. Estas suelen alcanzar un valor de conductividad térmica de contacto (Tabla 18) de un orden de magnitud superior a la de los termoelementos, por lo que pueden provocar una reducción en la diferencia de temperatura efectiva que ronde el 10%.

Tabla 18. Valores de conductividad térmica de contacto k_c de módulos comerciales de Melcor [124]

Modules	l_o (mm)	A_e/l_o (mm)	$r = k/k_c$	$s = \rho_c/\rho$ (mm)	k_c (W/mK)
CP1.4-127-10	2.54	0.771	0.096	0.1	15.6
CP1.4-127-06	1.52	1.289	0.122	0.1	12.3
CP1.4-127-045	1.14	1.719	0.104	0.1	14.4

Por el valor de la misma, la resistencia térmica de contacto no se despreciará y tendrá en cuenta en el modelo computacional.

3.3.2.2.1.2 Resistencia eléctrica de contacto y Factor de fabricación (MF)

Para evaluar el impacto de la resistencia de contacto eléctrico en el rendimiento del módulo termoeléctrico y la potencia generada, se define el factor de fabricación (MF), se calcula como $MF = R_{id}/R_{int}$ y representa la influencia acumulativa de varios parámetros en el proceso de fabricación sobre la calidad de los dispositivos. La resistencia interna (R_{int}) de cada dispositivo, correspondiente a la pendiente de las líneas I-V, se determina mediante medición o bien considerando la suministrada por el fabricante. La resistencia interna ideal (R_{id}) se calcula sumando los valores de resistencia de las muestras de los tipos N y P. Con R_{int} y R_{id} , se puede obtener una estimación de la resistencia eléctrica de contacto (R_c). Por $R_c = R_{int} - R_{id}$. R_c debe ser minimizado para cada dispositivo porque representa un papel clave en el rendimiento del dispositivo TEG.

Para un módulo de 127 pares, la resistencia interna ideal calculada a 25°C es de $R_{id}=1,404 \Omega$, mientras que un módulo comercial de esas mismas características, según información suministrada por los fabricantes, alcanza $R_{int}=1,7 \Omega$ [54].

Con ello se obtiene un $MF=82\%$ y una resistencia de contacto $R_c=0,3 \Omega$. Dado que cada fabricante indica una R_{int} ligeramente diferente, se aplicará $MF=80$ para la realización de los cálculos. Hay que tener en cuenta que las propiedades de los módulos comerciales también están sujetas a variaciones de $\pm 5\%$, por lo que el cálculo es orientativo, y finalmente habrá que realizar mediciones sobre los prototipos para conocer los valores reales.

MF se considerará constante con la temperatura, ya que algunos autores han encontrado que el MF es prácticamente independiente de las condiciones de temperatura [125].

3.3.2.2.2.- Dependencia de la potencia con el número de pares

Partiendo de las características termoeléctricas del material y de la geometría de los termoelementos, y teniendo en cuenta los factores de no idealidad identificados, se determina en base al modelo computacional, la potencia eléctrica generada por par, funcionando con carga adaptada, para la diferencia de temperatura estimada para el funcionamiento en estacionario del módulo de 40°C (30°C-70°C).

La potencia generada es directamente proporcional al número de termoelementos, y se requerirían 8568 pares, como se muestra en la Fig. 63, que completarían un total de 68 módulos.

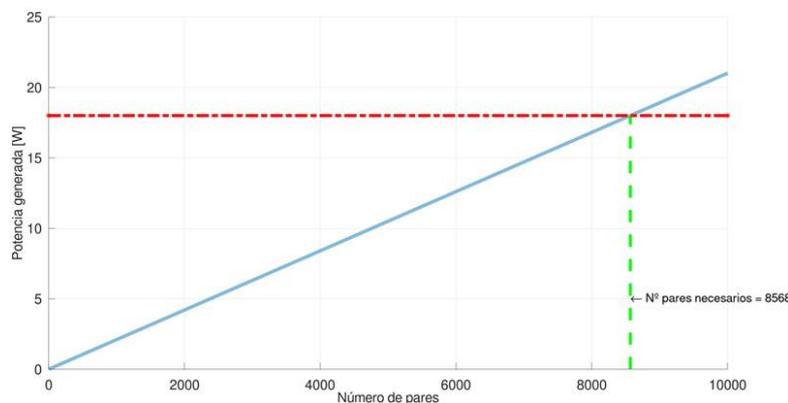


Fig. 63. Relación de la potencia con el número de pares

Si no se hubiera considerado la no idealidad, la aportación de cada par termoeléctrico a la potencia sería de $P=3,32$ mW, lo que implica que para 18W se requerirían 5430 pares. En total serían necesarios 43 módulos de 127 pares.

Se puede apreciar que el impacto económico y el margen de mejora es considerable.

3.3.2.2.3.- Dependencia de la tensión generada con el número de pares

Cabe destacar que el sistema va a tener un DC/DC al cual hay que alimentarle con 12V como mínimo para lograr una salida estable, por lo que se apilarán los módulos en distintos bloques, los cuales podrán conectarse como mejor convenga (serie-paralelo) para alimentar el sistema.

Dados estos requisitos, en la Fig. 64 se muestra el número mínimo de pares por cada uno de estos bloques. Los 2013 pares necesarios se traducen en 15,85 módulos de 127 pares, por lo que cada unidad de generación termoeléctrica deberá disponer de un mínimo de 16 módulos, para poder garantizar 12V en la entrada de DC/DC

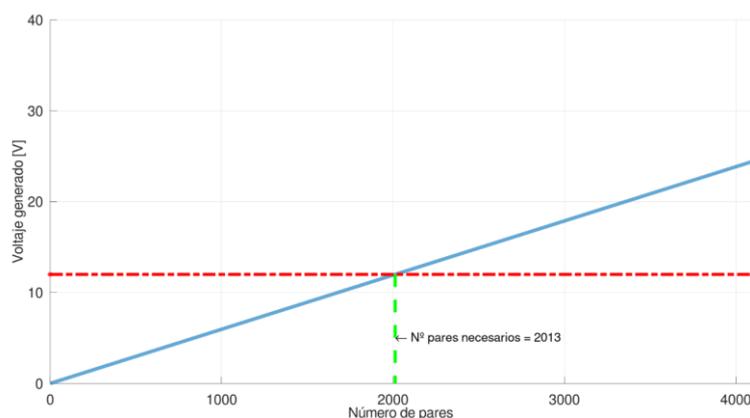


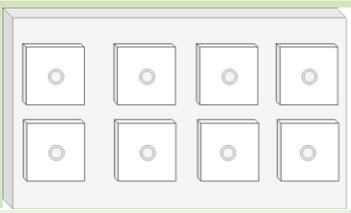
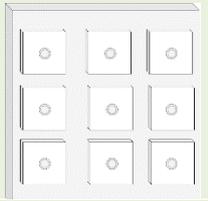
Fig. 64. Relación del voltaje con el número de pares

De cara a minimizar el número de disipadores líquidos, se plantea un modelo que considera un único disipador líquido caliente con dos intercambiadores de calor sobre el que se instalan dos generadores termoeléctricos, cada uno de los cuales dispondrá de un disipador líquido para el lado frío. De modo que cada unidad de generadores contendrá tres disipadores líquidos y dos generadores termoeléctricos simétricos. La existencia de simetría facilita el desarrollo de los modelos, pero también aporta estabilidad mecánica a la solución, ya que eléctricamente resulta indiferente la distribución física de estos dispositivos.

Con este planteamiento de diseño queda la duda de la geometría física más adecuada para cumplir la condición de simetría e incluir el mínimo de 68 módulos necesarios para generar los 18W, con una orientación de diseño al mínimo coste, ósea, con el mínimo número de disipadores posible.

Dicho esto, quedan tres configuraciones, mostradas en la Tabla 19, con posibilidad de dar una solución acorde a las condiciones de partida.

Tabla 19. Configuraciones de distribución de módulos termoeléctricos sobre disipadores de calor

Configuración	Características	Esquema
1	8 módulos / lado 16 módulos / bloque 5 bloques / TEG 80 módulos / TEG	
2	9 módulos / lado 18 módulos / bloque 4 bloques / TEG 72 módulos / TEG	
3	12 módulos / lado 24 módulos / bloque 3 bloques / TEG 72 módulos / TEG	

La configuración 3 ofrece la solución con el mínimo número de disipadores y mínimo número de módulos por encima de 68, por lo que tendrá un coste más contenido que el resto.

Existirán 12 módulos termoeléctricos por generador, y un total de 24 por bloque.

Con tres bloques por sistema, como se muestra en la Fig. 65, la cantidad total de pares será de 9144, y la de módulos ascenderá a 72, con lo que se espera alcanzar 19,2 W de generación eléctrica y 54,49 V en circuito abierto.

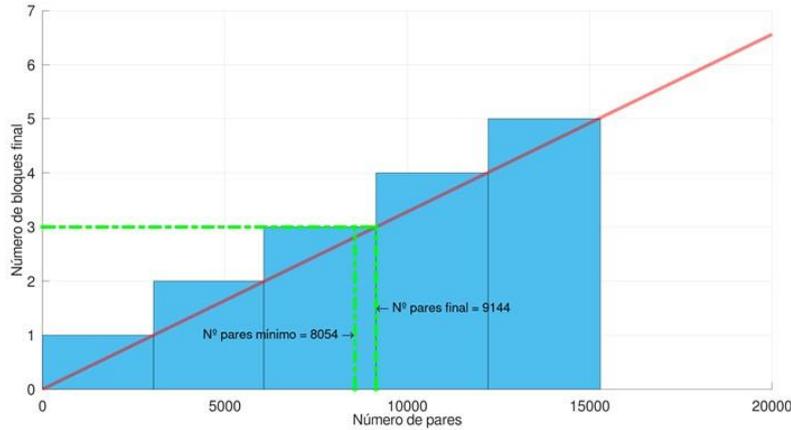


Fig. 65. Relación entre número de pares y los bloques constitutivos del sistema

3.3.2.3.- Simulación computacional del sistema generador termoeléctrico

Con todas las consideraciones de los apartados anteriores incorporadas al modelo computacional y teniendo en cuenta el número de módulos totales, se muestran a continuación la estimación de potencia eléctrica generada, flujo térmico y eficiencia del generador termoeléctrico completo.

3.3.2.3.1.- Dependencia de la tensión e intensidad con la diferencia de temperatura

El primer cálculo realizado estima la intensidad (Fig. 66) y tensión (Fig. 67) de los bloques para todas las combinaciones posibles de temperaturas frías y calientes, incluidas las diferencias negativas, en el rango de temperaturas de trabajo.

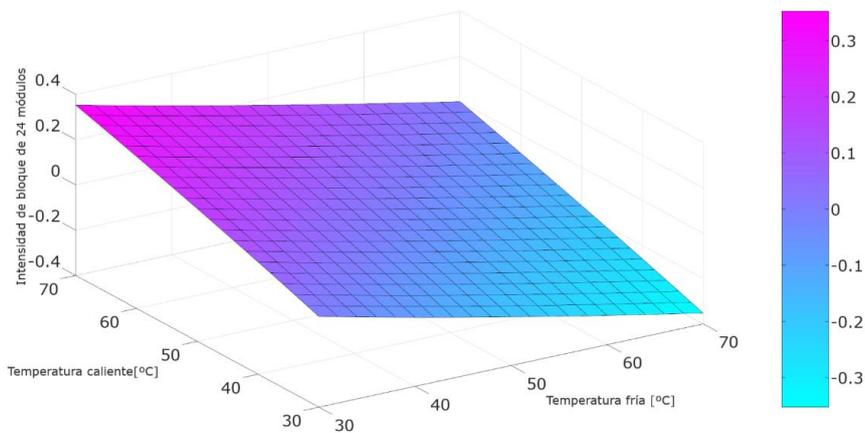


Fig. 66. Intensidad en el sistema termoeléctrico de 24 módulos con carga adaptada

La intensidad, por estar eléctricamente en serie, será la misma para todos los termoelementos del módulo y será también la misma para todos los módulos del bloque de 24 que estén conectados en serie. Su estimación con las condiciones de no idealidad y con carga adaptada es de $I_{\max}=352,54$ mA.

De mismo modo, el voltaje con carga adaptada asciende a $V_{\max}=18,164$ V. Siendo la tensión resultante la suma de las tensiones individuales de cada elemento de cada módulo termoeléctrico, nuevamente con las condiciones de no idealidad consideradas en el modelo.

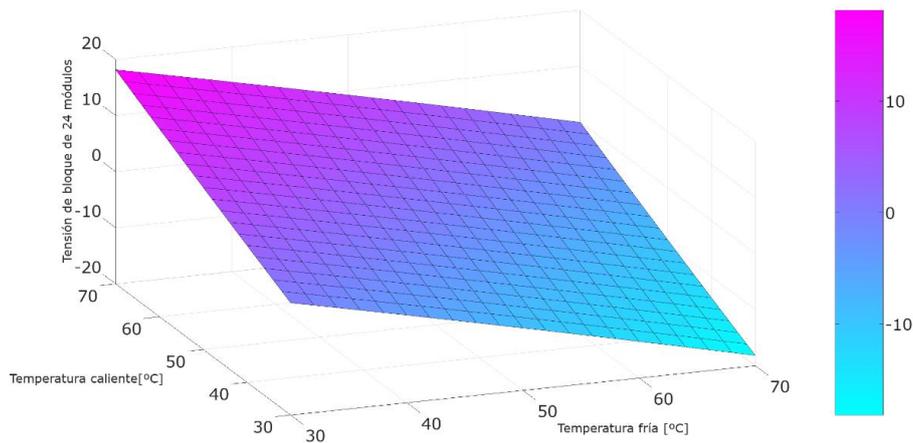


Fig. 67. Tensión generada por el sistema termoeléctrico de 24 módulos con carga adaptada

3.3.2.3.2.- Dependencia de la potencia eléctrica generada con la diferencia de temperatura

Puede apreciarse en la Fig. 68 que, si las consideraciones realizadas son correctas, el sistema termoeléctrico generará los 18 W necesarios cuando entre sus caras exista una diferencia de temperatura de 40°C.

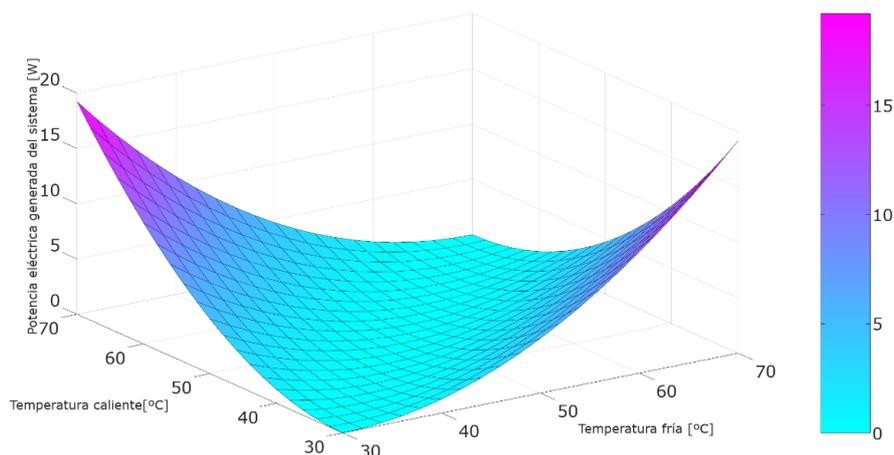


Fig. 68. Potencia eléctrica generada del sistema generador termoeléctrico

Debido a la inclusión de unos módulos termoeléctricos extra, la potencia eléctrica generada será ligeramente superior a la necesaria alcanzando 19,21 W.

3.3.2.3.3.- Dependencia de Qh con la diferencia de temperatura 3D

En la Fig. 69 se muestra el flujo térmico esperable cuando existe adaptación conjugada de impedancias. Se necesitaría un flujo de 1110,8W para lograr los 18W, para la máxima ΔT considerada, que es de 40°C.

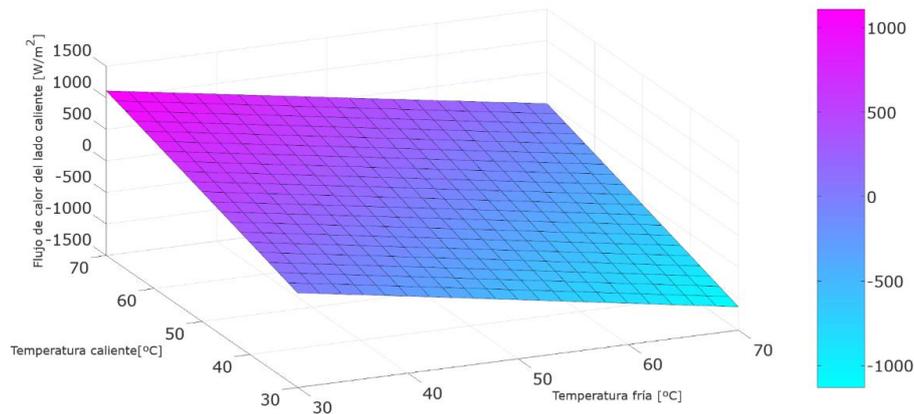


Fig. 69. Flujo térmico entrante a la parte caliente de los 72 módulos.

3.3.2.3.4.- Dependencia de la eficiencia con la diferencia de temperatura 3D

Puede apreciarse en la Fig. 70 que la eficiencia total se ha reducido muy significativamente comparado con la eficiencia teórica del material contemplada en la Fig. 62. Esto se debe a las resistencias de contacto térmicas y eléctricas consideradas, y que son ajenas al material termoelectrico. La eficiencia total se reduce a 1,7294 frente a los 1,9327 del material N y los 1,8197 del material P. Lo que supone una reducción del 10,5% y del 5,0% respectivamente.

Ello ha motivado que para la misma potencia eléctrica generada se requiera un flujo térmico mayor y un mayor número de módulos.

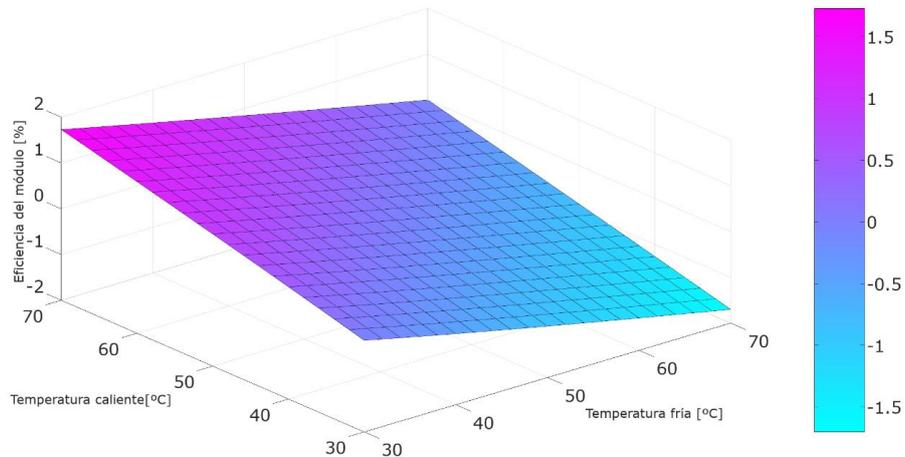


Fig. 70. Eficiencia total del sistema termoelectrico en condiciones no ideales.

3.3.3.- Diseño CAD y prototipado del sistema termoelectrico

Una vez definidas las especificaciones del nuevo sistema, se ha realizado el dimensionamiento de cada uno de los componentes a implementar. Como restricción principal se ha impuesto la utilización del mismo ventilador y del mismo intercambiador de calor utilizado actualmente en el Fan-Coil Omnia UL-11.

Esta condición implica que el sistema termoelectrico debe de ser capaz de alimentar el ventilador, cuyo consumo máximo es de 18W y se debe adaptar a la tensión de salida del sistema termoelectrico de DC a AC.

3.3.3.1.- Módulos Termoeléctricos

En este caso, se montarán 3 sistemas modulares de 6W cada uno de ellos, 18W en total. Cada uno de estos sistemas modulares estará compuesto por 24 módulos termoeléctricos de 40x40mm y 127 pares de la empresa HUIMAO [126], para hacer un total de 72 módulos cuyas características se muestran a continuación:

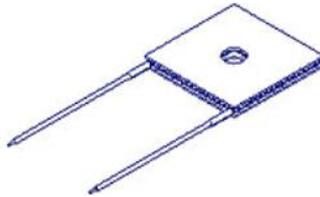


Fig. 71. Módulo termoeléctrico seleccionado con agujero central

Model	couples	U _{max} (V)	I _{max} (A)	ΔT _{max} (C)	Q _{max} (W)	L×W×H (mm)	R(Ω)	inner Diam (mm)
TEC1-12707T125	127	15.2	7	65	72.2	40×40×3.6	1.700	4.7

Fig. 72. Características de los módulos seleccionados

El único motivo de separar en tres bloques idénticos para dar la solución es constructivo, permite trabajar en cada uno por separado, facilita el montaje y la reparación en caso de rotura, y facilita la adaptación a las cavidades disponibles en el ventiloincubador. Por el contrario, obliga a más canalizaciones de goma para la conducción de los líquidos caloportadores.

3.3.3.2.- Diseño eléctrico y termoeléctrico

Se han diseñado y fabricado unas PCBs, que pueden verse en la Fig. 73 y Fig. 74, para facilitar el conexionado eléctrico entre los diferentes termoelementos. Además, dichas PCBs permiten posicionar cada uno de los termoelementos respecto de los intercambiadores de calor, de manera que el flujo de calor que atravesase cada uno de ellos sea lo más homogéneo posible. A continuación, se muestra la geometría de dichas PCBs.

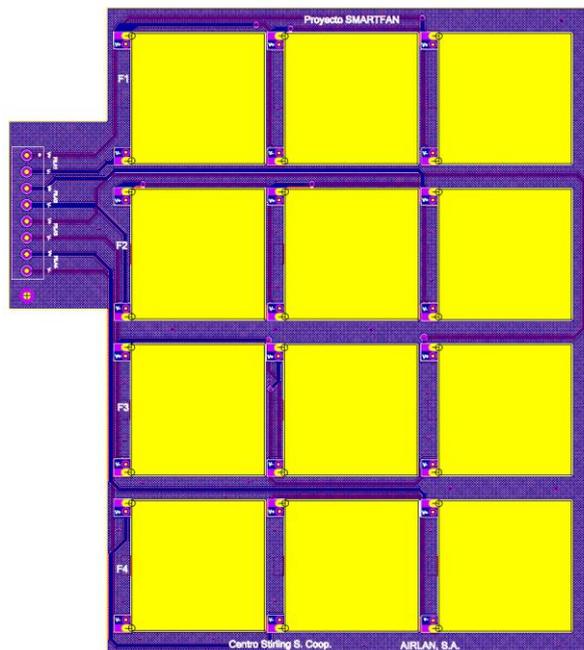


Fig. 73. GERBER de placa electrónica

Los 24 módulos termoeléctricos de cada bloque se disponen en dos tarjetas PCBs como la mostrada en la Fig. 75. Se dispondrán en 4 subconjuntos, eléctricamente independientes, de 3 módulos en serie en cada tarjeta, de manera que sea posible realizar distintas configuraciones eléctricas serie/paralelo durante los ensayos de validación y funcionamiento del sistema desde el exterior del sistema termoeléctrico para seleccionar la configuración que mejor se adecue e incluso poder puentear subconjuntos deteriorados.

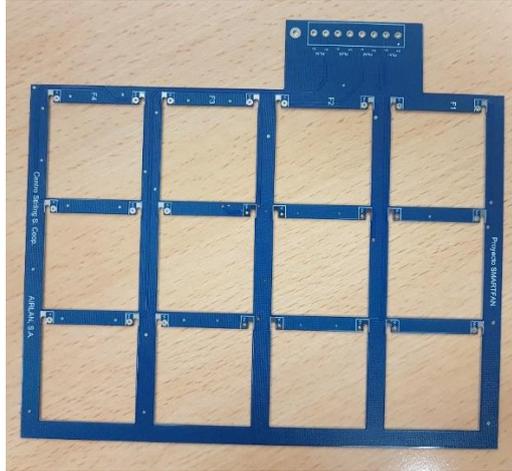


Fig. 74. PCB electrónica de conexión de módulos termoeléctricos

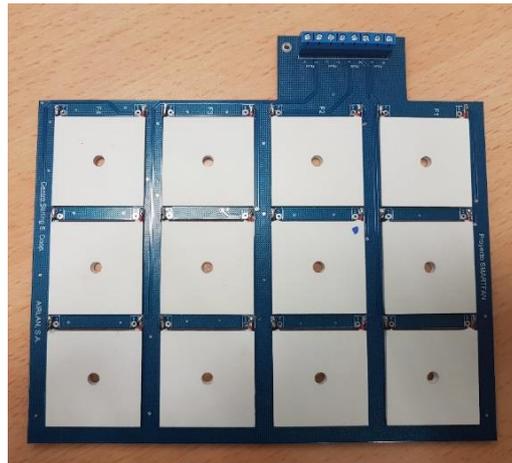


Fig. 75. Bloque de módulos termoeléctricos ensamblado

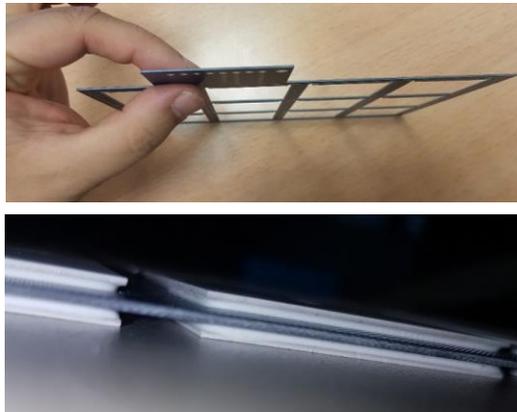


Fig. 76. Visión lateral de la PCB electrónica y el bloque de módulos termoeléctricos ensamblado

Las pistas de las PCBs realizan la conexión serie de tres módulos, de manera que se obtienen 4 ramas de 3 módulos en serie cada una. Teniendo en cuenta que cada conjunto está compuesto por 24 módulos, se obtienen, 8 ramas de 3 módulos en serie en cada una de ellas. El conexionado de estas 8 ramas entre ellas se realizará de manera externa, de forma que sea posible realizar diferentes configuraciones como se muestran en la Tabla 20 .

Tabla 20. Configuraciones serie/paralelo de módulos en un bloque del sistema termoeléctrico

<i>Configuración</i>	<i>Ramas en serie</i>	<i>Ramas en paralelo</i>	<i>R (Ω)</i>	<i>V_{oc} (V)</i>	<i>V* (V)</i>	<i>I* (A)</i>	<i>P* (W)</i>
1	8	1	43,00	33,00	16,50	0,38	6,33
2	4	2	10,75	16,50	8,25	0,77	6,33
3	2	4	2,69	8,25	4,13	1,53	6,33
4	1	8	0,68	4,13	2,06	3,06	6,30

En total se montan 6 tarjetas electrónicas con 72 módulos termoeléctricos como se aprecia en la Fig. 77 y clemas para realizar la posterior conexión del cableado.

Cabe señalar que el espesor de la placa es inusualmente fino, como puede observarse en la Fig. 76, ya que se queda en 0,6 mm frente al habitual espesor de FR4 de 1mm. El motivo reside en que la tarjeta tenga un perfil marcadamente inferior al de los módulos termoeléctricos, y el contacto térmico entre estos y los intercambiadores de aluminio sea óptimo en todos los puntos de la superficie, minimizando así la resistencia térmica de contacto que perjudica la eficiencia del sistema TE.



Fig. 77. Montaje de las PCBs con los módulos termoeléctricos

3.3.3.3.- Diseño de los intercambiadores de calor.

El intercambiador de calor se ha diseñado de modo simple, sin haber pretendido optimizar su diseño para maximizar el intercambio.

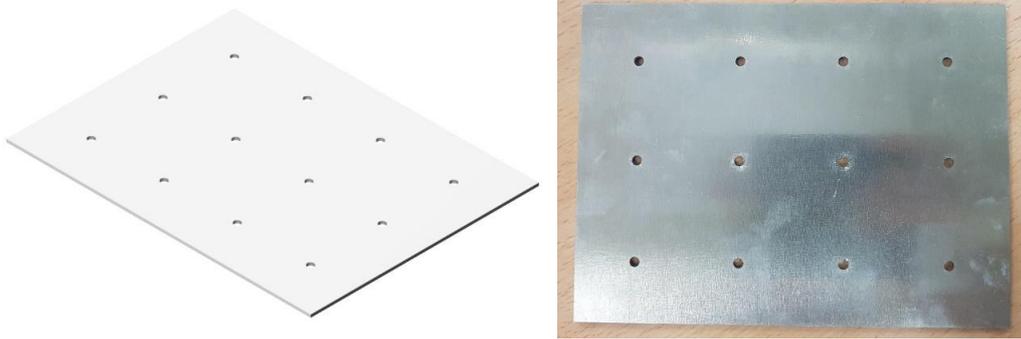


Fig. 78. Intercambiadores de calor de aluminio

Se trata de una plancha de aluminio de la serie 1000 con 12 orificios pasantes para encajar los tornillos de sujeción. Tiene unas dimensiones de 150x200 mm² y un espesor de 2 mm. La solución es económica y tiene una conductividad térmica elevada que alcanza los $\lambda=209,3$ W/mK. Teniendo en cuenta las dimensiones de la placa se puede determinar que su conductancia térmica es $K_{PLACA} = 3139,5$ W/K y para el conjunto de los 6 disipadores $K_{AL} = 18837$ W/K.

3.3.3.4.- Disipadores líquidos: frío y calor

El disipador de calor, que proporciona el foco caliente y foco frío a los módulos termoeléctricos, se ha diseñado tomando como referencia la patente US4478277A. Esta patente [127] describe un intercambiador de calor el cual trata de tener una gran uniformidad térmica en toda la superficie en contacto con el objeto a enfriar o calentar. Además, se ha diseñado con el objetivo de tener una gran integridad estructural, por lo que favorece el diseño de componentes robustos cuya fiabilidad sea de importancia. En la Fig. 79 se observa el canal y la trayectoria del fluido refrigerante, agua en este caso, que circula a través del intercambiador. En prácticamente la totalidad del intercambiador se ve cómo hay un canal con agua con poca trayectoria en el circuito situado junto al otro canal con agua que ya ha recorrido más circuito y por tanto se ha calentado. Esta mezcla de temperaturas hace que las temperaturas se promedien por zonas, obteniendo una uniformidad buena en toda la superficie del intercambiador al eliminar puntos calientes o fríos. De este modo, se consigue que todos los termoeléctricos operen en las mismas condiciones evitando que unos induzcan corrientes en otros, cosa que sería muy negativa desde el punto de vista de la eficiencia, ya que el sistema tendería a emplear energía en bombear calor en aquellos módulos con menor generación.

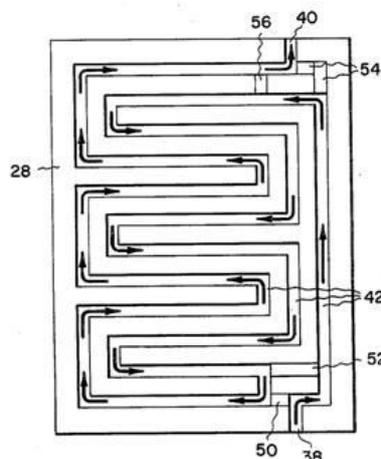


Fig. 79. Disipador de calor de uniformidad térmica superficial de la patente US 4,478,277

En las Fig. 80 y Fig. 81 se aprecian los intercambiadores de calor que se han diseñado con el objetivo de conseguir una temperatura lo más uniforme posible en las interfaces entre cada uno de los módulos termoeléctricos y el intercambiador de calor correspondiente. En ellos, se pueden apreciar los canales de paso de agua en forma de serpentina que permiten alcanzar o aproximarse en la medida de lo posible a dicho objetivo.

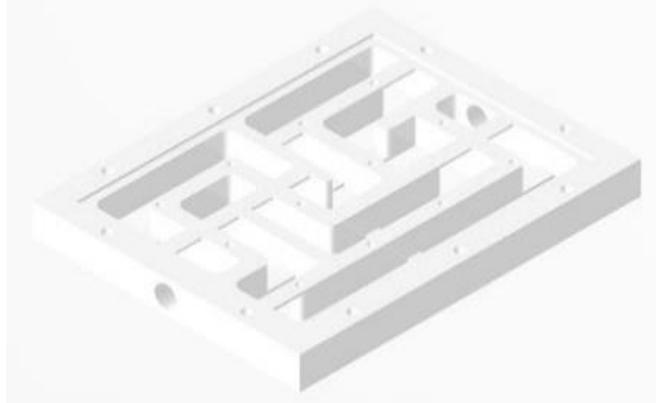


Fig. 80. Disipador líquido del lado caliente del TEG

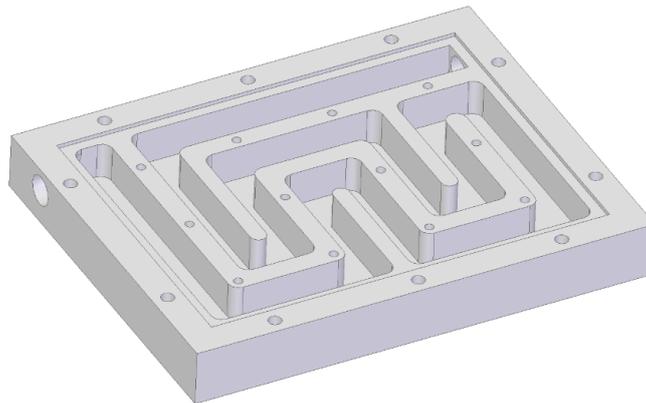


Fig. 81. Disipador líquido del lado frío del TEG

Además, los intercambiadores de calor se han montado a contraflujo para maximizar la eficiencia de intercambio de calor entre ambos circuitos hidráulicos. En la Fig. 82 se observa el intercambiador real fabricado con tecnología aditiva.

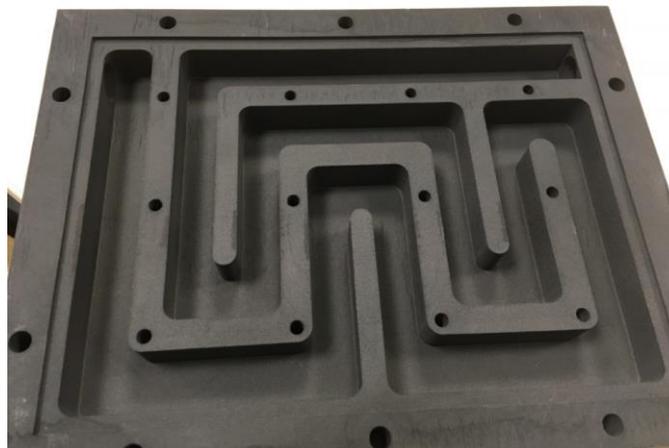


Fig. 82. Intercambiador de calor con sus canales para el paso del agua

3.3.3.5.- Juntas de Goma

Se han desarrollado a medida en una única pieza, con el fin de sellar tanto el perímetro de la pieza como cada uno de los orificios para los tornillos pasantes.

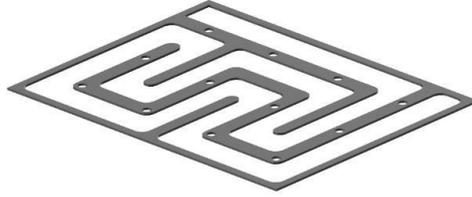


Fig. 83 Diseño CAD de juntas sellantes

Existen tres tipos de juntas distintas, una para el disipador frío y dos para el caliente, ya que, al tener dos intercambiadores de calor enfrentados, hay que generar una junta como imagen de la otras, y al no ser simétrica requerirá dos juntas diferentes.

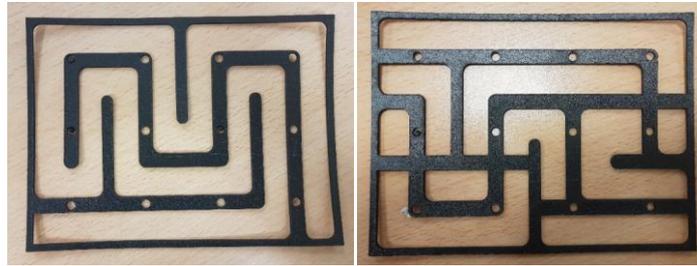


Fig. 84. Juntas de sellante de la empresa EMBEGA S.Coop.

En la Fig. 85 se muestra una junta adherida al intercambiador de aluminio y se puede apreciar el área total de intercambio térmico, donde el aluminio entrará en contacto con el agua. Tal como se puede apreciar en la Fig. 86 y Fig. 87, las áreas de intercambio en el frío y en el caliente son ligeramente diferentes. Incluso las dos caras del caliente tienen cierta diferencia entre ellas.

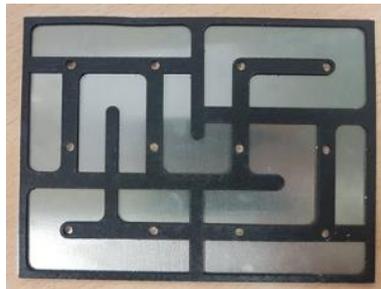


Fig. 85. Intercambiador de calor de aluminio con juntas sellantes adhesivadas.

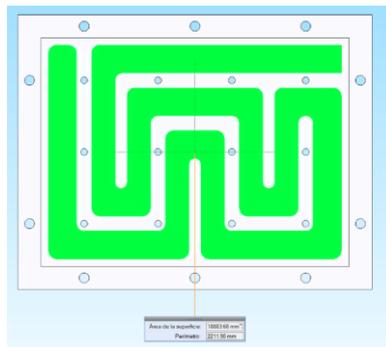


Fig. 86. Área de intercambio de calor en la parte fría

El área de intercambio del lado frío es de 18883,68 mm² por cada cara de intercambiador lo que hace un total de 113302,08 mm², ósea, 0,1133 m².

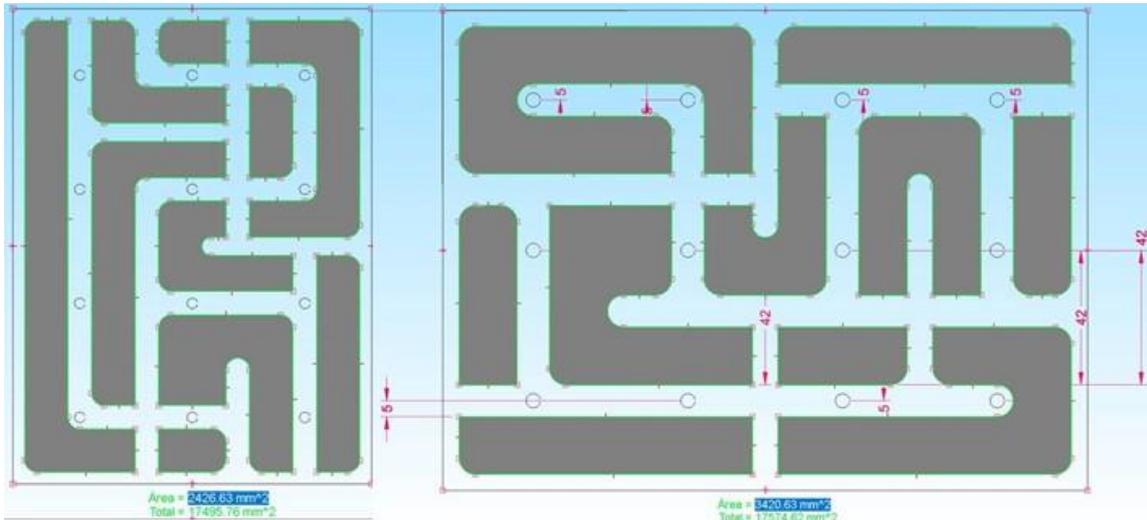


Fig. 87. Áreas de intercambio de calor de la parte caliente

Del mismo modo, el área total de intercambio del disipador caliente es de 0,1052 m².

3.3.3.6.- Diseño del conjunto

Como ya se ha definido anteriormente, el nuevo concepto de Fan-Coil va a disponer de dos circuitos hidráulicos independientes. El primero de ellos es el procedente del sistema de calefacción de la vivienda, cuyo flujo de agua es impulsado por la bomba instalada en dicho circuito. El segundo circuito es un circuito cerrado, donde el agua circula entre el sistema termoeléctrico y el intercambiador de calor agua/aire o batería encargada de transferir el calor al ambiente, gracias a la ventilación forzada provista por el ventilador. Este circuito deberá incluir su propia bomba de recirculación. El sistema generador termoeléctrico es el componente que une los dos circuitos hidráulicos.

El sistema generador termoeléctrico está dividido en tres subsistemas idénticos, y cada uno de los subsistemas constará de los siguientes elementos:

- 2 intercambiadores de calor pertenecientes al circuito secundario (circuito cerrado, sistema termoeléctrico-batería).
- 1 intercambiador de calor perteneciente al circuito primario (circuito de calefacción).
- 2 conjuntos de 12 módulos termoeléctricos, cada uno dispuesto en matrices de 3x4.
- 2 PCBs para la conexión eléctrica entre los distintos módulos termoeléctricos.
- 4 juntas sellantes.

A continuación, en la Fig. 88 se muestra el explosionado de los disipadores de calor frío y caliente y en la Fig. 89 se detalla a su vez un explosionado del conjunto donde se pueden ver los diferentes componentes mencionados.

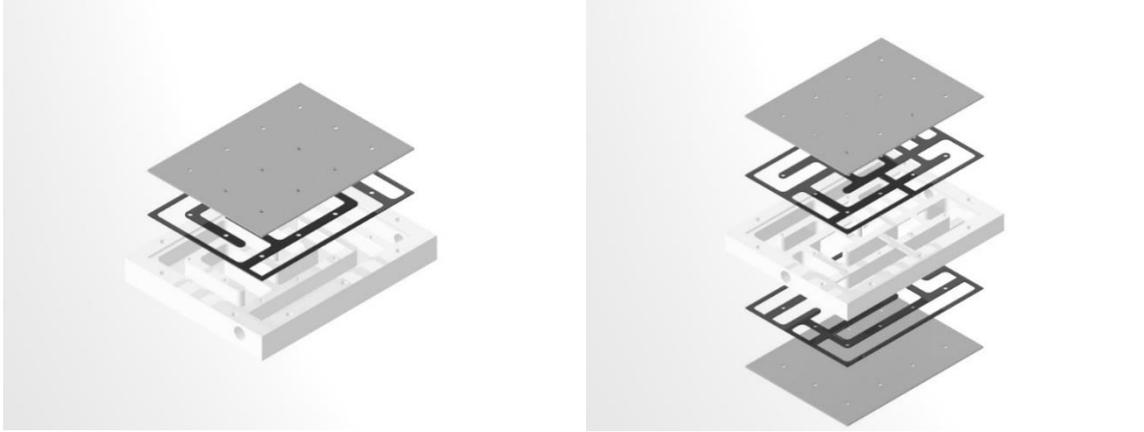


Fig. 88. Explosionado CAD del conjunto intercambiador de calor frío y caliente.

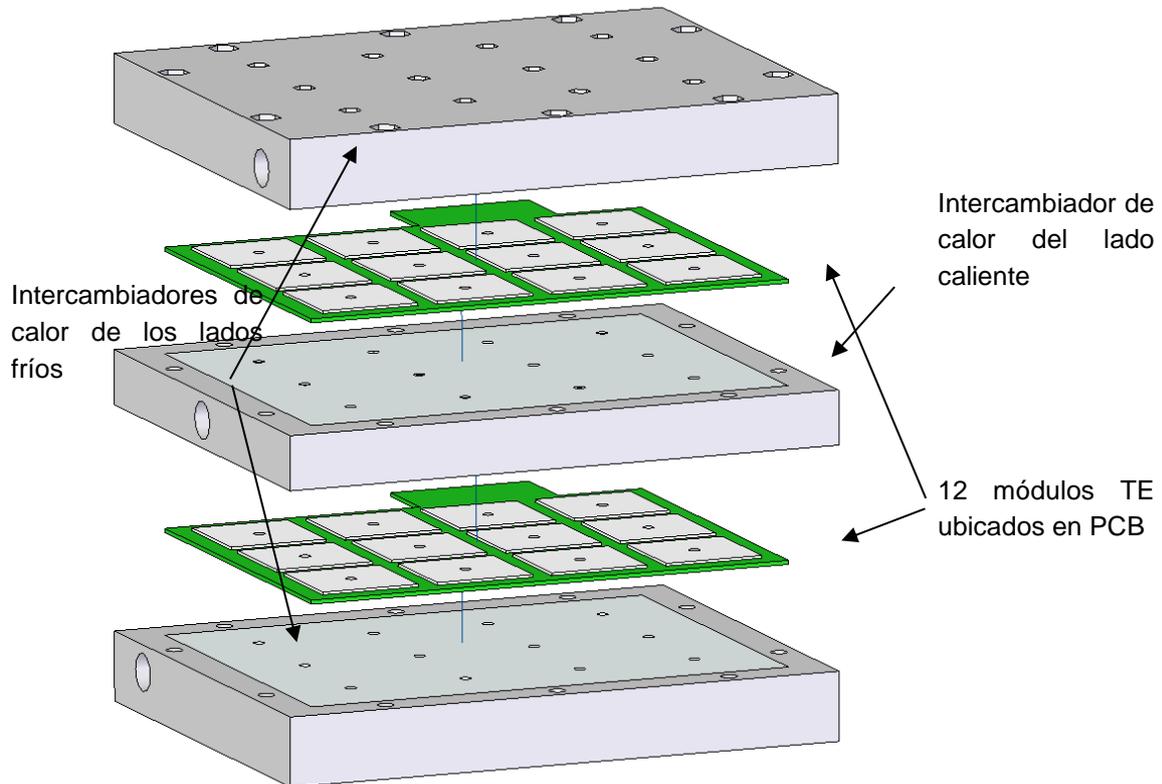


Fig. 89. Explosionado CAD del sistema modular termoeléctrico

De la Fig. 90 a la Fig. 94 se pueden apreciar los pasos del proceso de montaje de un sistema de generación termoeléctrico de 6W, con lo conectores para el circuito hidráulico ya incorporados.

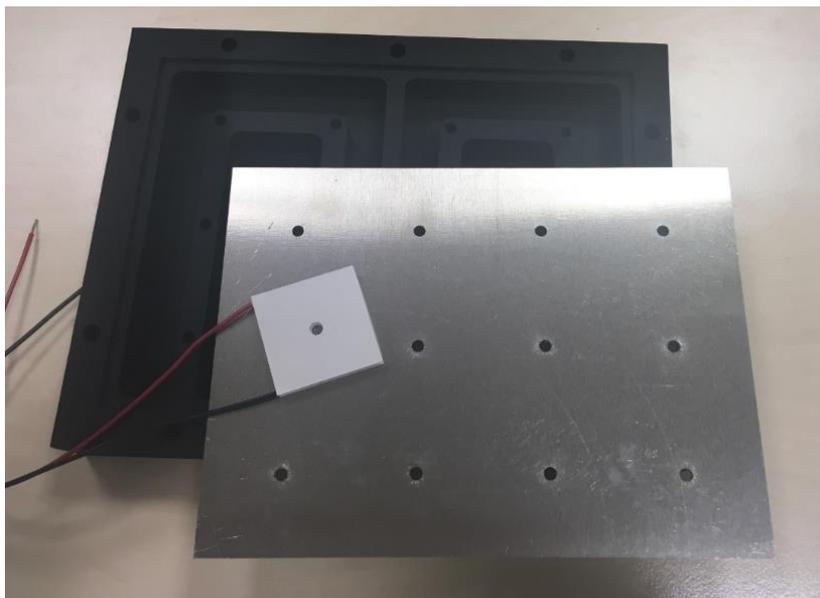


Fig. 90. Conjunto intercambiador y módulo termoeléctrico

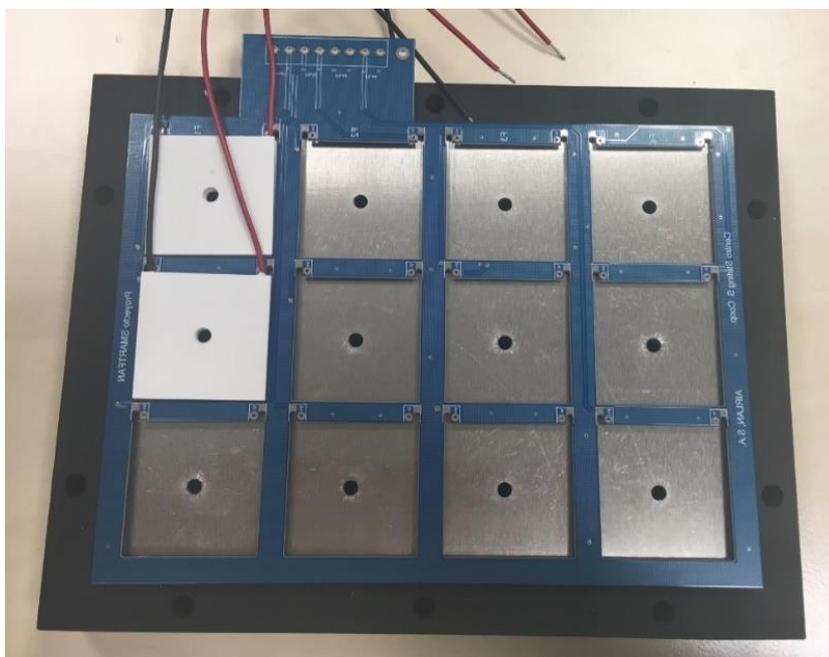


Fig. 91. Disposición del intercambiador con la PCB y los módulos termoeléctricos

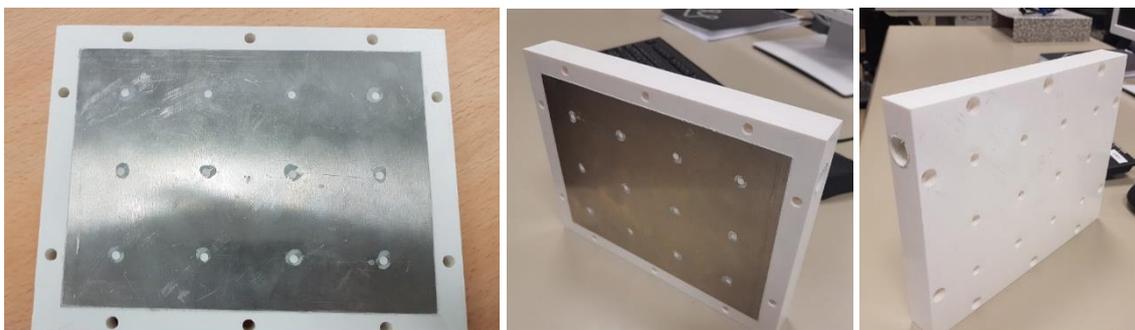


Fig. 92. Prototipo del bloque de refrigeración

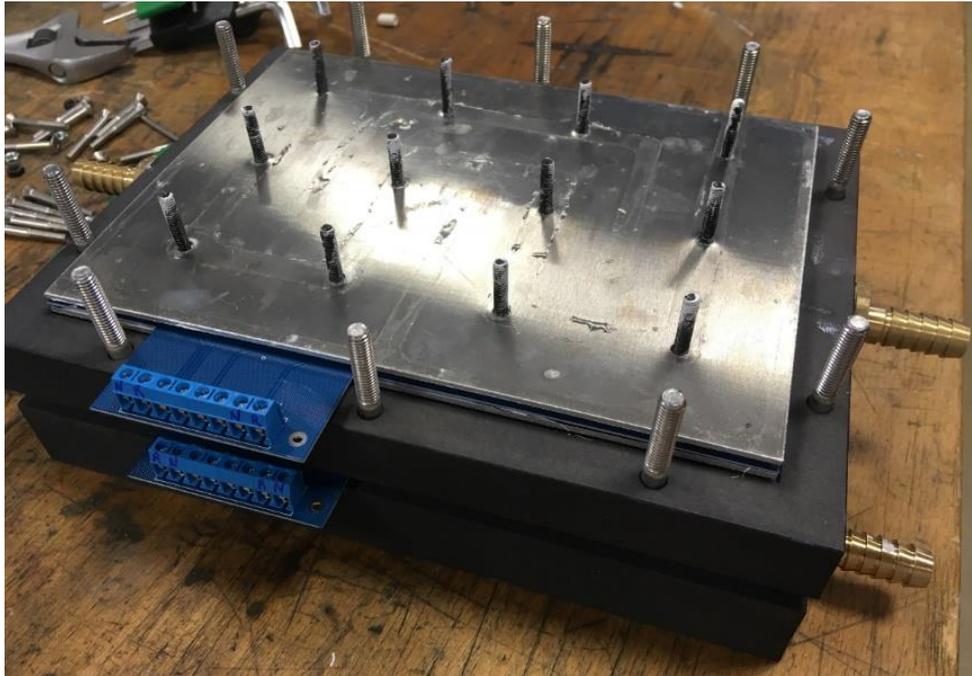


Fig. 93. Montaje del sistema modular termoeléctrico



Fig. 94. Sistema modular termoeléctrico

3.3.4.- Sistema generador termoeléctrico de 18 W

El conjunto del sistema generador de 18W está constituido por tres bloques o módulos de 6W, con sus correspondientes interconexiones hidráulicas y eléctricas.

Tras el montaje y la caracterización termoeléctrica de los sistemas modulares, se procederá a la instalación del sistema dentro de la carcasa del ventilador tal como se detallará en el Capítulo 4, incluyendo: los tres sistemas modulares, los dispositivos electrónicos de adecuación de la señal eléctrica, así como el intercambiador de calor, el ventilador y la bomba.

3.3.4.1.- Conexión eléctrica e hidráulica

La conexión hidráulica se realiza mediante tubería de plástico flexible (ver Fig. 95), que, si bien no garantiza un funcionamiento robusto, permite alojar con comodidad el sistema generador

termoeléctrico en el interior de ventiloconvector y realizar los ensayos con suficiente confianza de estanqueidad.

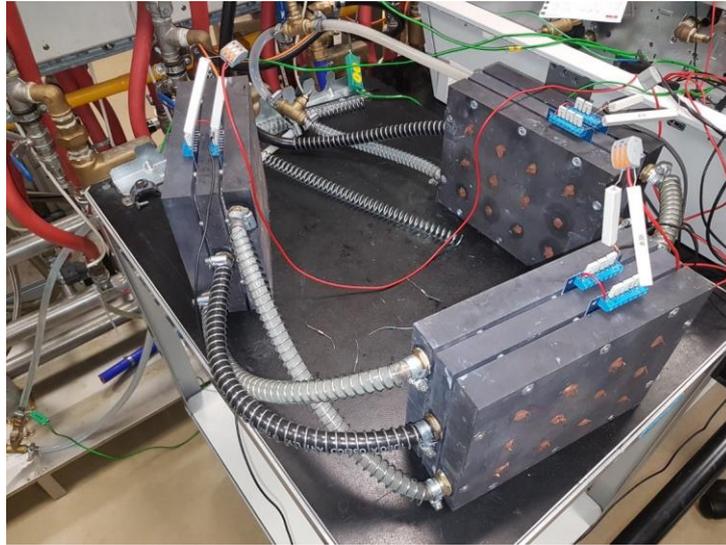


Fig. 95. Conexiones hidráulicas de los circuitos de calentamiento y refrigeración del sistema generador termoeléctrico de 18 W

3.3.4.2.- Conexión eléctrica e hidráulica

Tal como se ha explicado a lo largo de la memoria, cada bloque de 6W conecta eléctricamente en serie tanto las 4 ramas de cada tarjeta electrónica (puentes eléctricos de color blanco en la Fig. 96 y Fig. 97), como las propias tarjetas entre si (cable rojo en la Fig. 96 y Fig. 97).

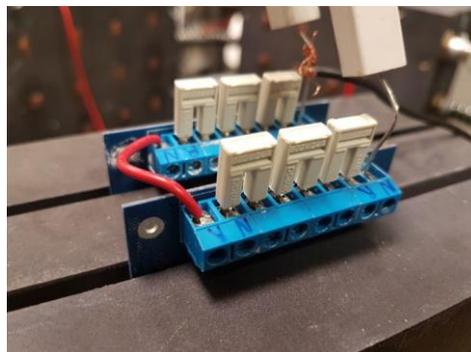


Fig. 96. Conexión eléctrica serie mediante puentes eléctricos del sistema generador termoeléctrico de 6W

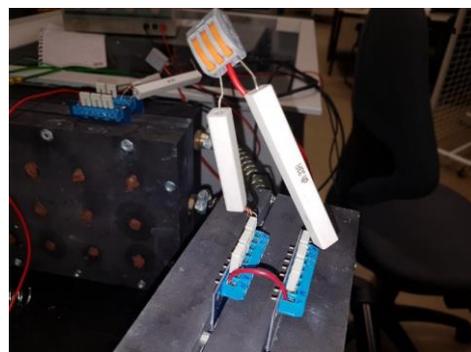


Fig. 97. Resistencias de carga adaptada conectadas al sistema generador termoeléctrico de 6W

La resistencia de carga del sistema generador (Fig. 97) representa la resistencia equivalente que tendría que observarse hacia el ventiloconvector para entregar máxima potencia.



3.4.- Entorno de caracterización del TEG

Para la captura de datos, se ha desarrollado un banco de ensayos para caracterizar el sistema termoeléctrico, en el cual se han colocado los tres bloques de módulos, generando un gradiente térmico con dos flujos de agua a diferente temperatura que hará que los TEG generen la energía necesaria para su caracterización y validación. En este caso, estas cargas han sido simuladas por resistencias eléctricas, logrando dos combinaciones: funcionamiento en circuito abierto y en circuito cerrado con carga adaptada para máxima potencia.

3.4.1.- Banco de ensayos para la caracterización del sistema termoeléctrico

Los elementos que componen el banco de ensayos se pueden incluir en cuatro categorías, compuestas estas por los elementos del circuito hidráulico, elementos de generación, elementos eléctricos de medición, y sistema de recogida de datos:

- **Elementos del circuito hidráulico:** En este grupo se pueden definir todos esos elementos que harán funcionar al sistema proporcionándole el fluido necesario, en este caso agua. Entre estos, se encuentran las tuberías y juntas necesarias, junto con la bomba del circuito caliente y la toma de agua del circuito frío, el sistema de calentamiento del punto caliente, y los propios módulos que albergan los grupos de termoeléctricos. Estos últimos tienen la función de intercambiador de calor, los cuales generarán el necesario gradiente térmico.
- **Elementos de generación:** En este apartado se encuentran los elementos termogeneradores, que nos proporcionarán la potencia eléctrica deseada debido al gradiente térmico deseado.
- **Elementos de medición:** La tercera categoría de elementos que componen el banco de ensayos son los sensores encargados de adquirir todas las variables de estudio. Un total de 4 termopares tipo K, adecuados para el funcionamiento con fluidos, dos caudalímetros y una serie de resistencias para medir la diferencia de potencial simulando distintas casuísticas. Los termopares se encuentran situados en a la entrada y salida del TEG, dos para la parte fría y dos para la caliente, aunque por motivos operativos relativamente lejos de los puntos de entrada y salida, lo que puede ser una fuente de error, habiendo resultado óptimo situarlos justo a la entrada del primer bloque y salida del último.
- **Elementos de recogida de datos:** Por último, los elementos encargados de una correcta recogida de datos provenientes del banco de ensayos. Estos estarán compuestos por un chasis de la marca National Instruments, con sus respectivas tarjetas de medición analógica para la diferencia de potencial y termopares, todo ello unido a un ordenador vía USB.

En la Fig. 98 se observa el banco de ensayos al completo con todos los elementos mencionados.

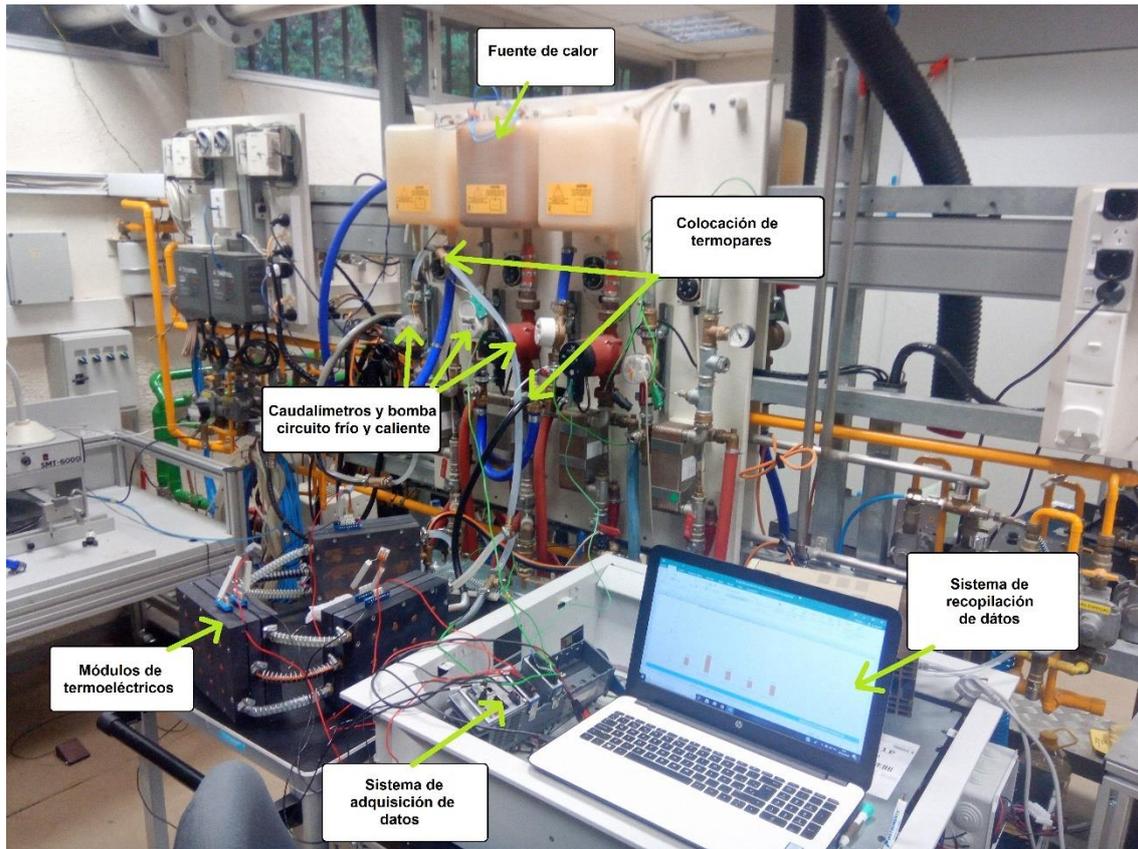


Fig. 98. Banco de caracterización del sistema termoeléctrico

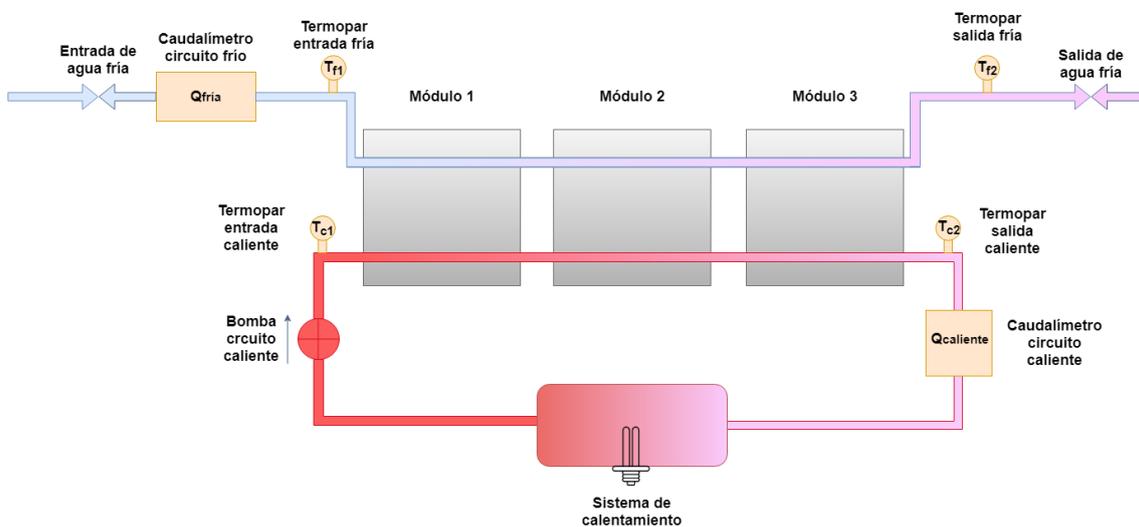


Fig. 99. "Process and Instrumentation" del sistema al completo

La Fig. 99 muestra un "Process and Instrumentation" del sistema al completo, mostrando en la figura tanto el proceso como todos los elementos y la instrumentación instalada. Por lo tanto, incluye todos los componentes, como los sensores y los elementos de medición, a falta del sistema de adquisición y recopilación de datos. Los sensores están marcados en naranja, tanto termopares como caudalímetros, y los módulos marcados en negro. A parte de esto, se han añadido las tuberías de ambos fluidos, frío y caliente, coloreadas en base al ciclo térmico que les pasa.

A continuación, se detallan los elementos utilizados, desde las tuberías hasta los módulos termoelectrónicos, explicando su uso y funcionamiento.

3.4.1.1.- Instalación hidráulica

Para hacer circular ambos circuitos de fluidos correctamente, se necesitan elementos que transporten estos de manera correcta, así como juntas, espigas, juntas en T, y los elementos de tubería. Para que la instalación fuese sencilla se han utilizado tuberías de PVC transparente, de 15 y 11 mm de diámetro exterior e interior respectivamente. Como elemento de sujeción se han utilizado bridas metálicas.

A parte de las facilidades de construcción que brinda este material, aporta una alta resistencia a la temperatura y a la presión, teniendo un bajo peso debido a su baja densidad, y ofrece una baja conductividad térmica, haciendo más eficiente el banco e impidiendo varianzas en la temperatura desde que el fluido se mide hasta que se procesa.

3.4.1.2.- Módulos de termoelectrónicos

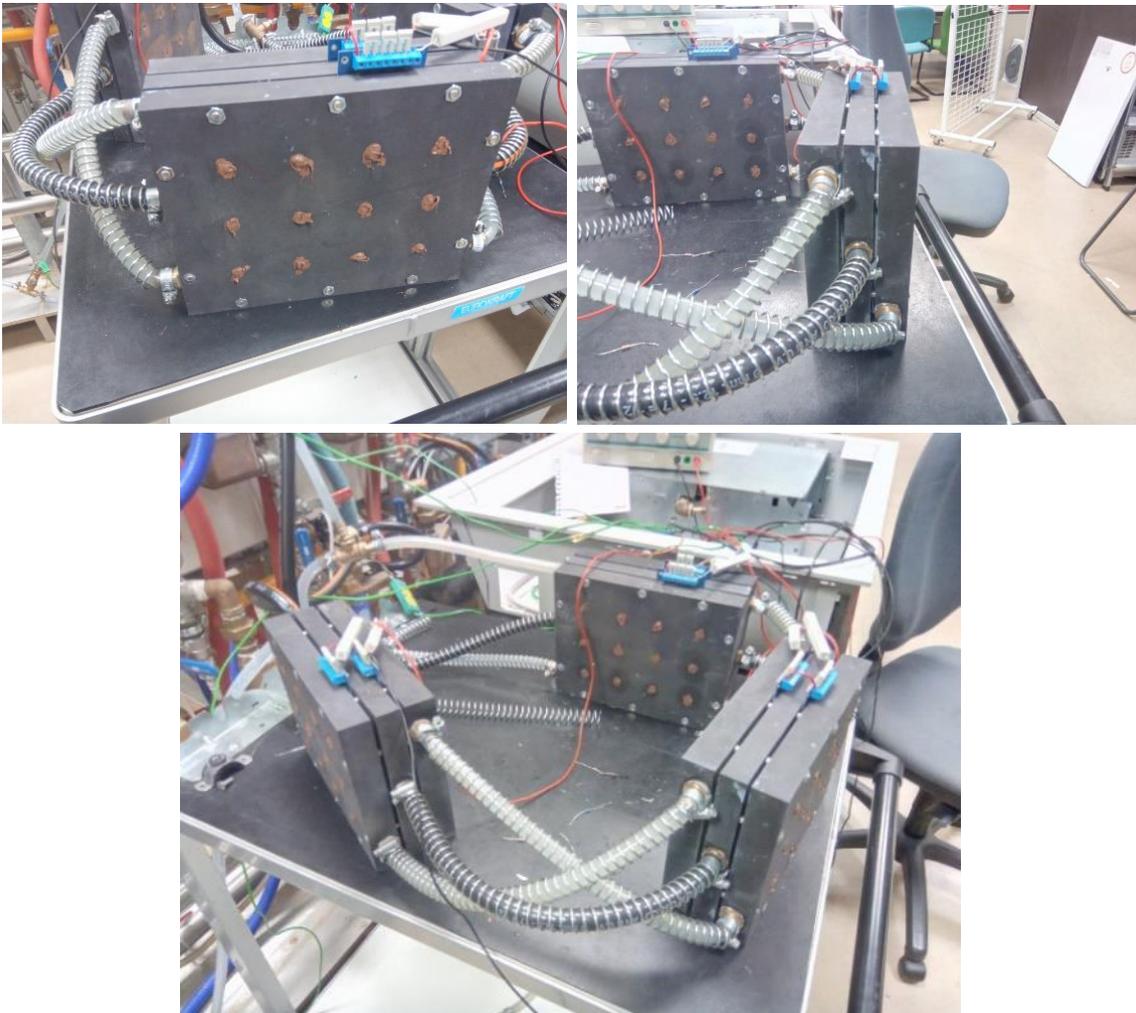


Fig. 100. Módulos de termoelectrónicos

Esta será la parte del banco en la que se generará un potencial eléctrico mediante un gradiente térmico, obtenido al cruzar ambos flujos (frío y caliente) en compartimentos adjuntos en su interior. Entre estos estarán colocados los módulos termoelectrónicos que generarán conjuntamente la diferencia de potencial mencionada que se desea medir gracias a la diferencia

de temperatura, que, gracias al diseño de su geometría, se repartirá equitativamente por toda la superficie. En total tres módulos como este, en los cuales se albergarán 2 PCB-s de 12 módulos Peltier en serie, formarán el conjunto, teniendo en total 72 módulos termoeléctricos.

3.4.1.3.- Bomba del circuito caliente

La bomba utilizada en el banco de ensayos es una bomba Grundfos de la serie ALPHA 2, especialmente diseñada para funcionar en circuitos de calefacción, con un rango de temperaturas entre 2 y 110 °C, capaz de bombear hasta 7,8 l/min. Una característica necesaria que presenta es la posibilidad de escoger entre tres potencias de funcionamiento, que se adecuarán a una curva de velocidad constante dependiendo del nivel, elegible mediante un selector de posición (I, II, y III). Así, a un mismo voltaje de alimentación, la bomba es capaz de ofrecer tres caudales diferentes ante una misma instalación, dictados por las curvas ofrecidas por el fabricante. Esta versatilidad es muy importante para el estudio del sistema ya que de esta forma se pueden obtener diferentes puntos de funcionamiento para la misma instalación al variar el selector.



Fig. 101. Bomba del circuito caliente

3.4.1.4.- Sistema calefactor

Se empleará un calentador resistivo de 2 KW, el cual está compuesto de tres resistencias, las cuales calentarán el fluido en el tanque de agua caliente de manera homogénea. Este tiene dos orificios, uno de entrada y otro de salida, colocados en la parte inferior, que ayudaran a homogeneizar la temperatura y evitar puntos calientes, al tener un flujo repartido que abarque todo el tanque.



Fig. 102. Sistema calentador

La resistencia eléctrica es de 19,8 Ω a 20°C y 20,3 Ω a 76°C, capaz de generar cuando se alimenta con 225 Vef una potencia eficaz de 2556 WRMS a 20°C y 2493 WRMS a 76°C.



3.4.2.- Mediciones y sensórica

En este apartado se explicarán detalladamente los elementos utilizados para realizar las mediciones, así como los elementos utilizados para adquirir, recopilar y guardar estos datos.

3.4.2.1.- Caudalímetros

Se usarán dos caudalímetros manuales para observar y ajustar el caudal de ambos circuitos al momento, estos, como se puede apreciar en la Fig. 103, están colocados justo después de cada entrada de agua por conveniencia, aunque su colocación podría ser en cualquier punto ya que los circuitos no tienen ramificaciones y este no variará, menos en estados iniciales hasta que se cumpla la purga total del sistema.

3.4.2.2.- Adquisidor de datos

El dispositivo de captura de datos que permitirá realizar las lecturas será un chasis compact RIO 9045 de National Instruments, siglas que hacen referencia a una estación de captura de datos modular, la cual tiene distintas tarjetas, capaces de recibir tanto señales analógicas como digitales, dependiendo de la estructura de esta última. En este banco en específico se han utilizado las tarjetas de medida analógica de voltajes NI 9021, con un rango de -10 a 10 V y 7 canales, y la NI 9023, capaz de albergar y procesar la información de hasta 15 termopares distintos, pudiendo seleccionar el tipo de estos, siendo en este caso, el tipo K.



Fig. 103. Caudalímetro circuito frío (I) y circuito caliente (II)

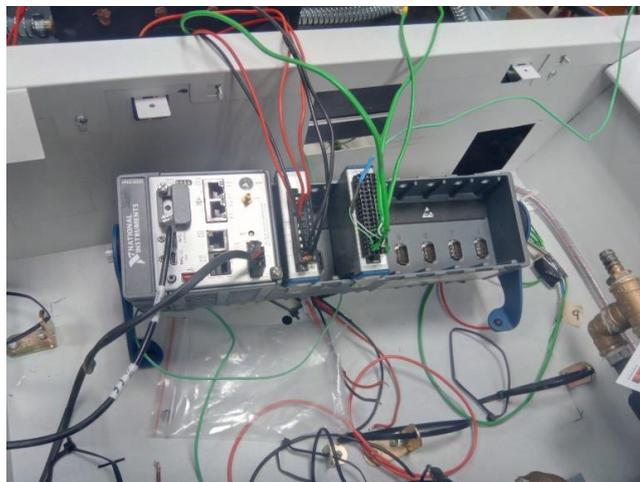


Fig. 104. cRio con sus respectivas tarjetas



Fig. 105. Tarjetas NI 9201 (I) y NI 9213 (II)

Todo esto ha sido conjuntamente programado en el sistema de recopilación de datos, este se basa en un software desarrollado en la herramienta de National Instruments, denominada Labview. En las próximas figuras se puede apreciar el programa generado junto a su interfaz.

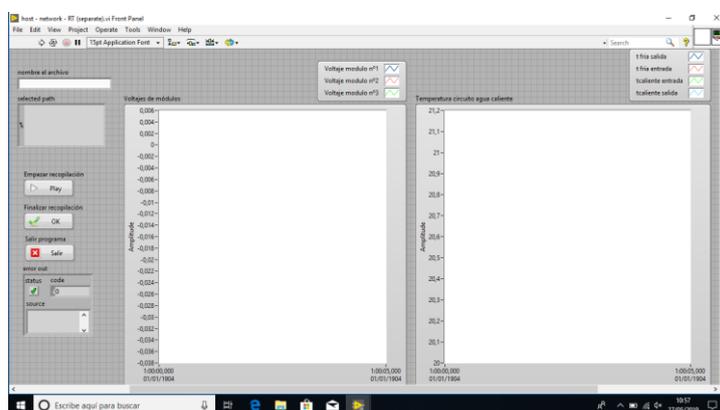


Fig. 106. Interfaz de captura de datos en Labview

Debido a que se está usando un compact RIO y no un compact DAQ, se necesitará dividir el programa en dos fases: la interna que se dedicará a leer los datos y enviarlos al ordenador (programada en el chasis), y la externa que recibirá, graficará y guardará esos datos a gusto del usuario, ya en el propio ordenador.

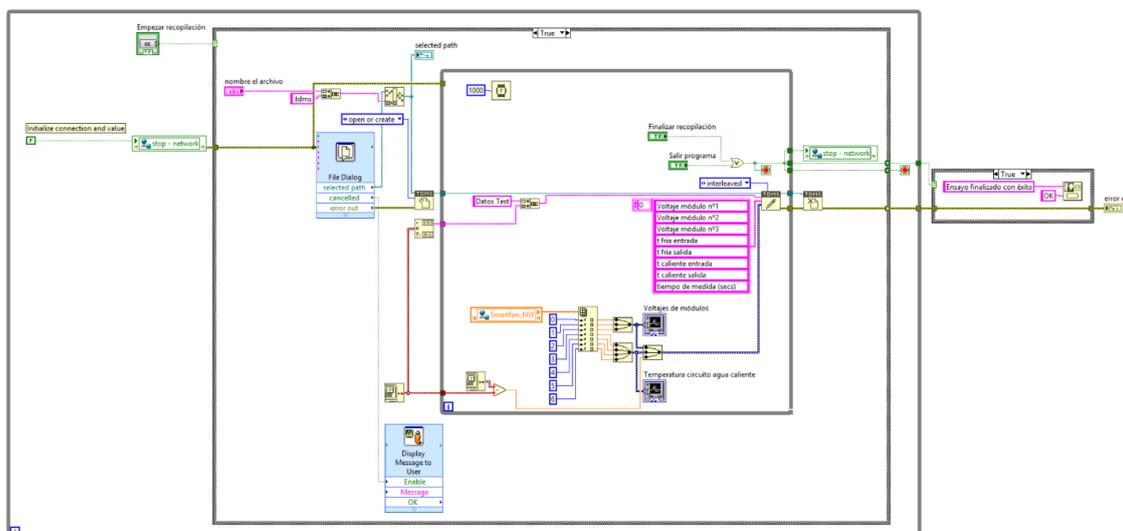


Fig. 107. Codificación del programa, fase de recepción, análisis y guardado de datos

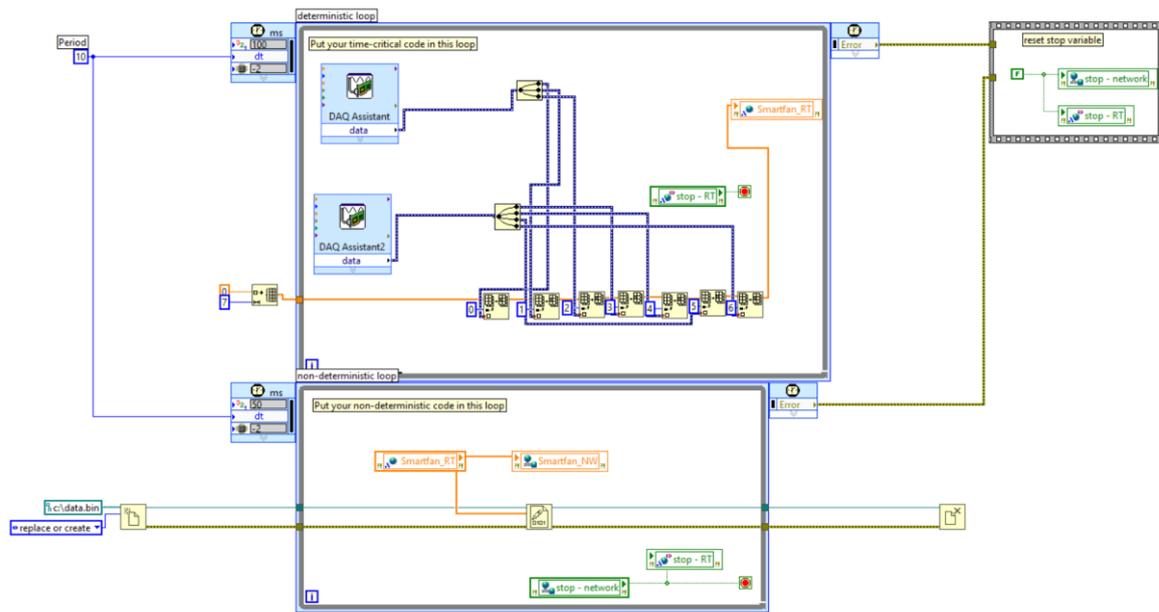


Fig. 108. Codificación del programa, fase de lectura y envío de datos

3.4.2.3.- Medición de la temperatura, termopares tipo K

Existen un total de cuatro termopares tipo K a lo largo del banco de ensayos que miden la temperatura de los fluidos a la entrada y salida de los bloques termoeléctricos, y junto con los caudalímetros, permiten calcular la transferencia de calor realizada, conectados directamente a la mencionada tarjeta NI 9023.

Los sensores utilizados para obtener la temperatura del fluido son termopares de cromel Ni-Cr de tipo K, especialmente envainados para medir líquidos, aire o gases cuando se encuentran sumergidos en ellos. Estos tienen un rango de medición que oscila entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una buena resolución ($41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$). A esto hay que añadirle que la tarjeta utilizada agrega automáticamente la corrección de la denominada “cold junction”, haciendo las medidas mucho más fiables.



Fig. 109. Termopar tipo K, colocado en la salida del circuito de agua fría

3.4.2.4.- Medida de potencia eléctrica generada

Para medir la potencia generada por los módulos se conectarán directamente los terminales positivo y negativo de cada módulo a la tarjeta NI9201, pero se utilizará un divisor de tensión para su lectura, ya que el rango que la tarjeta de captura permite leer es inferior al voltaje generado por los módulos. Cambiando el valor de estas se podrán simular diferentes cargas conectadas al circuito.

3.4.3.- Ensayos de caracterización

Antes de definir ambos ensayos se ha medido la impedancia de cada módulo con un RLC, el cual nos da un valor muy aproximado con poco margen de error al utilizar el método de cuatro hilos para realizar las medidas. La medida ha arrojado una Resistencia interna media de $41,2 \Omega$ entre los tres módulos, y se ha seleccionado esta carga para hacer una aproximación equitativa en las tres cargas.

Para caracterizar el funcionamiento de los módulos termoeléctricos se han simulado dos cargas distintas: una de resistencia ($50 \text{ k}\Omega$) de valor elevado para simular un circuito abierto, 4 órdenes de magnitud superior a la resistencia de un módulo TE, y otra carga de $41,2 \Omega$ para medir potencia y que se adecúe a la resistencia interna, obteniendo así la máxima potencia eléctrica posible.

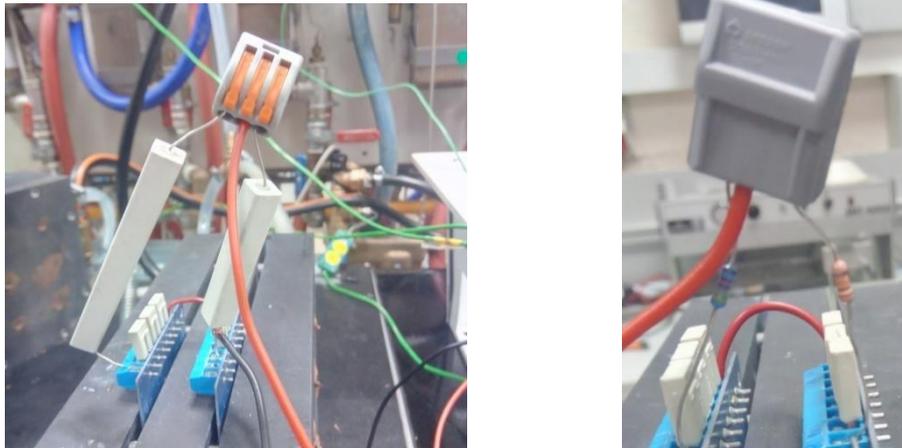


Fig. 110. Resistencias de carga adaptada (I) y en circuito abierto (II)



Fig. 111. Equipo de instrumentación electrónica RLC Bridge

Igualmente se ha tenido que utilizar un puente resistivo con la carga adaptada, repartiendo el voltaje entre distintas resistencias para ajustar el rango proporcionalmente, ya que el límite de medida de la tarjeta de voltaje NI 9201 es de -10 a 10 voltios.

Cabe señalar que se ha establecido un régimen de ensayo en el que partiendo de temperatura ambiente se aporta en máximo de energía que el sistema permite de modo constante hasta alcanzar un estado estacionario a la mayor temperatura posible, de modo que se dispongan de las lecturas de valores de temperatura y tensión intermedios a lo largo del tiempo.

3.4.3.1.- Ensayos en circuito abierto

Para estos ensayos, se ha seleccionado una carga muy alta en comparación con la resistencia interna, para simular el voltaje generado en circuito abierto como se ha mencionado antes. Para ello, se ha optado por poner un divisor de tensión con dos resistencias en serie de 10 y 40 K Ω , y medir el voltaje que cae en la resistencia de menor valor. El valor de tensión final a considerar será el relativo a la relación entre las resistencias, siendo necesario aplicarle un factor de corrección a la tensión capturada para determinar el valor de la tensión final.

Las cargas disponibles comercialmente no se ajustarán a la carga necesaria, más si se tiene en cuenta las tolerancias respecto del valor nominal y su variación con la temperatura, por lo que es necesario medir la resistencia de cada carga y hacer los ajuste sobre los valores de tensión capturados.

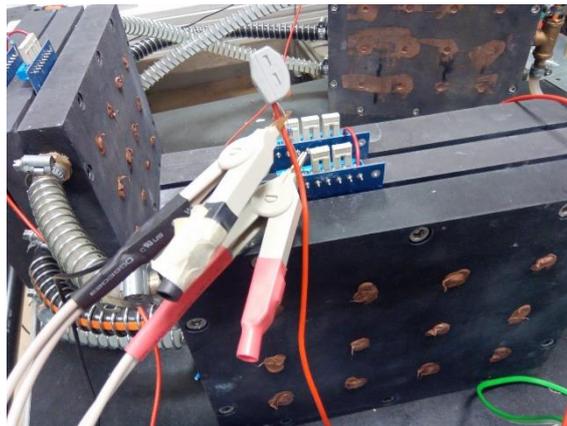


Fig. 112. Figura 15: Medida de la carga con el RLC

En la Fig. 113 se muestra un ejemplo de captura de datos con los datos que se obtendrían en cada ensayo en circuito abierto. Los datos así mostrados mezclan tensiones y temperaturas, por lo que en posteriores análisis se realiza un tratamiento de los mismos para facilitar su lectura.

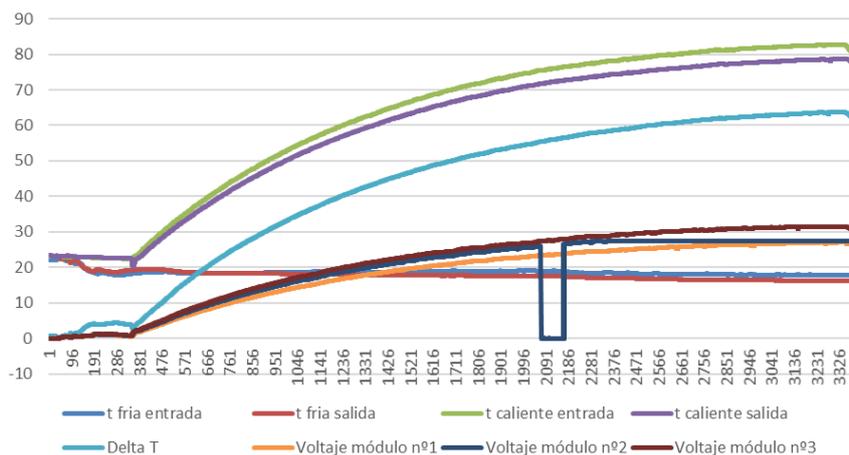


Fig. 113. Captura de datos de puesta a punto del banco de ensayos en circuito abierto.

Se obtiene un voltaje que crece con cierta proporcionalidad a la diferencia de temperatura, llegando este a un máximo en el que se encuentra una asíntota a la cual se aproxima. De la misma manera la temperatura alcanza un estado en el que el calor aportado y el calor disipado se igualan, llegando al equilibrio térmico.

Cabe mencionar que el módulo 2 sufrió un desenganche momentáneo de la sonda de la tarjeta de captura y produjo el efecto visible en el minuto 34 (2071 segundos) dando valor de voltaje 0.

3.4.3.2.- Ensayo a circuito con carga adaptada

De la misma manera que se ha realizado el primer ensayo, en este se ha utilizado un divisor de tensión en la carga con dos resistencias de potencia, de 33 Ω y 8,2 Ω . De esta manera el voltaje total será el medido en la carga de menor valor multiplicado por un factor de corrector de cuatro. Así se obtienen los datos mostrados en la Fig. 114 relativos a un ensayo de puesta a punto del sistema de captura de datos con carga adaptada.

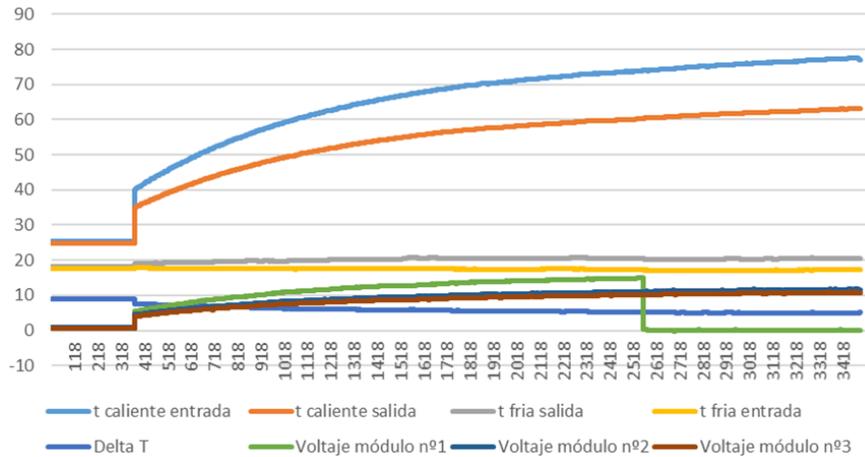


Fig. 114. Captura de datos de puesta a punto del banco de ensayos con carga adaptada.

Se puede apreciar cómo, durante el ensayo un termoelemento sufrió una rotura quedando en circuito abierto y afectando irremediablemente a la medida del ensayo al estar todos en serie. Tras el ensayo el módulo o módulos deteriorados se puentean y su falta de aportación a la tensión se corrige para los cálculos ya que no son activos eléctricamente, pero sí térmicamente.

3.5.- Modelo computacional unidimensional equivalente del sistema termoeléctrico.

El sistema termoeléctrico se comporta a rasgos generales como una caja negra (Fig. 115) en la que existe un calor de entrada ($Q_H=Q_{IN}$) que se transforma en un calor de salida ($Q_C=Q_{OUT}$) y una potencia eléctrica generada ($W=P_e$).

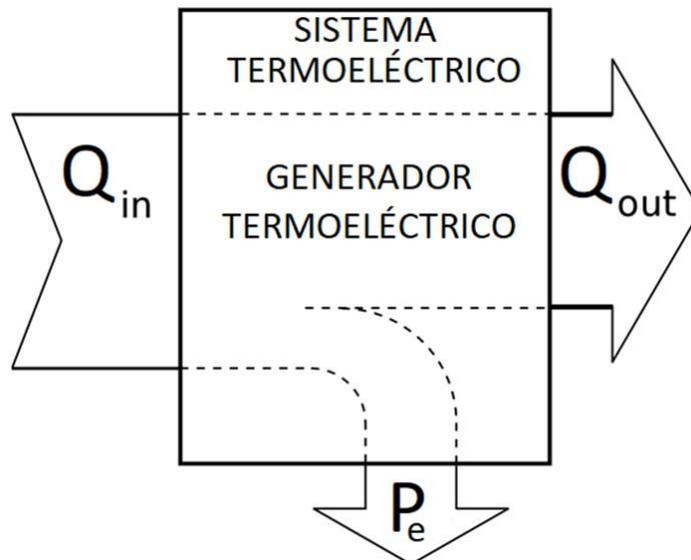


Fig. 115. Esquema básico de potencias del sistema termoeléctrico

De acuerdo con este esquema se podría definir la eficiencia del sistema térmico según (71).

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_{in}|} \quad (53)$$

Sin embargo, solo ciertos parámetros son conocidos mediante medición directa, como son las temperaturas de entrada y salida del lado frío y caliente y las temperaturas y tensiones en bornes del generador termoeléctrico. Siendo necesario definir un modelo completo que abarque también a los disipadores y establecer una metodología de cálculo para conocer las características del sistema termoeléctrico, definiendo unas condiciones de contorno y haciendo una serie de asunciones que permitan resolver las ecuaciones que modelizan el sistema.

Comprender el comportamiento del TEG es importante para optimizar la recuperación de energía del calor residual, cuando ambas uniones se exponen fuentes de calor variable. Una, la caliente, procedente de la caldera que se encenderá y apagará dependiendo de la temperatura de consigna indicada a la caldera y la histéresis de encendido programada, la otra, lado frío, procedente del circuito cerrado de enfriamiento del Fan-Coil, y cuya temperatura se irá elevando a medida que la temperatura de la habitación se acerca a la de consigna.

Diferentes investigadores han desarrollado modelos para configuraciones muy similares [108] [128] [129], pero con distintas aplicaciones y condiciones de funcionamiento. Algunos analizan escenarios de funcionamiento en estado transitorio, pero la mayoría de los modelos asumen una fuente de calor ilimitada o escenarios de funcionamiento en estado estacionario. El análisis transitorio completo es menos habitual, más si se tuviera en cuenta la dependencia de las propiedades de los materiales con la temperatura y el efecto de los contactos térmicos y eléctricos.

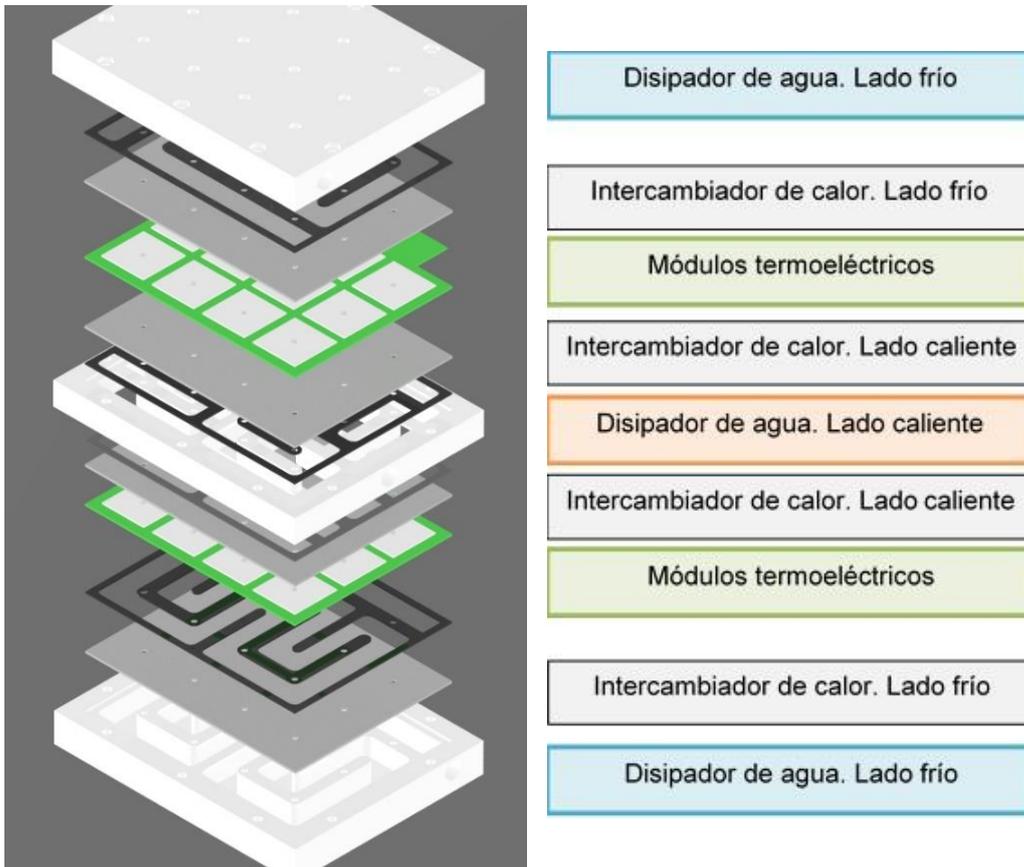


Fig. 116. Explosión del diseño general simétrico del sistema termoeléctrico.

En la aplicación práctica contemplada en esta tesis la fuente de calor residual no es ilimitada y tiene un flujo de calor inestable y por ello tanto las condiciones de temperatura en el lado caliente y frío del TEG como las corrientes eléctricas varían con el tiempo, pero su variación será lenta por lo que será necesario determinar en un inicio si se pueden aplicar condiciones de situación estacionaria para realizar los cálculos que permitan caracterizar la configuración básica del sistema termoeléctrico representado en el diseño general ilustrado en la Fig. 116.

De acuerdo con el diseño general, un bloque con módulos termoeléctricos se intercala entre el sistema calentador líquido, con agua procedente del sistema de calefacción, y el sistema de refrigeración líquido, que se enfría a través de un Fan-Coil contra el aire de una habitación. Un intercambiador de calor de aluminio se sitúa entre cada sistema disipador y el bloque termoeléctrico. El sistema total tiene simetría con respecto al centro del sistema calentador líquido, situando un bloque termoeléctrico, con su correspondiente sistema de refrigeración e intercambiadores de calor, a cada lado de bloque calentador líquido, quedando este, por tanto, totalmente rodeado y minimizando las pérdidas térmicas. El sistema total puede ser tratado como un sistema adiabático de transferencia de calor por convección y conducción.

3.5.1.- Hipótesis y condiciones de contorno

Se asumen todos los materiales homogéneos e isotrópos.

Para la evaluación analítica, las conductividades térmicas, la resistividad eléctrica y las capacidades caloríficas específicas de los materiales no termoeléctricos se asume que son constantes en el interior del rango de temperatura de funcionamiento, y que en las superficies laterales del elemento TEG las condiciones límite se suponen adiabáticas. Sin embargo, la conductividad térmica, la conductividad eléctrica y el coeficiente de Seebeck de los semiconductores sí se considerarán dependientes de la temperatura.

Debido al hecho de que este estudio se centra en la baja temperatura, el efecto Thomson puede despreciarse [118].

Además, la temperatura inicial del sistema es igual a la temperatura ambiente, lo que significa que las temperaturas a ambos lados del elemento TEG son las mismas y, en consecuencia, los valores de tensión iniciales son cero. Finalmente, se consideran, tal como algunos investigadores indican [130], una respuesta instantánea a los transitorios de carga eléctrica.

Se desprecia también la fuga de calor a través de las capas de soldadura y las pistas conductoras de cobre. El flujo de calor y la corriente en el sistema son asumidos como unidimensionales.

Por último, se desprecian las pérdidas de calor debidas a la radiación y a la convección transversal. Y debido a la configuración del sistema termoeléctrico se considera que todo el calor desprendido del sistema calentador líquido fluye a través de los módulos termoeléctricos, despreciando pérdidas en el disipador caliente, por tanto, hasta el sistema de refrigeración, que debido al área superficial de intercambio con el ambiente y a carecer de aislamiento, tendrá un gradiente de temperatura con el ambiente, por lo que no se consideran sus Pérdidas despreciables a pesar de que la temperatura máxima alcanzada es baja y cercana con respecto a su entorno.

3.5.2.- Ecuaciones que gobiernan el sistema termoeléctrico

Para determinar analíticamente las temperaturas nodales internas y externas del sistema de generación termoeléctrico es necesario conocer el flujo de calor debido a los efectos termoeléctricos, teniendo en cuenta la no linealidad de las ecuaciones termoeléctricas.

Tabla 21. Terminología empleada

TEG	Generador Termoeléctrico		
T_1, T_2	T ^{as} frías de entrada de agua	T_{PF1}	Temperatura del plato frío con el agua
T'_1, T'_2	T ^{as} frías de salida de agua	$T_{PF1\infty}$	Temperatura foco frío
T_3	T ^a caliente de entrada de agua	T_{TEG1F}	Temperatura en la parte fría del TEG
T'_3	T ^a caliente de salida de agua	T_{TEG1C}	Temperatura en la parte caliente del TEG
$R_{L,TEG1}$	Resistencia de Carga del TEG1	T_{PC1}	Temperatura del plato caliente con el agua
Q_{IN1}	Flujo de calor de entrada al bloque	K_{PC1}	Conductancia térmica del plato caliente
Q_{C1}	Flujo de calor de entrada al TEG 1	K_{TEG1}	Conductancia térmica del TEG
Q_{F1}	Flujo de calor de salida del TEG 1	K_{PF1}	Conductancia térmica del plato frío
Q_{OUT1}	Flujo de calor de salida al disipador frío	h_{PF1}	Coef. Transferencia térmica del plato frío
n	Número de pares termoeléctricos	h_{PC1}	Coef. Transferencia térmica del plato caliente
\dot{m}_C	Flujo másico en el disipador caliente	A_{PF1}	Área del plato frío
\dot{m}_F	Flujo másico en el disipador frío	A_{PC1}	Área del plato caliente

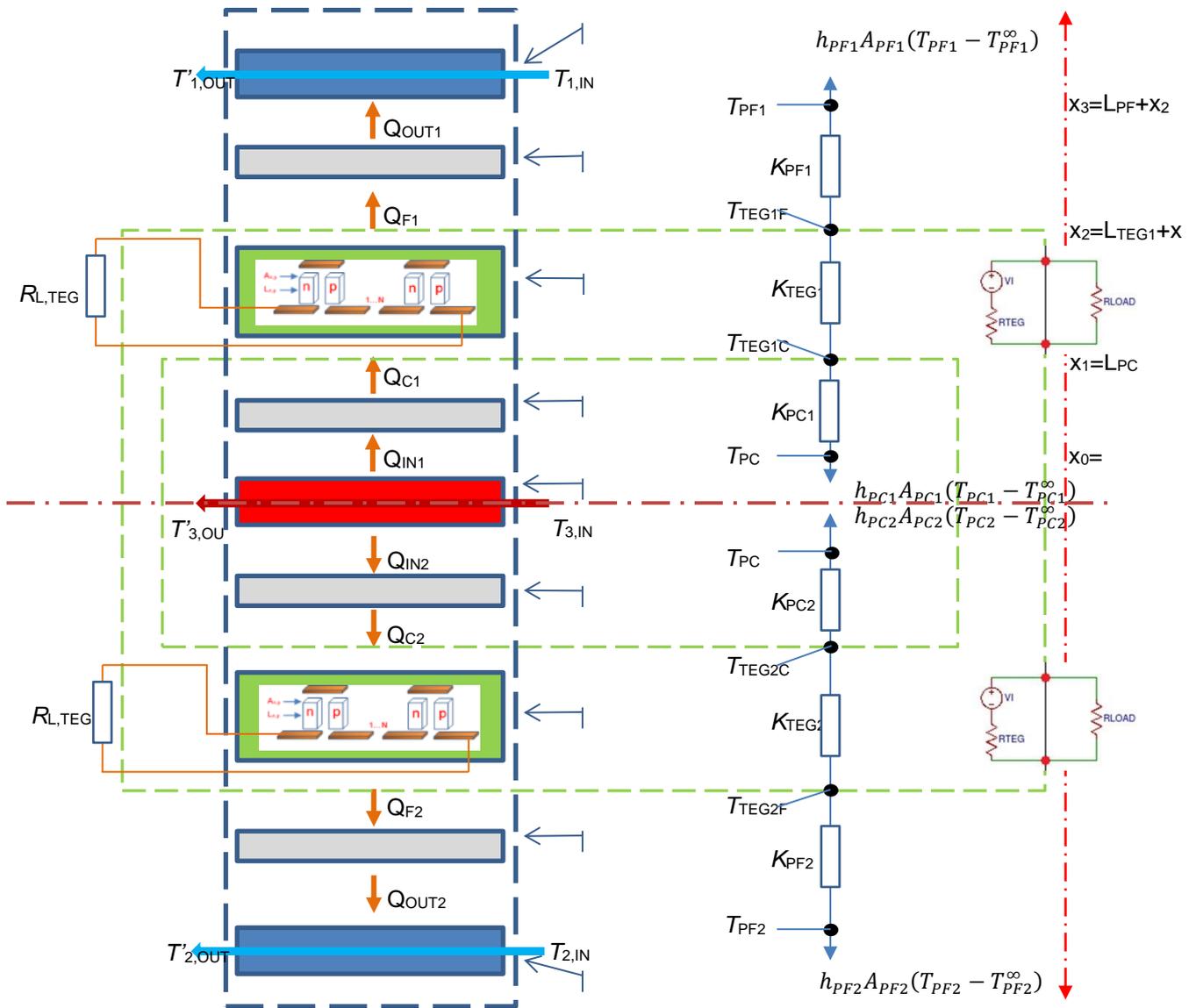


Fig. 117. Esquemático completo del modelo unidimensional del sistema termoeléctrico.

En la Fig. 117 se ilustra un modelo térmico unidimensional empleando la analogía eléctrica de un sistema generador termoeléctrico compuesto por dos bloques simétricos, estando cada bloque dividido a su vez en 3 ramas $\{x_1, x_2, x_3\}$. La coordenada $x=0$ se elige con el origen el centro del plato caliente del plato caliente, coincidiendo con el eje de simetría del sistema TEG. La longitud del plato caliente se indica por L_{PC} y finaliza en x_1 donde comienza el TEG. La longitud de la TEG se indica por L_{TEG} y finaliza en x_2 donde comienza el plato frío. La longitud del plato frío se indica por L_{PF} y finaliza en x_3 donde comienza el bloque de agua fría.

En la figura se muestra la dirección de conducción térmica a través de todos los elementos. La corriente, I , que fluye a través de las resistencias de carga $R_{L,TEG1}$ y $R_{L,TEG2}$ indica que el dispositivo está funcionando en modo de generación de energía.

El calor que el flujo térmico procedente del circuito de calefacción aporta al sistema puede ser determinado por la Ley de Calor de Fourier, con los datos de diferencias de temperatura entre las posiciones interior y exterior de cada bloque.

$$Q_{in} = m_c C_p (T_{3,IN} - T_{3,OUT}) \quad (54)$$

Donde:

$$Q_{in} = Q_{in1} + Q_{in2} \quad (55)$$

La condición de simetría implica una distribución del calor de la fuente térmica por igual hacia ambos bloques 1 y 2.

$$Q_{in1} = Q_{in2} \quad (56)$$

En $x_0=0$. Proceso de convección entre el agua caliente procedente del circuito de calefacción y el plato de aluminio.

$$Q_{in1} = h_{PC1} A_{PC1} (T_{PC1} - T_{PC1}^{\infty}) \quad (57)$$

Donde

$$T_{PC1}^{\infty} = \frac{(T_{3,IN} + T_{3,OUT})}{2} \quad (58)$$

Entre x_0 y x_1 . Proceso de conducción a través del plato caliente de aluminio según la ley de transferencia de calor de Newton en la que se induce un flujo de calor debido a la diferencia de temperatura entre ambos extremos del elemento.

$$Q_{in1} = K_{PC1} (T_{TEG1C} - T_{PC1}) \quad (59)$$

En $x_1 = L_{PC}$, la ecuación que define el principio de trabajo del TEG incluye el calor debido al efecto de conducción, al efecto Seebeck, y al efecto Joule.

$$Q_{C1} = K_{TEG1} (T_{TEG1C} - T_{TEG1F}) + n(\alpha_p - \alpha_n) I_{TEG1} T_{TEG1C} - \frac{1}{2} I_{TEG1}^2 R_{L,TEG1} \quad (60)$$

Entre x_2 y x_3 , se genera una potencia eléctrica en el TEG siempre que haya una resistencia de carga

$$Q_{C1} = Q_{F1} + W_{TEG1} \quad (61)$$

En situación de circuito abierto, no habría resistencia de carga

$$I_{TEG1} = 0, W_{TEG1} = 0 \quad (62)$$

$$Q_{C1} = Q_{F1} = K_{TEG1} (T_{TEG1C} - T_{TEG1F}) \quad (63)$$

En $x_2 = L_{TEG1} + x_1$

$$Q_{F1} = K_{TEG1}(T_{TEG1C} - T_{TEG1F}) + n(\alpha_p - \alpha_n)I_{TEG1}T_{TEG1F} + \frac{1}{2}I_{TEG1}^2 R_{L,TEG1} \quad (64)$$

Entre x_2 y x_3 , proceso de conducción a través del plato frío de aluminio

$$Q_{out1} = K_{PF1}(T_{TEG1F} - T_{PF1}) \quad (65)$$

En $x_3 = L_{PF} + x_2$, Proceso de convección entre el agua fría del circuito de refrigeración y el plato de aluminio.

$$Q_{out1} = h_{PF1}A_{PF1}(T_{PF1} - T_{PF1}^{\infty}) \quad (66)$$

Donde,

$$T_{PF1}^{\infty} = \frac{(T_{1,IN} + T_{1,OUT})}{2} \quad (67)$$

Debiéndose cumplir en el bloque frío que

$$Q_{out1} = m_F C_P(T_{1,OUT} - T_{1,IN}) \quad (68)$$

Donde:

$$Q_{out} = Q_{out1} + Q_{out2} \quad (69)$$

Siendo Q_{out2} el calor de salida de la parte simétrica del bloque.

Igualmente, por la condición de simetría, la aportación del calor al flujo de disipación líquida de la parte fría procede por igual de ambos bloques 1 y 2.

$$Q_{out1} = Q_{out2} \quad (70)$$

Para la determinación de la eficiencia del sistema completo se emplea la expresión (53) mientras que la expresión (71) es válida para el cálculo de eficiencia de la conversión en el material termoeléctrico considerando una única pata termoeléctrica homogénea con resistencia eléctrica R , conductancia térmica K , y coeficiente de Seebeck α . Teniendo en cuenta las tasas de transferencia de calor procedente de la conducción térmica Q_{κ} , efecto Peltier Q_{π} , y el calentamiento Joule Q_p , la eficiencia de la conversión de energía es igual a la potencia entregada a la carga dividida por la tasa neta de entrada de calor en el lado caliente como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_c} = \frac{I^2 R_L}{K\Delta T + \alpha I T_c + \frac{1}{2} I^2 R} = \frac{\frac{\Delta V_{oc}^2}{R} \frac{R_L/R}{(1 + R_L/R)}}{K\Delta T + \alpha I T_c + \frac{1}{2} I^2 R} \quad (71)$$

La corriente que circula en el circuito es $I = \frac{\Delta V_{oc}}{(R+R_L)}$, donde $\Delta V_{oc} = -\alpha\Delta T$ es la emf en circuito abierto, es decir, la tensión Seebeck, y R_L es la resistencia de carga. La resistencia eléctrica y la conductancia térmica del termoelemento son $R = \frac{\rho l}{A}$ y $K = \frac{kA}{l}$ respectivamente, donde l es la longitud de la pata y A es el área de su sección transversal.

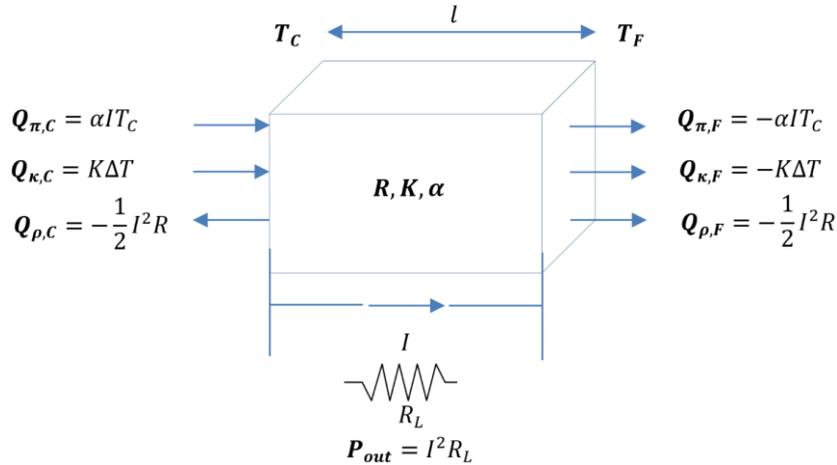


Fig. 118. Esquemático de un termoelemento de longitud l conectado a una carga.

3.5.3.- Modelo térmico simplificado del sistema termoeléctrico.

Para la simplificación del modelo se realizan tres consideraciones. La primera es la condición de simetría de cada bloque del sistema termoeléctrico, tal como se ha explicado en el apartado anterior. La segunda es la consideración de que los tres bloques tienen un comportamiento similar en cuanto a propiedades de los materiales y condiciones de contorno. La tercera es que la resistencia térmica del intercambiador de aluminio es despreciable frente a la resistencia térmica de los termoelementos.

Con estas consideraciones se representa en la Fig. 119 el modelo simplificado.

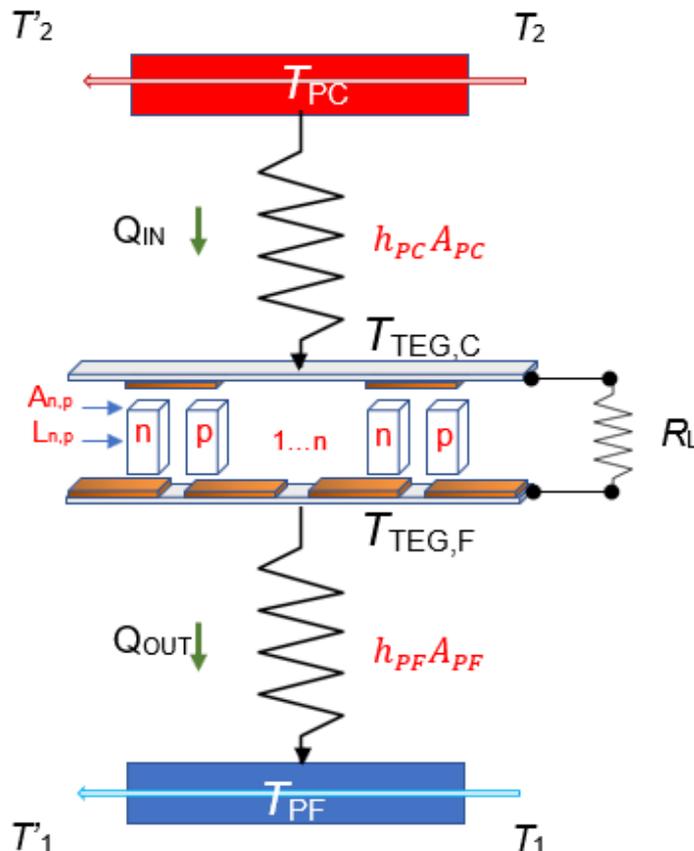


Fig. 119. Esquemático simplificado del modelo unidimensional del sistema termoeléctrico.

El modelo simplificado ayuda a centrar el problema y atacar su resolución sobre la base de otros estudio realizados con anterioridad [129] que igualmente han desarrollado una versión simplificada del mismo.

$$\begin{aligned} Q_{IN} &= h_{PC}A_{PC}(T_{PC} - T_{TEG,C}) = n \left(Q_{\pi,C} + Q_{\kappa,C} - \frac{1}{2}Q_{\rho,C} \right) \\ &= n \left(K(T_{TEG,C} - T_{TEG,F}) + \alpha IT_{TEG,C} - \frac{1}{2}I^2R \right) \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} Q_{OUT} &= h_{PF}A_{PF}(T_{TEG,F} - T_{PF}) = n \left(Q_{\pi,F} + Q_{\kappa,F} + \frac{1}{2}Q_{\rho,F} \right) \\ &= n \left(K(T_{TEG,C} - T_{TEG,F}) + \alpha IT_{TEG,F} + \frac{1}{2}I^2R \right) \end{aligned} \quad (73)$$

Donde h_{PC} y h_{PF} son los coeficientes de transmisión térmica en los intercambiadores de calor caliente y frío respetivamente (W/m^2K), A_{PC} y A_{PF} son las áreas de intercambio de calor de dichos intercambiadores de calor y n es el número de termoelementos.

Combinando (72) y (73) de un modo similar a Chen et al. [112] se obtienen las expresiones para la temperaturas en los extremos del TEG.

$$\begin{aligned} T_{TEG,C} &= \left[h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF}T_{PC} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC}T_{PC} + h_{PF}A_{PF}T_{PF}) - n\alpha h_{PC}A_{PC}IT_{PC} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2}nh_{PF}A_{PF} + n^2K_{TEG} \right) I^2R - \frac{1}{2}\alpha n^2I^3R \right] \\ &\quad * [h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC} + h_{PF}A_{PF}) \\ &\quad + n\alpha(h_{PF}A_{PF} - h_{PC}A_{PC})I - n^2\alpha^2I^2]^{-1} \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} T_{TEG,F} &= \left[h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF}T_{PF} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC}T_{PC} + h_{PF}A_{PF}T_{PF}) + n\alpha h_{PC}A_{PC}IT_{PF} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2}nh_{PC}A_{PC} + n^2K_{TEG} \right) I^2R + \frac{1}{2}\alpha n^2I^3R \right] \\ &\quad * [h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC} + h_{PF}A_{PF}) \\ &\quad + n\alpha(h_{PF}A_{PF} - h_{PC}A_{PC})I - n^2\alpha^2I^2]^{-1} \end{aligned} \quad (75)$$

Y las expresiones para el calor entrante y saliente del TEG.

$$\begin{aligned} Q_{IN} &= \left\{ h_{PC}A_{PC} \left[\frac{1}{2}\alpha n^2I^3R - \left(\frac{1}{2}nh_{PF}A_{PF}R + n^2K_{TEG}R + n^2\alpha^2T_{PC} \right) I^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n\alpha h_{PF}A_{PF}IT_{PC} + nK_{TEG}h_{PF}A_{PF}(T_{PC} - T_{PF}) \right] \right\} \\ &\quad * [h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC} + h_{PF}A_{PF}) \\ &\quad + n\alpha(h_{PF}A_{PF} - h_{PC}A_{PC})I - n^2\alpha^2I^2]^{-1} \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} Q_{OUT} &= \left\{ h_{PF}A_{PF} \left[\frac{1}{2}\alpha n^2I^3R + \left(\frac{1}{2}nh_{PC}A_{PC}R + n^2K_{TEG}R + n^2\alpha^2T_{PF} \right) I^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n\alpha h_{PC}A_{PC}IT_{PF} + nK_{TEG}h_{PF}A_{PF}(T_{PC} - T_{PF}) \right] \right\} \\ &\quad * [h_{PC}A_{PC}h_{PF}A_{PF} + nK_{TEG}(h_{PC}A_{PC} + h_{PF}A_{PF}) \\ &\quad + n\alpha(h_{PF}A_{PF} - h_{PC}A_{PC})I - n^2\alpha^2I^2]^{-1} \end{aligned} \quad (77)$$

En este modelo se parte de que los coeficientes de transferencia térmica son conocidos y se calculan los valores de temperaturas y flujos térmicos.

En el desarrollo de la presente tesis el dato conocido será el calor de entrada y salida, y en base a ellos se calcularán los coeficientes de transferencia térmica y con ellos las temperaturas.

Conocidas las temperaturas y los flujos térmicos, las expresiones para la potencia eléctrica generada P y la eficiencia térmica de conversión del TEG se expresan mediante (78) y (79).

$$\begin{aligned}
 P_e = Q_{IN} - Q_{OUT} &= n[\alpha I(T_{TEG,C} - T_{TEG,F}) - I^2 R] \\
 &= \left\{ \frac{1}{2} \alpha n^2 I^3 R (h_{PC} A_{PC} - h_{PF} A_{PF}) \right. \\
 &\quad - [n h_{PC} A_{PC} h_{PF} A_{PF} R + n^2 K_{TEG} R (h_{PC} A_{PC} + h_{PF} A_{PF}) \\
 &\quad + n^2 \alpha^2 (h_{PC} A_{PC} T_{PC} + h_{PF} A_{PF} T_{PF})] I^2 \\
 &\quad \left. + n \alpha h_{PC} A_{PC} h_{PF} A_{PF} I (T_{PC} - T_{PF}) \right\} \\
 &\quad * [h_{PC} A_{PC} h_{PF} A_{PF} + n K_{TEG} (h_{PC} A_{PC} + h_{PF} A_{PF}) \\
 &\quad + n \alpha (h_{PF} A_{PF} - h_{PC} A_{PC}) I - n^2 \alpha^2 I^2]^{-1}
 \end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned}
 \eta = \frac{P_e}{Q_{IN}} &= \left\{ \frac{1}{2} \alpha n^2 I^3 R (h_{PC} A_{PC} - h_{PF} A_{PF}) \right. \\
 &\quad - [n h_{PC} A_{PC} h_{PF} A_{PF} R + n^2 K_{TEG} R (h_{PC} A_{PC} + h_{PF} A_{PF}) \\
 &\quad + n^2 \alpha^2 (h_{PC} A_{PC} T_{PC} + h_{PF} A_{PF} T_{PF})] I^2 \\
 &\quad \left. + n \alpha h_{PC} A_{PC} h_{PF} A_{PF} I (T_{PC} - T_{PF}) \right\} \\
 &\quad * \left\{ h_{PC} A_{PC} \left[\frac{1}{2} \alpha n^2 I^3 R - \left(\frac{1}{2} n h_{PF} A_{PF} R + n^2 K_{TEG} R + n^2 \alpha^2 T_{PC} \right) I^2 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + n \alpha h_{PF} A_{PF} I T_{PC} + n K_{TEG} h_{PF} A_{PF} (T_{PC} - T_{PF}) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{79}$$

Estas expresiones permitirán conocer la relación entre eficiencia y potencia eléctrica generada y estudiar cómo afectarán al objetivo de generación de 18W y al coste variables como la carga aplicada, la temperatura de trabajo y la calidad constructiva (relativa a sus resistencias de contacto térmica y eléctrica).



3.5.4.- Diagrama de flujo y algoritmo del proceso de cálculo

El diagrama de flujo ilustrado en la Fig. 120 describe el proceso para disponer de una caracterización del sistema termoeléctrico, disponiendo de este modo de un modelo que pueda emplearse para caracterizar posteriormente un dispositivo más completo que abarque el VC-TE en su totalidad.

La caracterización del sistema termoeléctrico implica conocer los flujos de calor y diferencias de temperatura en todos los puntos del sistema termoeléctrico para los diferentes valores de temperaturas en el lado frío y caliente, para lo que será necesario conocer también las conductancias térmicas de los componentes del sistema y los coeficientes de transferencia térmica de los disipadores de calor $h_{PF} = f(T_{PF}^{\infty})$ y $h_{PC} = f(T_{PF}^{\infty})$ que en el modelo simplificado se denominan $h_{PF} = f(T_{PF})$ y $h_{PC} = f(T_{PF})$.

Se procede con los siguientes tres pasos para la caracterización del modelo.

1. Determinación del comportamiento del sistema termoeléctrico.
 - a. Medición de la respuesta térmica y eléctrica del sistema termoeléctrico.
 - b. Determinación de la condición de trabajo en régimen estacionario durante el calentamiento del sistema.
 - i. Cálculo de $T_{PF}(t)$, $T_{PC}(t)$, como punto de temperatura media entre la entrada y la salida, según (58) y (67).
 - ii. Cálculo de la relación $V_{oc} = f(T_{PC} - T_{PF})$ para la determinación de la linealidad.
 1. Cálculo del error cuadrático medio
 - iii. Cálculo de $Q_{IN}(t)$, $Q_{OUT}(t)$ según (54) y (68).
 - iv. Cálculo y justificación de las pérdidas del sistema $P(t) = Q_{OUT}(t) - Q_{IN}(t)$.
2. Caracterización del sistema termoeléctrico.
 - a. Cálculo de $K_{TEG}(\bar{T})$ y $R_{TEG}(\bar{T})$, según (11).
 - b. Determinación de los parámetros termoeléctricos de partida en función de la temperatura media del sistema $\alpha(\bar{T})$, $\rho(\bar{T})$, $\lambda(\bar{T})$ siendo $\bar{T} = \frac{T_{TEG,C} + T_{TEG,F}}{2}$.
 - c. Cálculo de los coeficientes de transferencia térmica $h_{PF} = f(T_{PF})$ y $h_{PC} = f(T_{PC})$.
 - i. Cálculo de $h_{PF} = f(t)$ y $h_{PC} = f(t)$ según (57) y (66).
 - ii. Cálculo de $h_{PF} = f(T_{PC} - T_{PF})$ y $h_{PC} = f(T_{PC} - T_{PF})$.
3. Respuesta del sistema en función del tiempo, en función de la T^a media del TEG y de la diferencia de T^a en el TEG.
 - a. Cálculo de la potencia eléctrica generada, $P_e(T_{PC} - T_{PF})$.
 - i. Cálculo de la $I_{TEG}(t)$.
 - b. Cálculo de la eficiencia de trabajo del sistema TE, $\eta(T_{PC} - T_{PF})$.
 - c. Comparación de resultados para el modelo ideal y no ideal del módulo termoeléctrico y los resultados del modelo del sistema termoeléctrico simplificado.

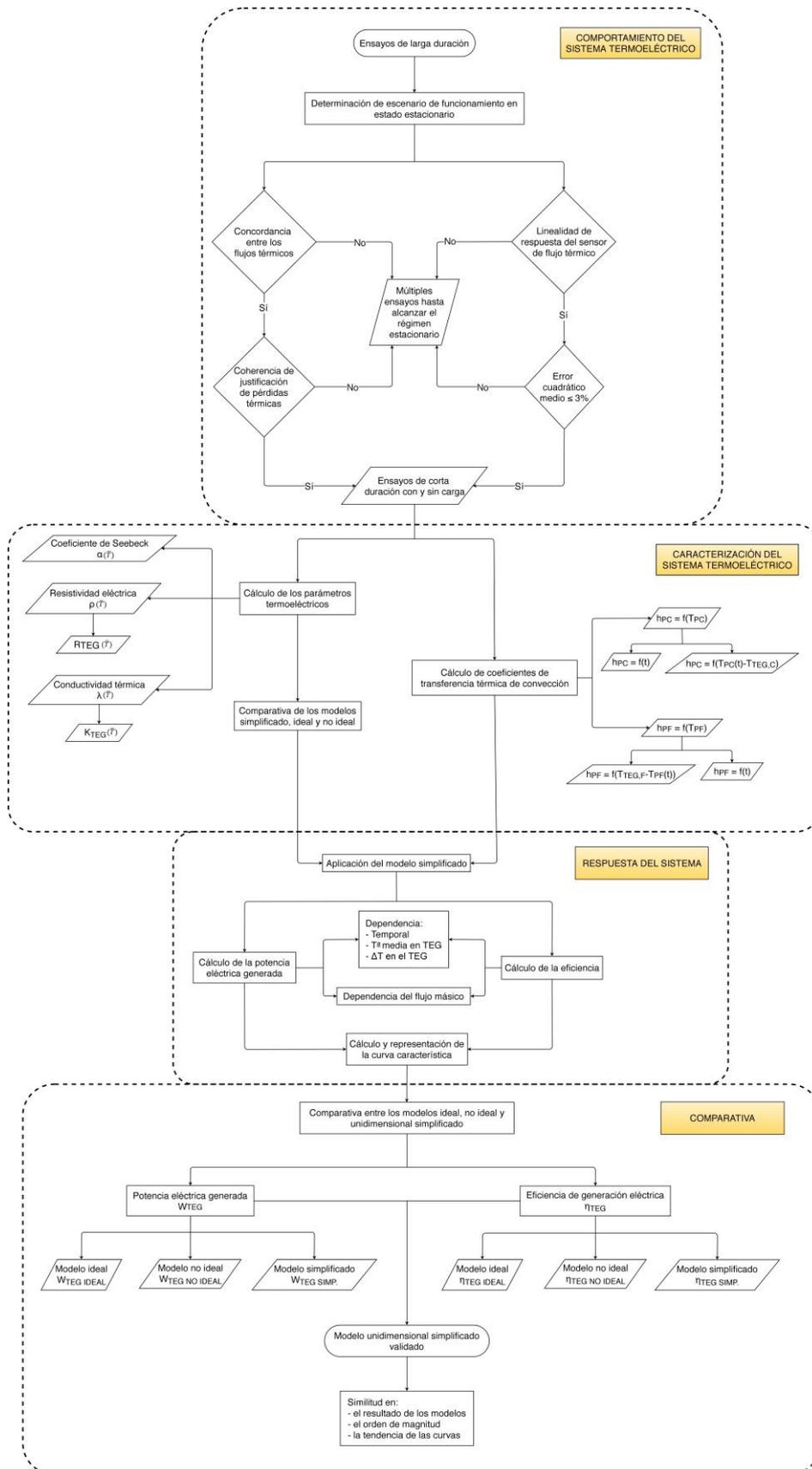


Fig. 120. Diagrama de flujo del proceso de cálculo.

3.6.- Resultados y caracterización experimental del sistema termoeléctrico

Se han realizado dos tipos de ensayos:

- Un ensayo de larga duración para disponer de un ciclo completo sobre el que explicar el comportamiento del sistema TE.
- Varios ensayos de corta duración para caracterizar el sistema TE con y sin carga, y con distintos flujos másicos.

3.6.1.- Comportamiento del sistema termoeléctrico

En este primer paso se pretende verificar que el comportamiento del sistema se corresponde con las consideraciones realizadas en él al definir el modelo computacional del sistema termoeléctrico. En primer lugar, se verifica la linealidad de la respuesta del sistema TE con respecto a la variación de las temperaturas en los extremos. En segundo lugar, se analiza la correspondencia de los flujos térmicos del sistema en los instantes iniciales, donde las pérdidas son menores y, en tercer lugar, se hace una estimación justificada de las pérdidas para validar el proceso.

3.6.1.1.- Respuesta térmica del sistema termoeléctrico

En el primer ensayo realizado en circuito abierto, de larga duración, se obtienen unos valores de temperatura que se muestran en la Fig. 121.

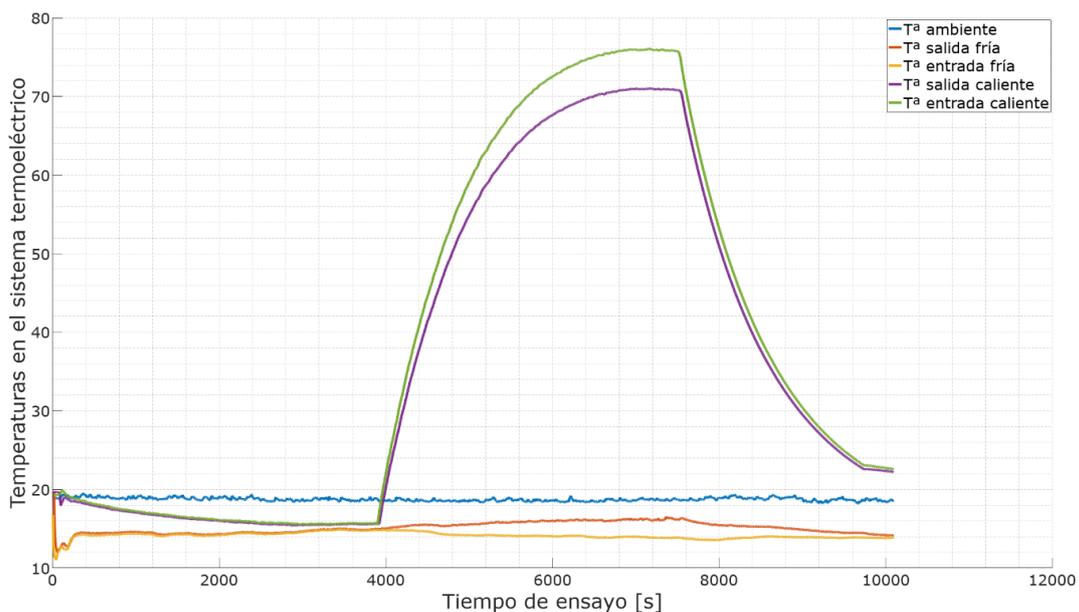


Fig. 121. Temperaturas en el sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia de calentamiento en circuito abierto.

Se observa que en el instante inicial las temperaturas del circuito primario, de calentamiento, y del secundario, de refrigeración, son iguales entre ellas e iguales a la temperatura ambiente en torno a 20°C. En el ensayo realizado hay que tener en cuenta que la temperatura del circuito de refrigeración es inferior a la temperatura ambiente, por lo que al activar la circulación de ambos circuitos, el agua del circuito secundario se renueva rápidamente provocando un descenso rápido de la temperatura en los primeros instantes, mientras el agua del circuito primario, que es cerrado, no se renueva, y pierde el calor acumulado más lentamente intercambiándolo a través de los módulos con el circuito secundario, hasta que igualan sus temperaturas. Tras este proceso, se activa la resistencia de calentamiento a máxima potencia hasta que se alcanza el

estado estacionario con 76°C en la entrada del agua caliente. Se finaliza el ensayo apagando la resistencia eléctrica, pero con el agua de ambos circuitos circulando de modo que, al igual que en la fase inicial, el circuito primario pierde todo el calor acumulado lentamente.

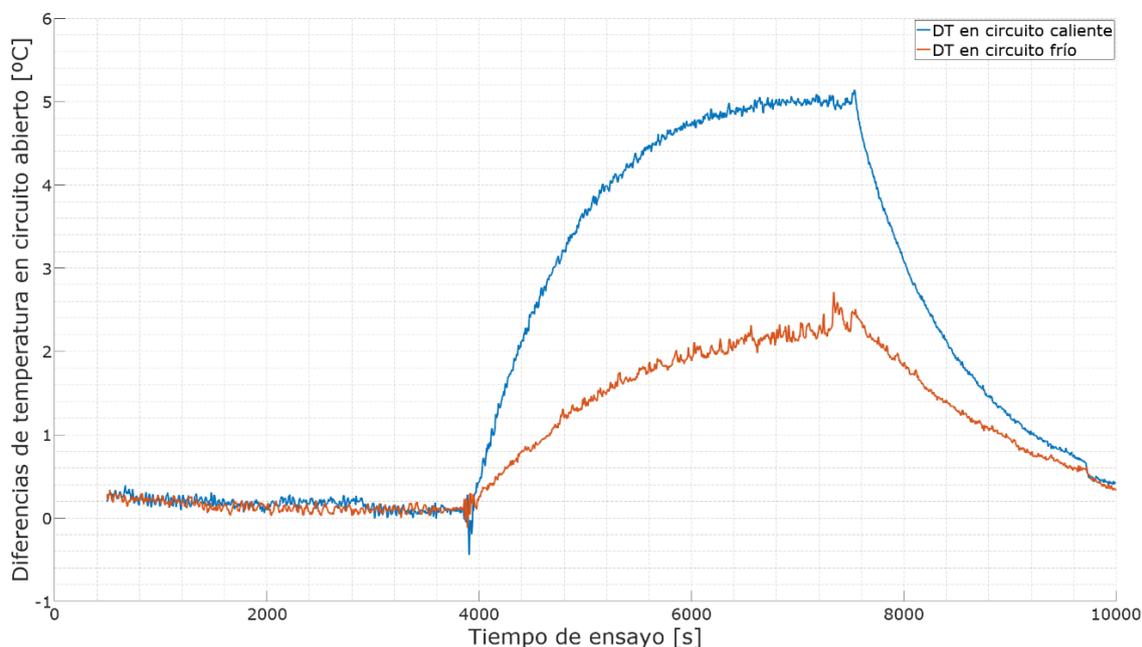


Fig. 122. Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de sistema termoeléctrico en lado frío y caliente en circuito abierto.

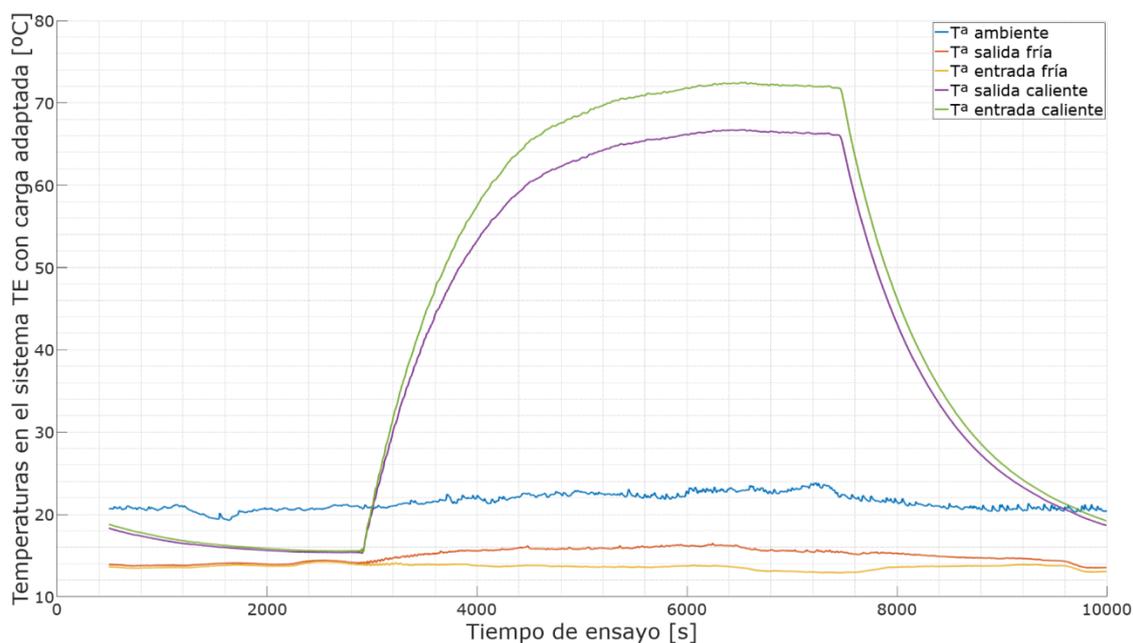


Fig. 123. Temperaturas en el sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia de calentamiento con carga adaptada.

En la Fig. 123 se muestran los valores de temperatura del ensayo realizado con carga adaptada repitiendo el mismo procedimiento que en el ensayo en circuito abierto. Se aprecia que la temperatura alcanzada es ligeramente inferior, probablemente debido a un incremento del flujo térmico motivado por el transporte térmico de las cargas eléctricas de la intensidad que fluye al colocar la carga.

Teniendo en cuenta que para ambos ensayos se ha mantenido el mismo flujo másico en la parte fría y en la caliente, en la Fig. 122, que muestran las variaciones de temperatura, se puede apreciar con respecto a la Fig. 124 que hay un incremento de la diferencia de temperatura, pasando de 5 °C de diferencia máxima en la parte caliente a 5.8°C.

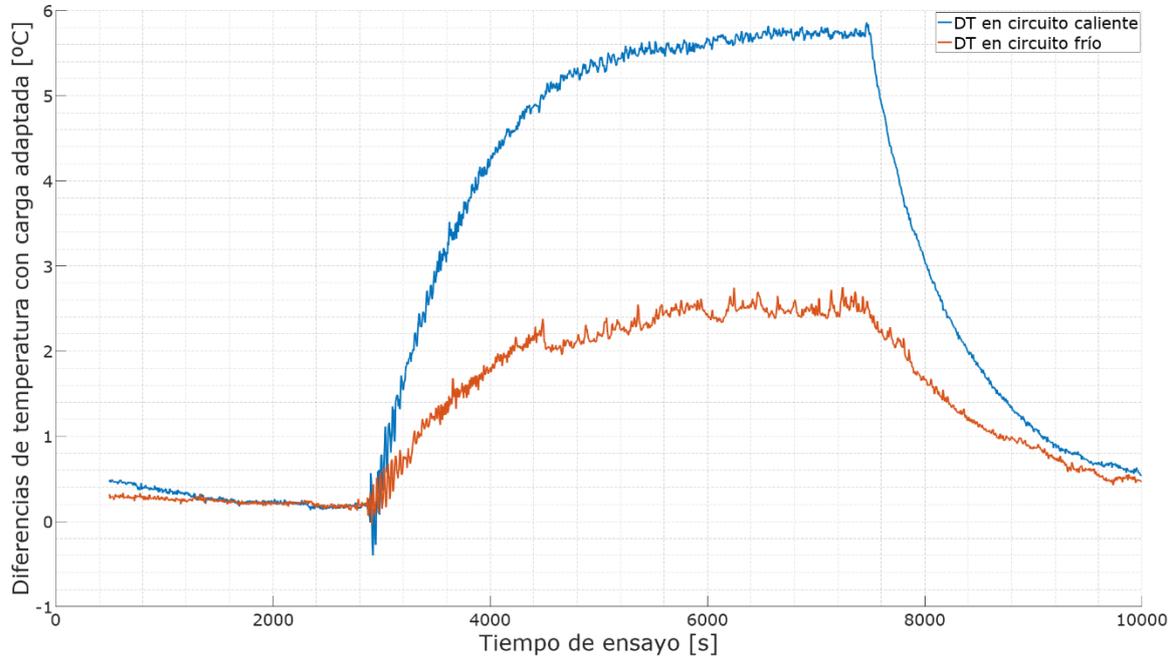


Fig. 124. Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de los disipadores frío y caliente con carga adaptada.

3.6.1.2.- Respuesta eléctrica del sistema termoelectrico

Las lecturas de las tensiones generadas en el ensayo en circuito abierto se muestran en la en la Fig. 125 para los tres bloques generadores. Generando tensiones cercanas a los 50 V.

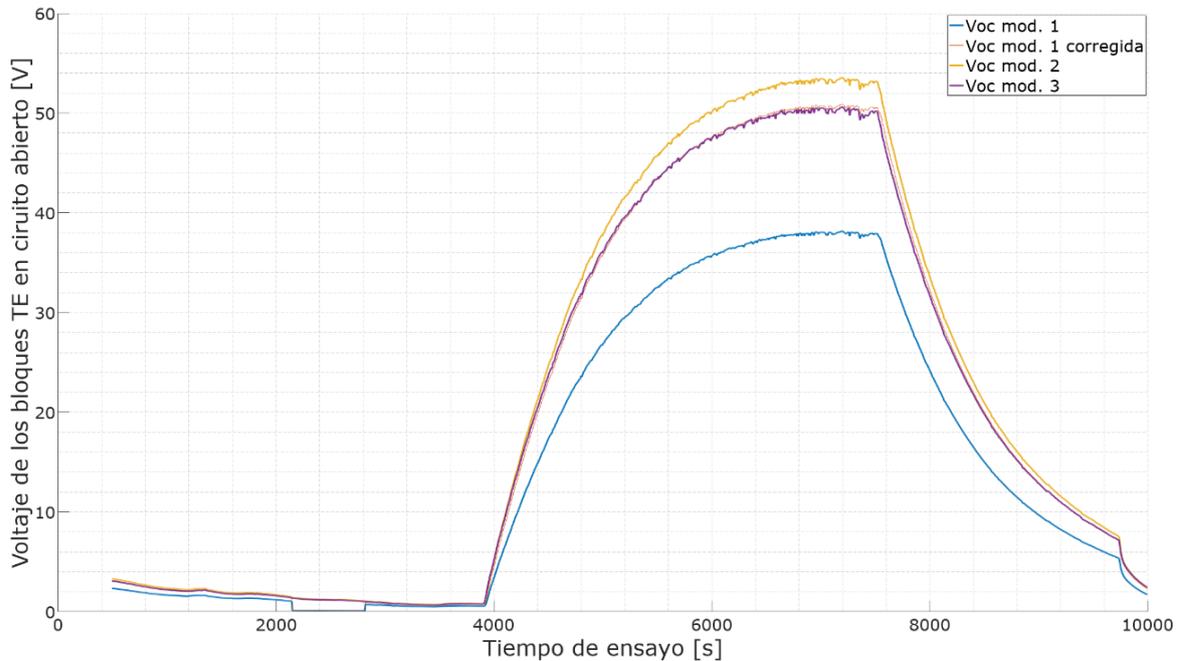


Fig. 125. Voltajes de los bloques del sistema termoelectrico durante su ensayo a máxima potencia térmica en circuito abierto.

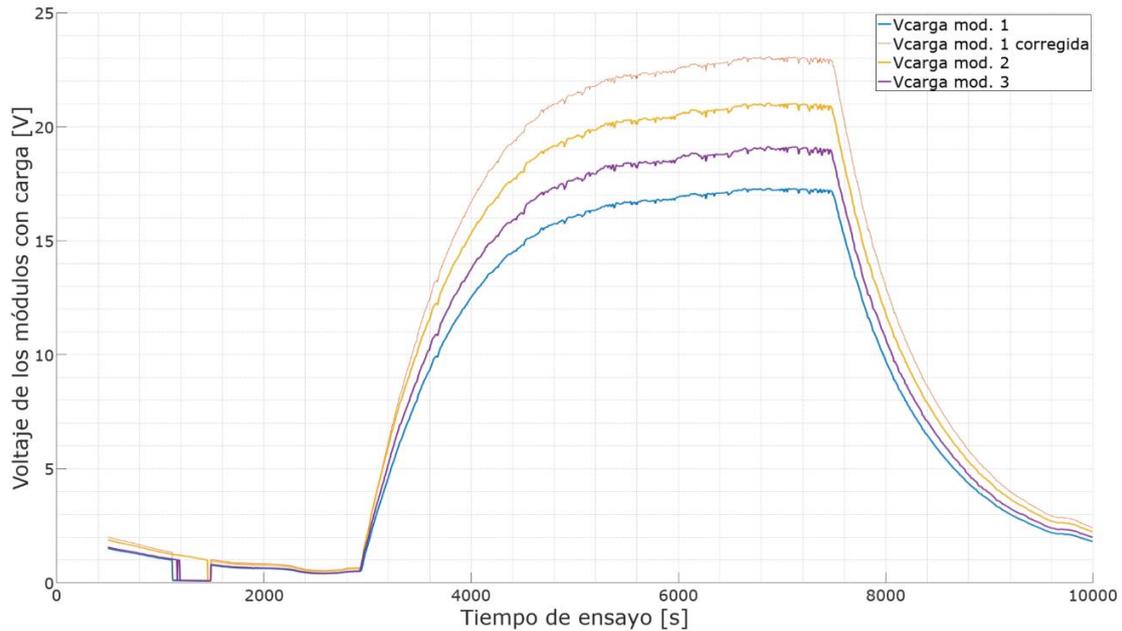


Fig. 126. Voltajes de los bloques del sistema termoeléctrico durante su ensayo a máxima potencia térmica con carga adaptada.

Como se puede apreciar en la Fig. 127, la tensión generada por los módulos termoeléctricos sigue fielmente la curva descrita por la diferencia de temperaturas del sistema termoeléctrico, por tener una temperatura del agua fría poco variable, guarda gran similitud también con la temperatura del agua caliente. Se observa que el módulo 1 genera una tensión ligeramente inferior a los demás, esto es debido a que durante los ensayos dos de las líneas serie de módulos termoeléctricos se han deteriorado, por lo que para poder continuar ha sido necesario puentearlos. Se considerará para los cálculos una estimación de la tensión (corrección de las curvas) y resistencia eléctrica interna equivalente con la totalidad de módulos, mientras que la resistencia térmica no se ve perjudicada, ya que térmicamente el dispositivo sigue operando con normalidad.

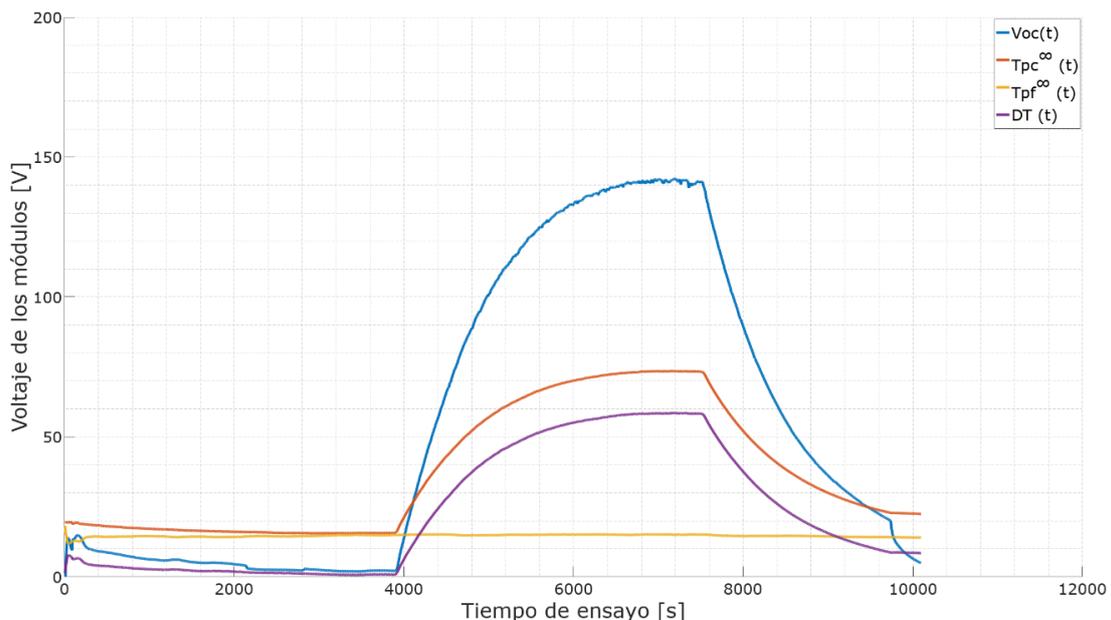


Fig. 127. Curva de tensión total [V] sin corregir generada en circuito abierto y de diferencia de temperatura [°C] entre los extremos del sistema termoeléctrico.

Analizando los resultados con carga adaptada (Fig. 128), se observa que el comportamiento sigue el mismo patrón descrito, pero lógicamente con tensiones de menor valor.

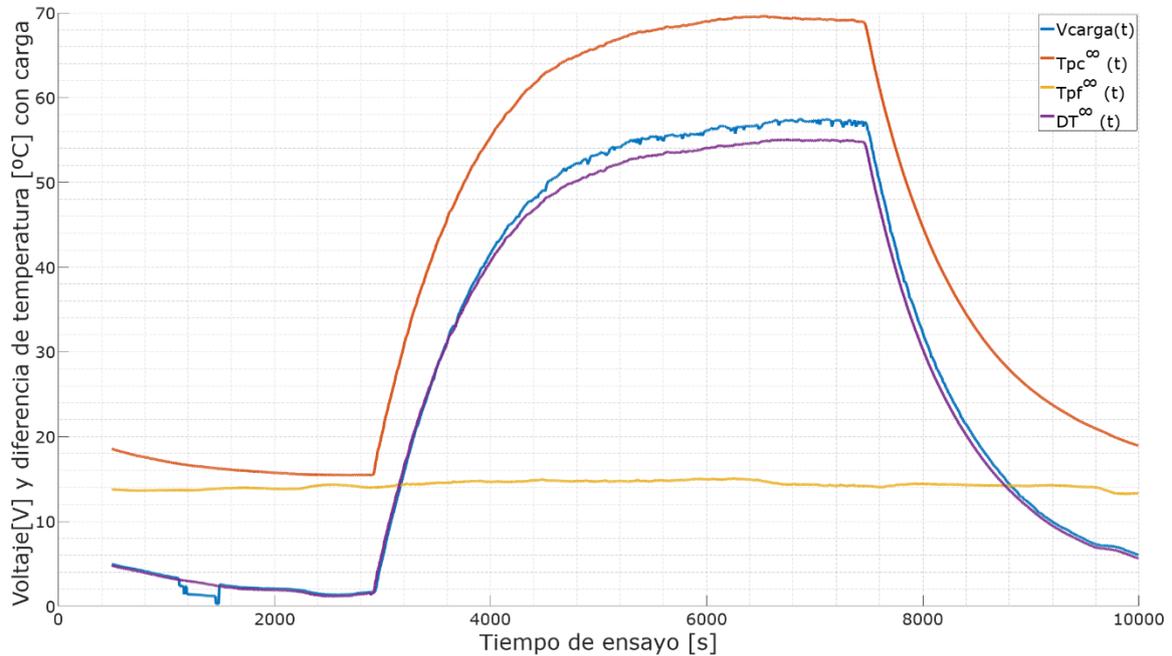


Fig. 128. Curva de tensión total [V] sin corregir generada con carga adaptada y de diferencia de temperatura [°C] entre los extremos del sistema termoeléctrico.

3.6.1.3.- Determinación de escenario de funcionamiento en estado estacionario

Para poder aplicar la metodología propuesta en el apartado siguiente es necesario primero determinar que se pueden aplicar las condiciones de situación estacionaria.

Por varios motivos esta consideración parece tener cierto fundamento.

- Trabajo a baja temperatura. Muchas de las investigaciones que utilizan modelos que aplican condiciones de situación transitoria trabajan con sistemas generadores termoeléctricos de media-alta temperatura aprovechando gases de escape o el calor procedente de la llama directamente. Por contra, es habitual, como se ha mostrado previamente, que los investigadores que emplean modelos que aplican condiciones de situación estacionaria trabajan en aplicaciones de *energy harvesting* de baja temperatura.
- La variación de calor es lenta y la conductividad térmica de los materiales muy alta, por lo que los efectos de la inercia térmica en puntos intermedios (de aluminio) se minimizan.

En cualquier caso, para poder realizar esta aseveración es necesario confirmar que los flujos térmicos en las distintas partes del sistema termoeléctrico son similares. A tal efecto cabe señalar que los módulos termoeléctricos se comportan como un sensor de flujo térmico que permite conocer con mucha precisión el valor instantáneo del calor que le atraviesa.

$$V_{oc} = n\alpha\Delta T \quad (80)$$

Considerando que el sistema trabaja en circuito abierto:

$$Q_{TEG} = K_{TEG}\Delta T \quad (81)$$

Sustituyendo (80) en (81) obtenemos el valor del calor que atraviesa el bloque termoeléctrico.

$$Q_{TEG} = K_{TEG} \frac{V_{oc}}{n\alpha} \quad (82)$$

Siendo α el coeficiente de Seebeck equivalente de un par termoeléctrico, n el número total de pares del sistema termoeléctrico, K_{TEG} la conductancia térmica total de todos los pares termoeléctricos y V_{oc} la tensión total medida en circuito abierto.

Por otro lado, la captura de temperaturas a la entrada y la salida de los disipadores frío y caliente permite a su vez conocer el valor instantáneo del flujo térmico de salida en el foco caliente (54) y en el foco frío(68).

Al ser un sistema grande, el fluido caloportador requerirá un tiempo para el desplazamiento a través de todo el sistema. Este hecho tiene un efecto negativo en el cálculo de la potencia térmica absorbida por el sistema termoeléctrico. Ante esta situación, o se utilizan sistemas más pequeños o se introduce un retardo en los datos analizados que permita compensar el tiempo de desplazamiento del fluido. Dado que no se puede modificar el sistema termoeléctrico ni los puntos de captura de temperatura, se introducirá un retardo como se explica más adelante.

Con el retardo introducido, se utilizarán dos criterios para determinar que se está trabajando en condiciones de estado estacionario.

1. Linealidad de respuesta del sensor de flujo térmico en función de la diferencia de temperatura en los extremos del sistema TE: Tal como se ha comentado, la relación entre la tensión generada y la diferencia de temperatura en los módulos termoeléctricos es lineal. Si ante una variación de la temperatura del agua caliente dentro del disipador, las temperaturas en la parte caliente del TEG y en la parte fría del TEG varían proporcionalmente de modo inmediato se puede considerar que la inercia térmica del sistema es baja y se estabiliza al instante, no siendo necesario esperar a que las temperaturas de los fluidos caloportadores se estabilicen para considerar que las temperaturas en el interior se han estabilizado igualmente. Por tanto, se espera que la relación $\Delta T_{TEG} = f(T_{PC} - T_{PF})$ sea lineal, y se considerará estado estacionario siempre que el error cuadrático medio en la consideración de esta linealidad sea inferior al 5%, siendo este un criterio arbitrario cuyo valor no ha sido optimizado.
2. Concordancia entre los flujos térmicos: Calculados los flujos térmicos en la parte fría y caliente, si los materiales que componen el sistema termoeléctrico suponen una inercia térmica baja, alcanzarán rápidamente el equilibrio, llegando a una situación de estacionariedad en la que todo calor que entre al sistema termoeléctrico alcanzará rápidamente al módulo termoeléctrico y el disipador frío. Y saldrá el mismo calor que entra al sistema siempre y cuando no haya una carga en los bornes de los módulos termoeléctricos ya que de ser así se producirían efectos termoeléctricos, que afectarían al flujo térmico y provocarían que $Q_{IN} \neq Q_{OUT}$. Los flujos térmicos en condición de circuito abierto deberían ser similares en cada instante de tiempo. Para que esto ocurra, la comparativa se deberá realizar a baja temperatura, donde la afectación de las pérdidas de calor es menor, y estimar las pérdidas que se producen a mayor temperatura.

3.6.1.4.- Linealidad de respuesta del sensor de flujo térmico frente a la diferencia de temperatura en los extremos del sistema TE

Como se puede apreciar en la Fig. 129, la tensión generada en un ciclo de calentamiento-enfriamiento en el sistema termoeléctrico tiene una respuesta lineal con respecto a la diferencia de temperatura total del sistema. Esto, que cabía esperar tomando medidas en diferentes estados estacionarios, tiene una correspondencia similar durante todo el proceso de calentamiento.

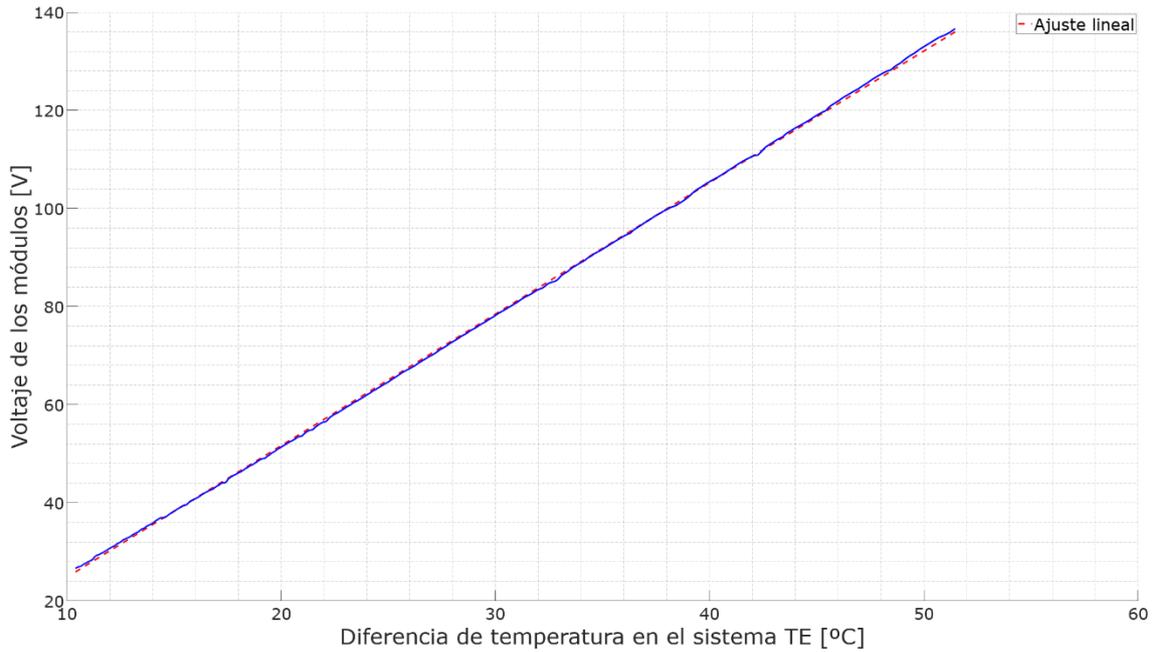


Fig. 129. Ajuste lineal de la relación entre la diferencia de temperatura en la entrada de sistema TE y la tensión generada

Para conocer si el ajuste que ofrece la recta sobre la nube de puntos es suficientemente bueno se traza la recta de regresión sobre la que se calcula el coeficiente de correlación lineal.

Concretamente, se trata del siguiente estadístico:

$$r = \frac{S_{V\Delta T}}{S_V S_{\Delta T}} \quad (83)$$

Donde $S_{V\Delta T}$ es la covarianza muestral, S_V la desviación típica muestral de los datos de tensión generada y $S_{\Delta T}$ la desviación típica muestral de los datos de la diferencia de temperatura entre el lado frío y el caliente.

$$S_{V\Delta T} = \frac{(\sum_i (V_i - \bar{V})(\Delta T_i - \bar{\Delta T}))}{n} \quad (84)$$

$$S_V = \sqrt{\frac{\sum_i (V_i - \bar{V})^2}{n}} \quad (85)$$

$$S_{\Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta T_i - \bar{\Delta T})^2}{n}} \quad (86)$$

El coeficiente de correlación lineal es una variable que toma valores entre -1 y 1 . Cuanto más extremo es r (más se acerca a -1 o a 1), significa que mejor se ajusta el modelo. Un valor cercano a 0 , debe interpretarse como que no existe un buen ajuste lineal.

El coeficiente para las variables descritas es de 0.97099 , por lo que se podría considerar un ajuste muy bueno.

El cuadrado del valor r multiplicado por 100 se denomina coeficiente de determinación (R^2) y se interpreta como el porcentaje de variabilidad que explica el modelo, y este porcentaje es del 94.282% .

3.6.1.5.- Flujos térmicos en el sistema en circuito abierto

El cálculo del flujo térmico arroja las curvas recogidas en la Fig. 130 tanto para el flujo térmico entrante, procedente del agua caliente como para el flujo térmico saliente, evacuado a través del agua fría.

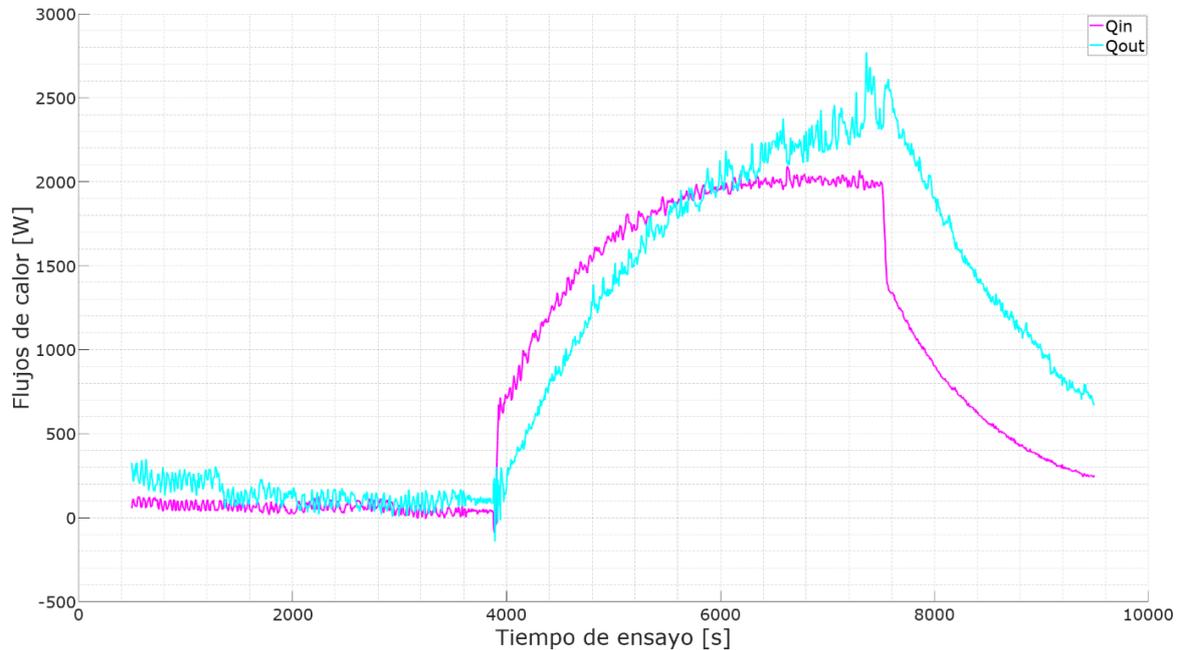


Fig. 130. Flujos térmicos a la entrada y salida del sistema TE

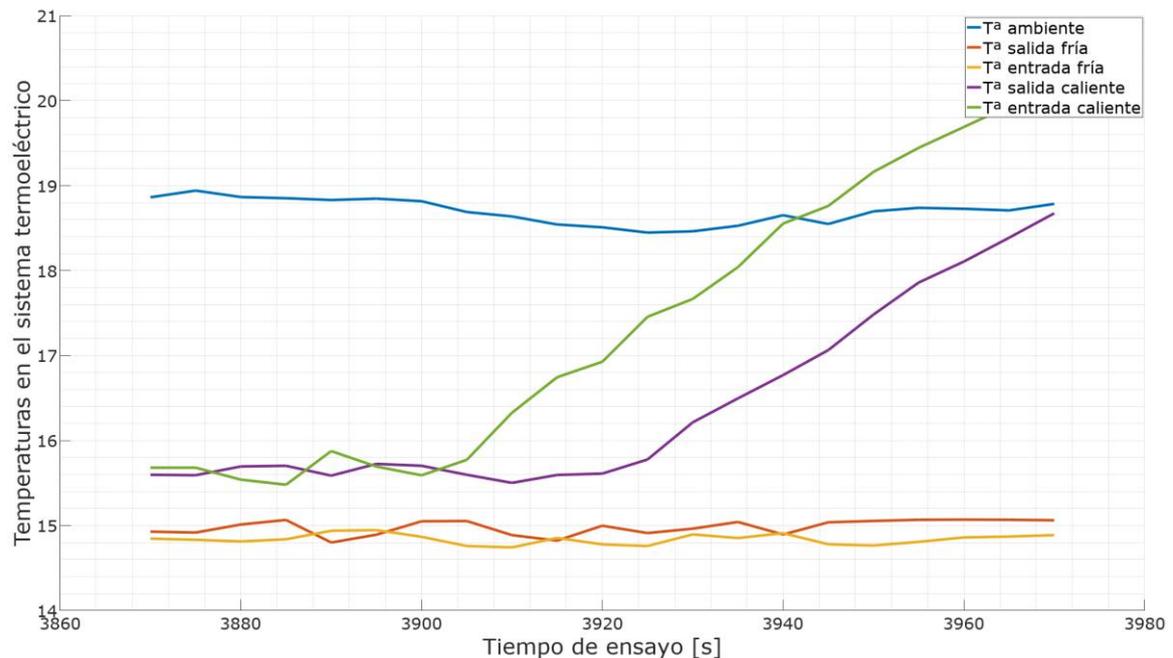


Fig. 131. Detalle de la afectación a la lectura de datos de temperatura por el retardo de circulación de los fluidos.

Se puede apreciar que en el flujo entrante se produce un salto muy abrupto cuando se activa el calentamiento. Se trata de un error en la interpretación de los datos debido al tiempo de propagación de masa de agua calentada a través del sistema. Por ello, para aplicar la Ley de Calor de Fourier expresada en (54), es necesario aplicar un retardo en la toma de muestras de temperatura que permita interpretar correctamente la reducción de temperatura que la masa de



agua ha experimentado. El retardo a aplicar se aprecia claramente en la Fig. 131 observando la diferencia de tiempo desde que se inicia el calentamiento en la parte caliente (curva verde) hasta que este calentamiento se aprecia en la parte fría (curva morada).

Aplicado este retardo, se aprecia en la Fig. 132 que no se producen saltos abruptos. El incremento del calor es progresivo en ambas curvas.

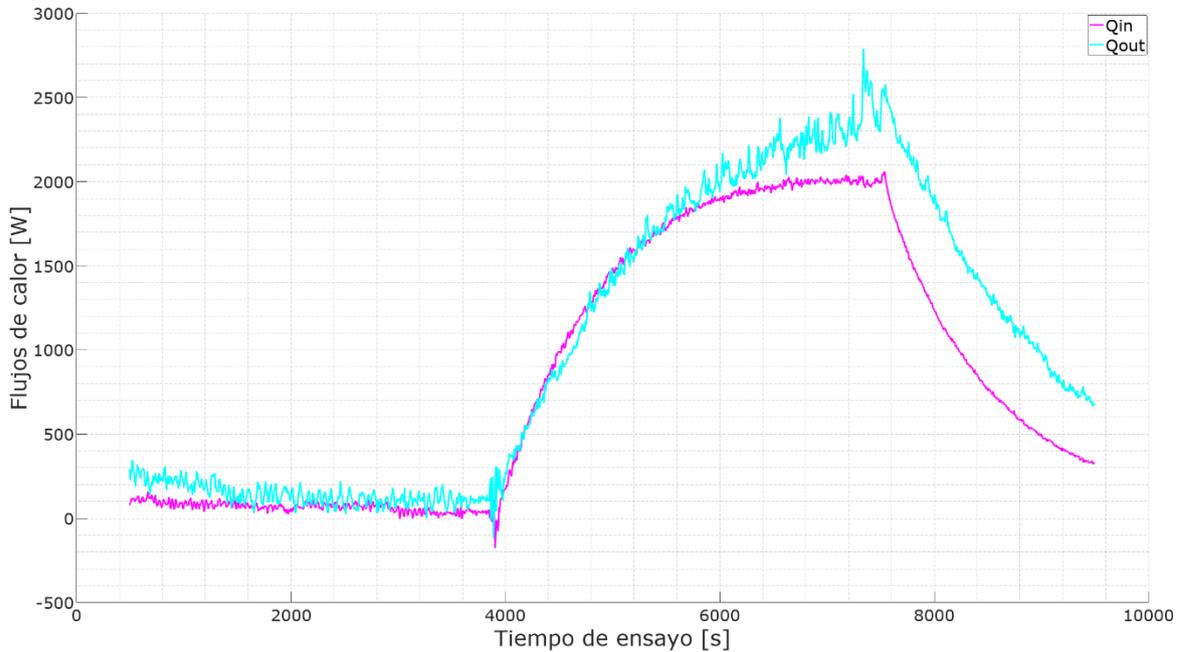


Fig. 132. Flujos térmicos a la entrada y salida del sistema TE con corrección por software del retardo de circulación de los fluidos.

Se puede considerar que existe una concordancia en los flujos térmicos y que los materiales que componen el sistema tienen una baja inercia térmica, que alcanzarán rápidamente el equilibrio, llegando a una situación de estacionariedad en la que todo calor que entre al sistema termoeléctrico alcanzará rápidamente al módulo termoeléctrico y el disipador frío.

Se puede apreciar que a medida que aumenta la temperatura las curvas se separan debido al incremento de las pérdidas sobre todo en la parte fría, como se explica en el siguiente apartado.

3.6.1.6.- Pérdidas térmicas en el sistema TE

El disipador caliente está confinado entre dos placas termoeléctricas, por lo que todo calor que es perdido por este disipador es considerado calor de entrada al sistema. El disipador frío, por el contrario, tiene una gran superficie en contacto con el exterior, por lo que se considera que las pérdidas se producen exclusivamente en este elemento.

Por lo tanto, las pérdidas se calcularían directamente como diferencia entre el calor de salida y el calor entrante, tal como se muestra en la Fig. 133.

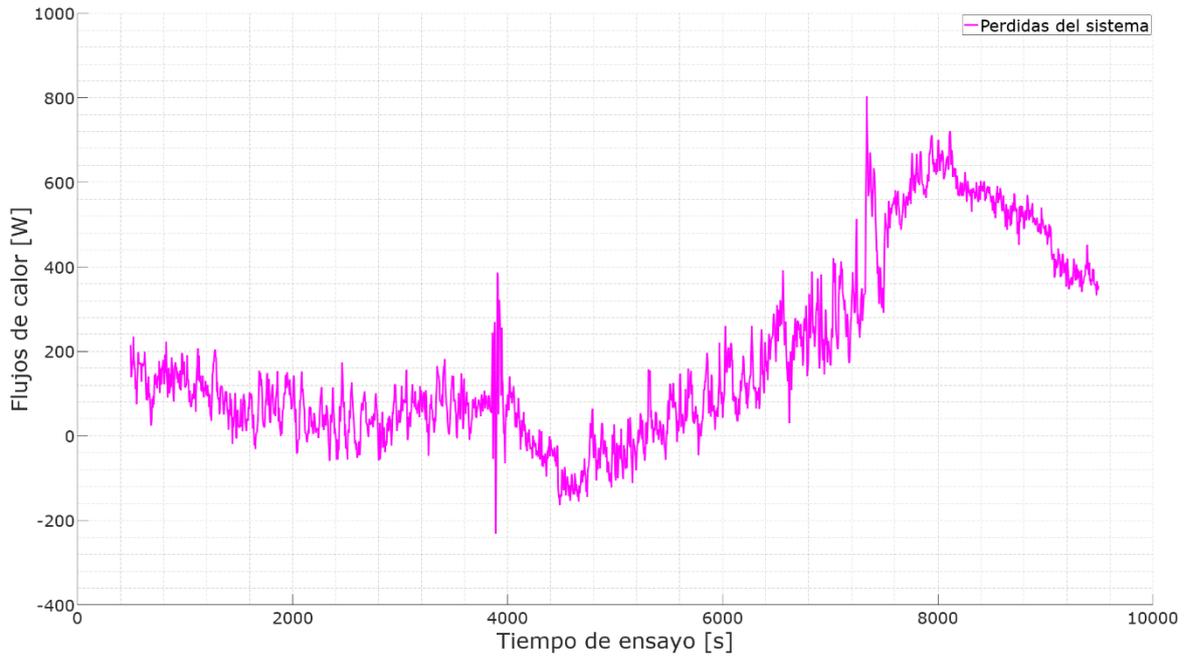


Fig. 133. Pérdidas de calor del sistema termoeléctrico a través del dissipador frío.

Cabe resaltar que en este caso el calor es positivo, debido a que la temperatura de agua de refrigeración es inferior a la temperatura ambiente, lo que provoca un flujo entrante de calor al dissipador caliente, además del que procede de los módulos termoeléctricos, que es el que se considera cómo pérdidas.

Para validar esta afirmación se realiza el cálculo teórico de la ganancia de calor desde el ambiente al sistema considerando las temperaturas reales durante el ensayo tanto del líquido como de la temperatura ambiente como se muestran en la Fig. 134.

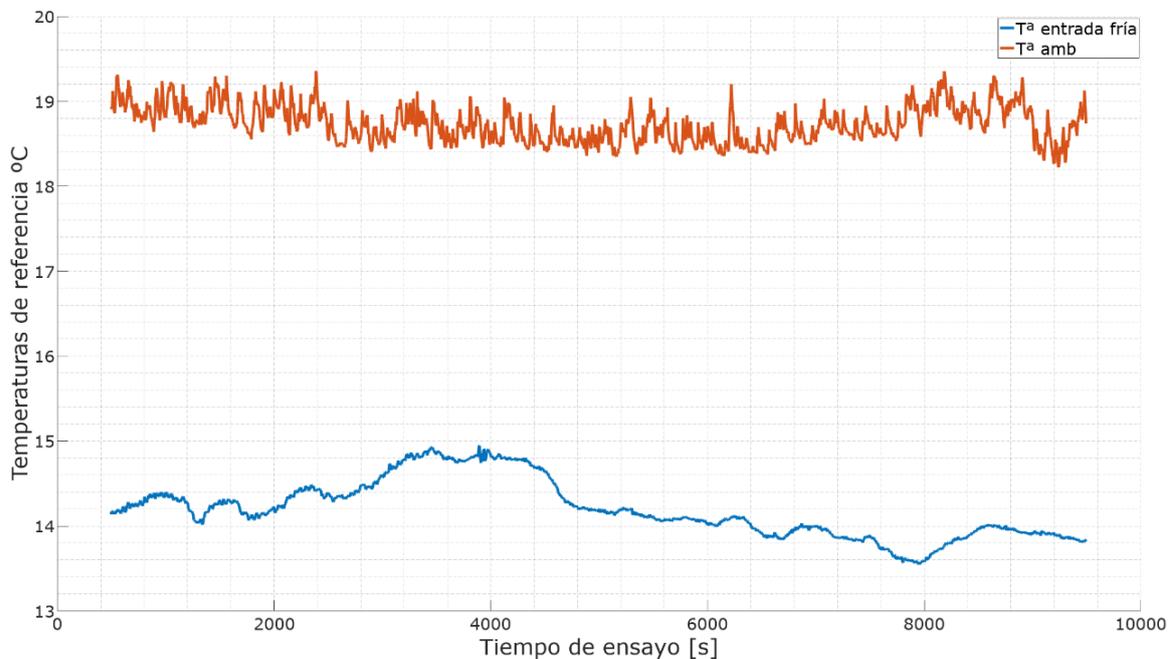


Fig. 134. Temperatura ambiente y del líquido de refrigeración durante el ensayo

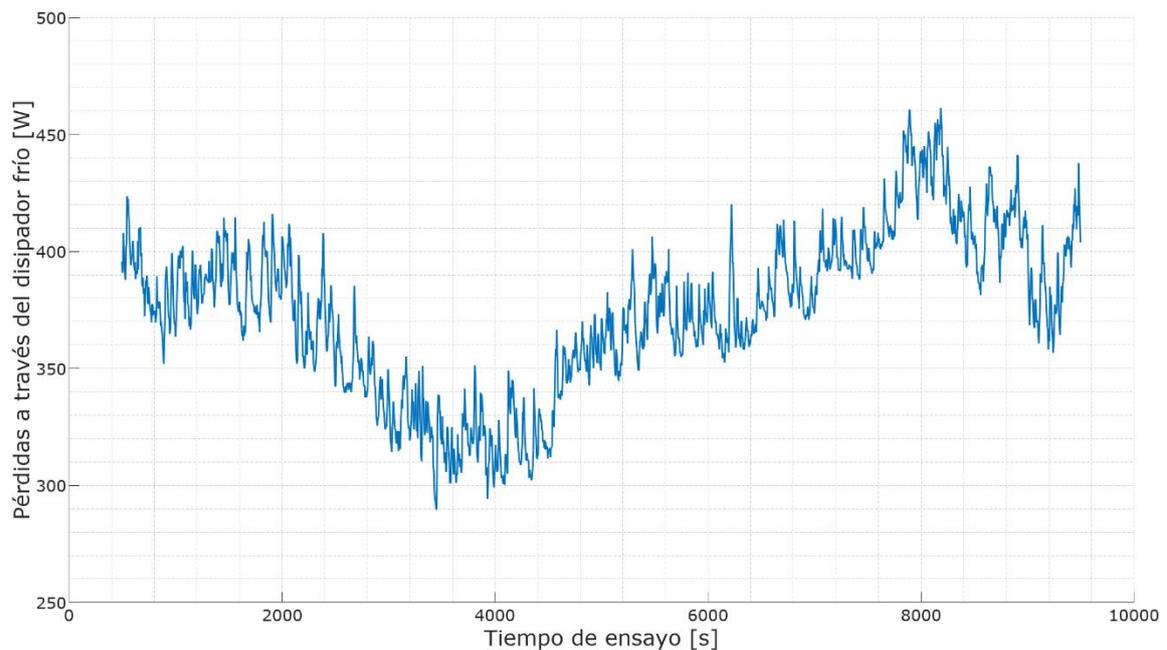


Fig. 135. Calor entrante al líquido de refrigeración calculado a través de los disipadores fríos.

Se considera igualmente que la poliamida utilizada tiene una conductividad térmica de 0.5 W/mK , que el área de intercambio es de $200 \times 250 \text{ mm}^2$ por disipador, habiendo un total de 6 unidades, y que el espesor de esta poliamida es de 2 mm.

Con ello se calculan unas pérdidas a través del disipador frío (Fig. 135) del orden de las obtenidas en la Fig. 133 con las consideraciones de pérdidas realizadas, por lo que se concluye que las aproximaciones y consideración de escenario de funcionamiento estacionario están adecuadamente realizadas.

3.6.2.- Caracterización del sistema

Una vez determinado que el comportamiento del sistema TE se corresponde con las consideraciones realizadas se procede a caracterizar el sistema, lo que implica conocer sus parámetros TE, su conductancia y/o conductividad térmica, su resistencia y/o resistividad eléctrica y su coeficiente de Seebeck, así como los parámetros relativos al sistema de disipación que no corresponden al diseño, como son los coeficientes de transferencia térmica de convección del disipador caliente y del disipador frío. Con todos estos parámetros que se calculan a continuación se define el modelo térmico simplificado del sistema TE, que permitirá predecir el comportamiento del sistema partiendo de algunos datos básicos de su operativa.

3.6.2.1.- Ensayo para caracterización del sistema TE

3.6.2.1.1.- Temperaturas de trabajo del sistema TE

Se muestran a continuación, en las Fig. 136 y Fig. 137, los valores de temperatura de todos los sensores en los puntos de interés. Esto incluye la entrada y salida de los circuitos de refrigeración y calentamiento, la parte fría y caliente de los módulos termoeléctricos, así como la temperatura ambiente.

Puede apreciarse cómo efectivamente el paso del calor a través del sistema termoeléctrico provoca un descenso de la temperatura en el agua caliente a la salida con respecto a la entrada.

Y del mismo modo provoca un incremento de la temperatura en el circuito de refrigeración debido al calor aportado, elevándose la temperatura a la salida con respecto a la entrada.

La temperatura ambiente a lo largo de todo el proceso permanece estable y las temperaturas de la parte fría y caliente de los módulos termoeléctricos permanecen en todo momento en rangos intermedios con respecto a la parte fría y caliente del sistema termoeléctrico.

Se aprecia que la medida sin carga se estabiliza a mayor temperatura que el ensayo con carga. La circulación de corriente, debido a la presencia de carga, provoca un incremento del flujo térmico que respalda la existencia de una diferencia de temperatura en el sentido indicado.

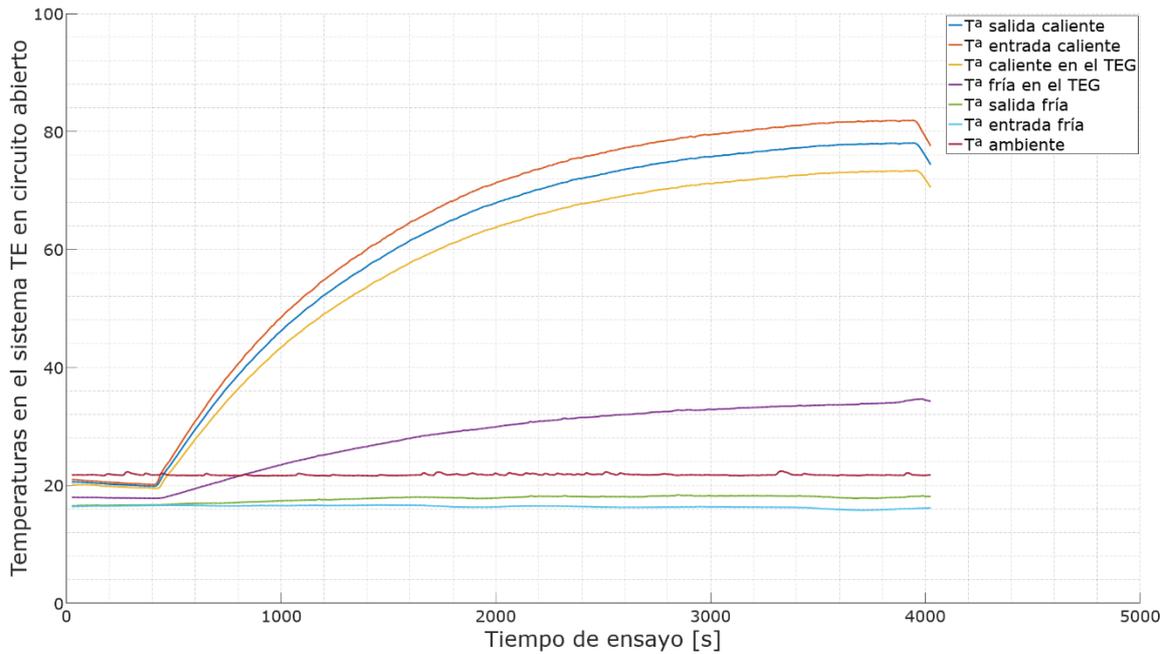


Fig. 136. Valores de temperatura capturados del sistema termoeléctrico sin carga

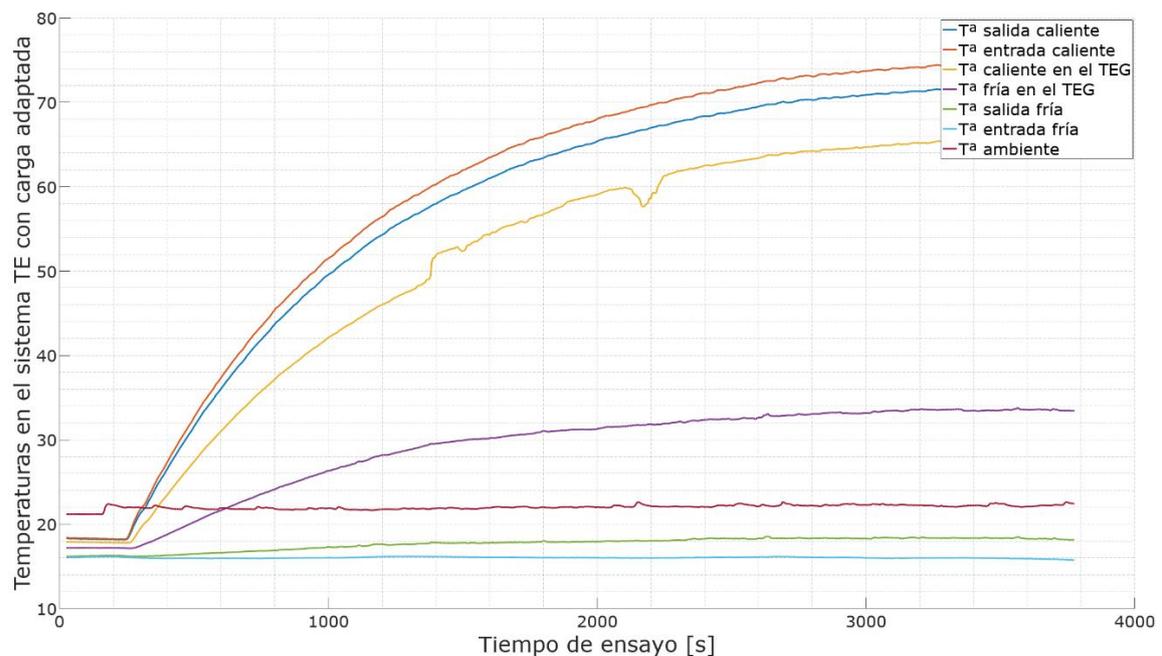


Fig. 137. Valores de temperatura capturados del sistema termoeléctrico con carga.

Partiendo de los valores anteriores se calculan los valores de diferencia de temperatura y de temperatura del agua caliente ($T_{PC} = T_{PC}^{\infty}$) y fría ($T_{PF} = T_{PF}^{\infty}$).

Las diferencias de temperatura que se muestran en las gráficas a continuación (Fig. 138, Fig. 139) junto con su flujo másico, permite calcular el calor aportado al sistema y evacuado del mismo.

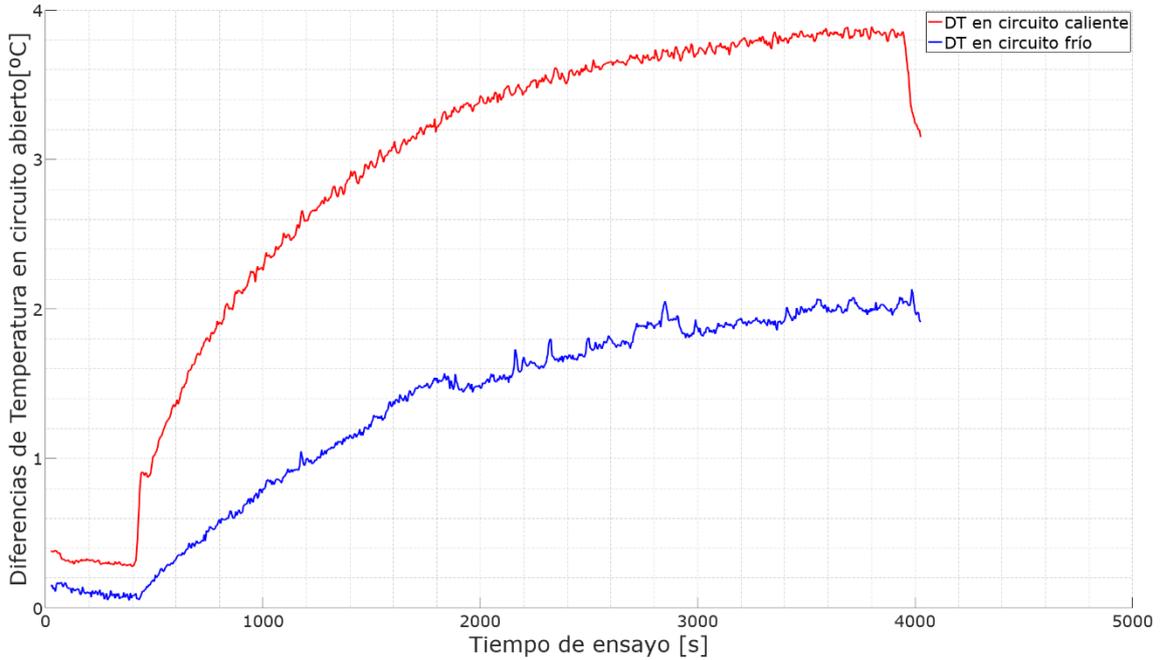


Fig. 138 Valores de diferencia de temperatura en los disipadores del ensayo sin carga.

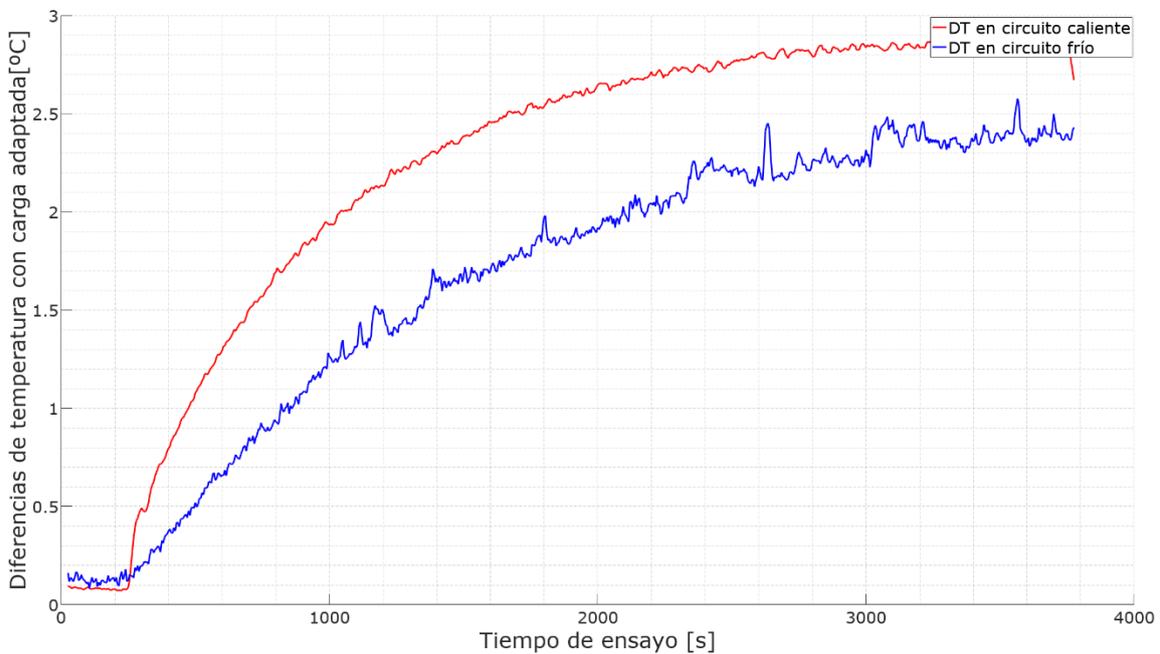


Fig. 139 Valores de diferencia de temperatura en los disipadores del ensayo con carga.

En la Fig. 140 y Fig. 141 se muestra la evolución de los valores de temperatura que se definen en el modelo básico a lo largo del tiempo durante los ensayos sin carga y con carga.

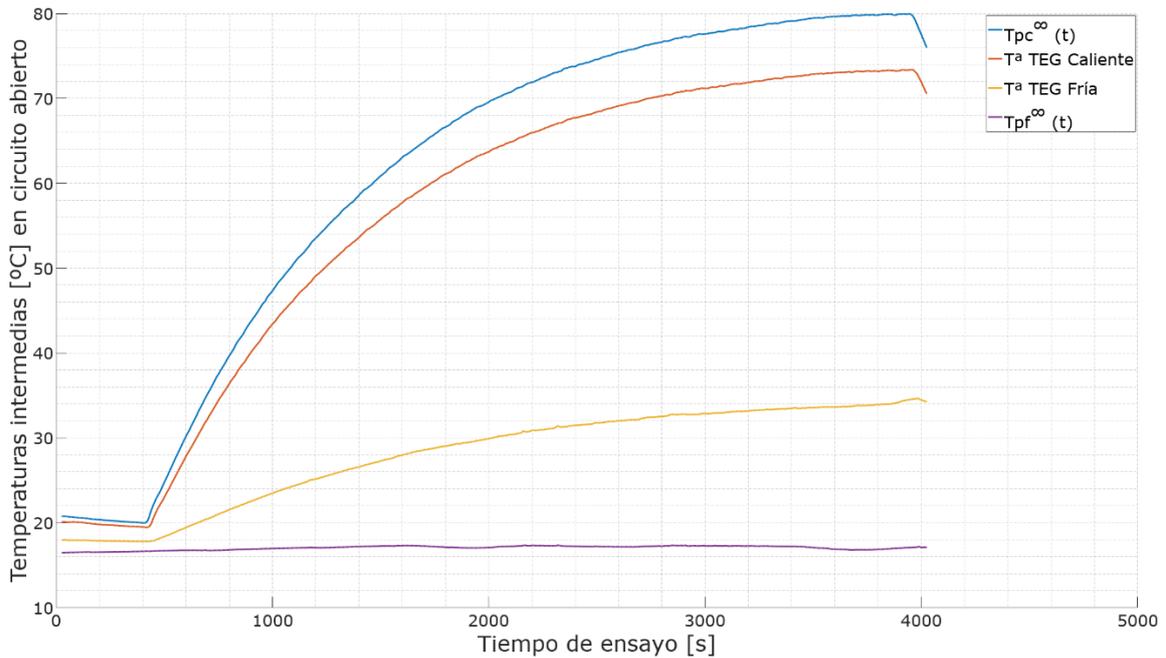


Fig. 140. Valores de temperatura calculados del sistema termoeléctrico sin carga.

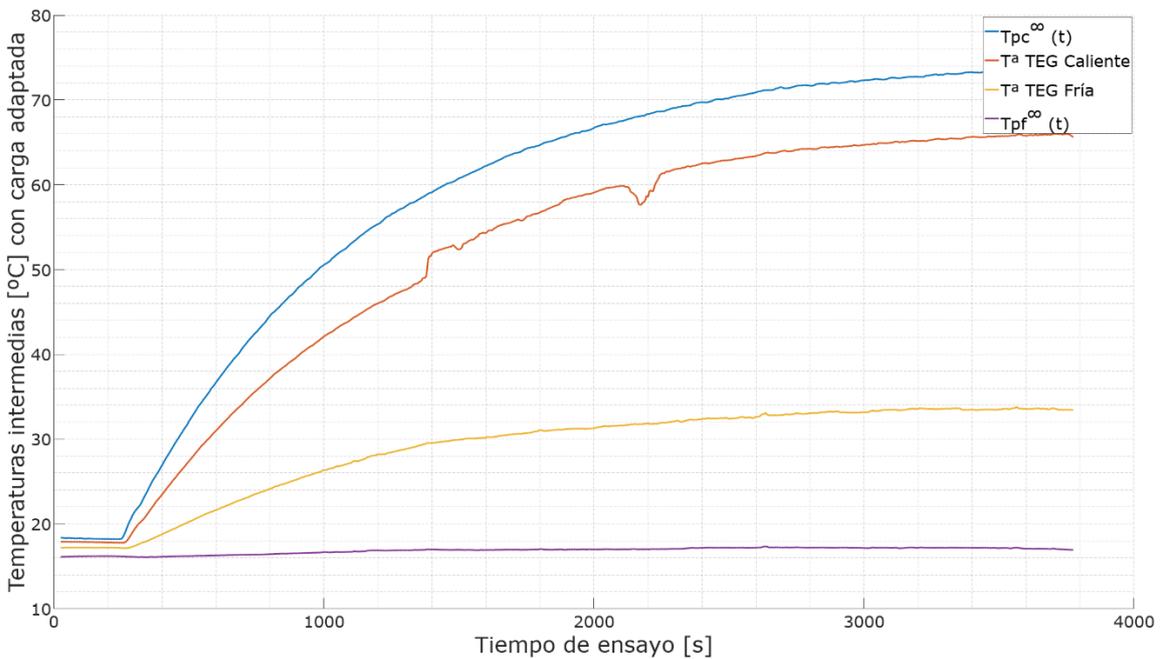


Fig. 141. Valores de temperatura calculados del sistema termoeléctrico con carga.

3.6.2.1.2.- Tensiones generadas en el sistema TE

La captura de tensiones generadas en los tres bloques se muestra en la gráfica Fig. 142 para el ensayo en circuito abierto y en la gráfica Fig. 143 para el ensayo con carga. La tensión generada por el primer bloque se corrige para solventar la reducción de tensión debida a las filas de bloques deteriorados.

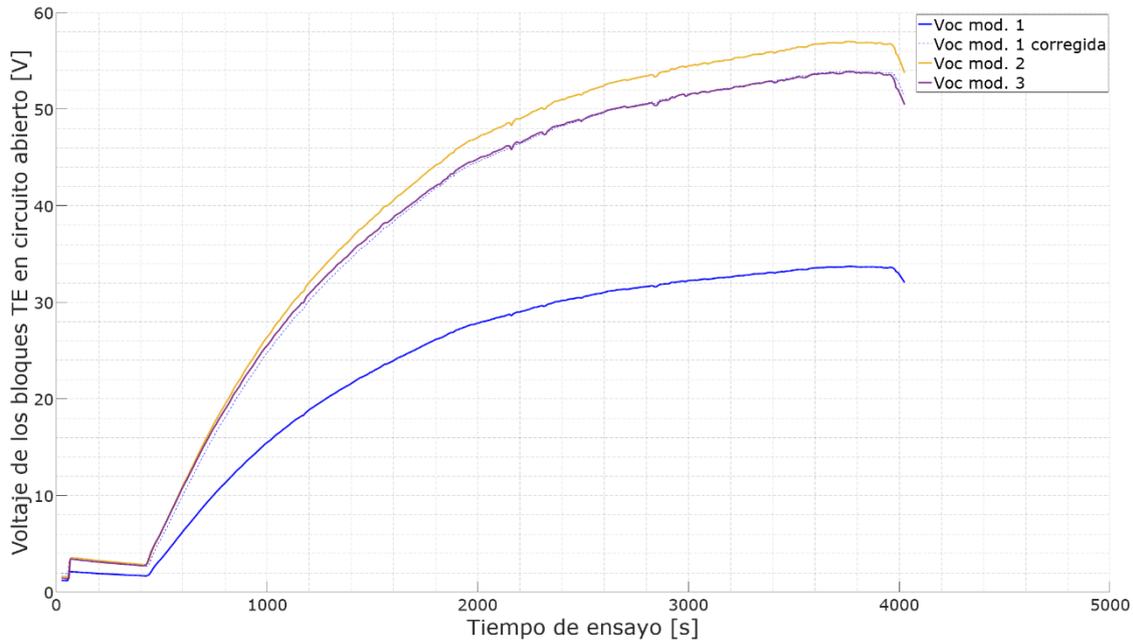


Fig. 142. Voltaje generado por los 3 bloques del TEG en circuito abierto.

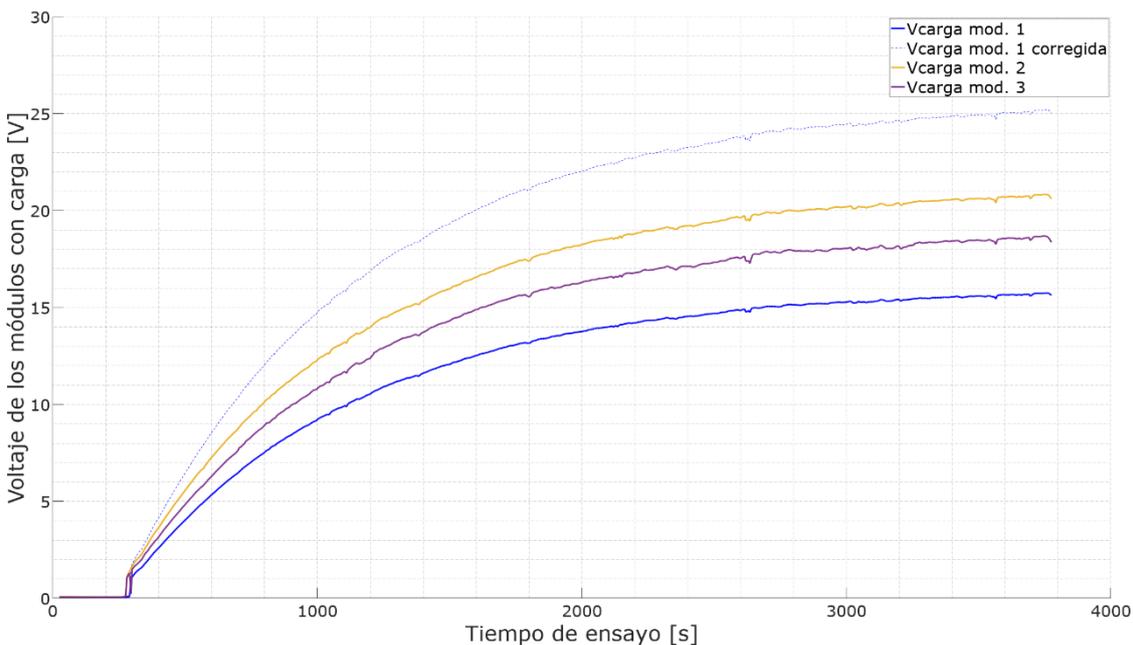


Fig. 143. Voltaje generado por los 3 bloques del TEG con carga.

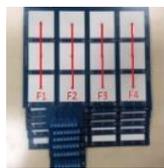
Las tensiones generadas rondan los 50 V en circuito abierto y los 20 V con carga. Par conocer la intensidad y la potencia eléctrica generada es necesario conocer las resistencias eléctricas asociadas a estas mediciones.

3.6.2.2.- Resistencia y resistividad eléctrica

La R_{int} de los módulos comerciales utilizados indicada por el fabricante es de $R_{int} = 1.7 \Omega$, lo que supone una $R_{int} = 5.1 \Omega$ por fila y una $R_{int} = 40.8 \Omega$ por bloque termoelectrico. Por lo tanto, para las medidas con carga se utiliza $R_L = 41 \Omega$ que permite obtener una potencia muy próxima a la máxima.

Sin embargo, las medidas realizadas con el medidor RLC a los bloques termoeléctricos ensamblados antes de iniciar los ensayos diferían ligeramente con respecto a los datos indicados por el fabricante, tal como se puede apreciar en la Tabla 22, medido por triplicado.

Tabla 22. Medidas de R_{int} del sistema TE mediante RLC previas a los ensayos.



	1	2	3	4	5	6
F1	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4
F2	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,4 5,4 5,4	5,3 5,3 5,4	5,4 5,4 5,4
F3	5,4 5,5 5,4	5,4 5,4 5,4	5,5 5,5 5,5	5,5 5,5 5,5	5,5 5,5 5,5	5,4 5,5 5,4
F4	5,5 5,5 5,5	5,5 5,5 5,4	5,5 5,5 5,5	5,5 5,5 5,5	5,4 5,4 5,5	5,6 5,5 5,4

Tras varios ensayos de puesta a punto del sistema, la R_{int} de algunos módulos han sufrido un deterioro considerable de los valores de R_{int} esperados tal como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Medidas de R_{int} del sistema TE mediante RLC tras los ensayos.

Bloque TE	R_{int} del bloque (Ω)	R_{int} de tarjeta (Ω)	R_{int} por fila (Ω)			
			1	2	3	4
1	88,79	51,12	4,71	5,61	24	16,8
		37,67	18,42	6,75	6,68	5,82
2	46,34	23,49	5,86	5,63	5,67	6,33
		22,85	5,68	5,7	5,73	5,74
3	61,14	29,29	6,45	10,15	7,16	5,53
		31,85	7,3	5,84	8,01	10,7

La R_{int} total del bloque 1 se ha elevado a más del doble, por lo que las filas dañadas se puentean para que no interfieran en las medidas, extrapolando los resultados a una situación con estas filas en correcto funcionamiento y valores de R_{int} equivalentes al valor medio de las R_{int} de las filas de su mismo bloque.

La resistividad se calcula directamente conociendo el factor de forma de los dados TE que contienen los módulos TE de acuerdo con la ecuación (12), si bien es un valor de resistividad a temperatura ambiente y no se ha medido su variación con respecto a la temperatura.

3.6.2.3.- Coeficiente Seebeck

Para el cálculo del coeficiente Seebeck se utilizan los datos procedentes del ensayo en circuito abierto donde, al no circular intensidad, la expresión del valor del coeficiente depende únicamente del valor de tensión capturada en cada momento y de la diferencia de temperatura en las caras del material según la ecuación (1).

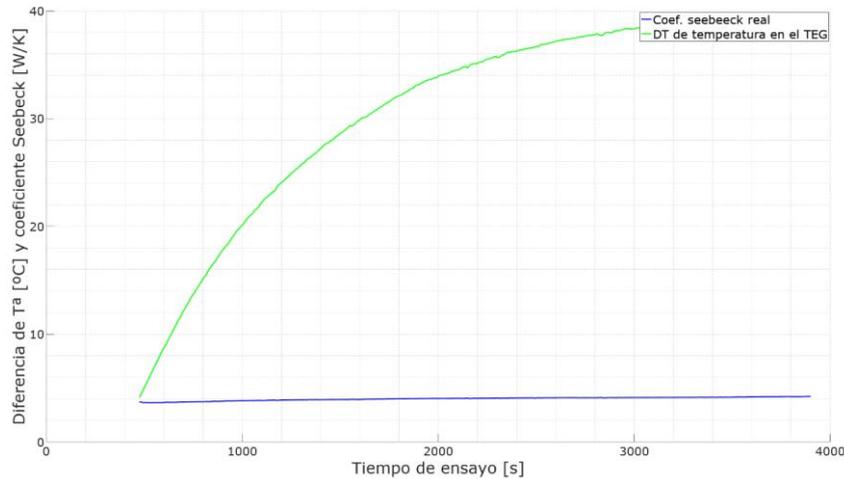


Fig. 144. Diferencia de temperatura en el TEG y coeficiente Seebeck

Se observa que el coeficiente Seebeck permanece relativamente estable a lo largo del ensayo en el rango de las temperaturas de trabajo.

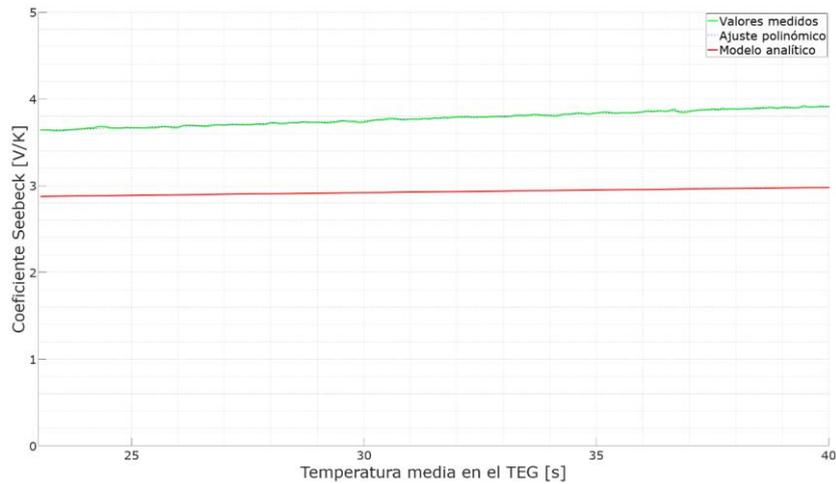


Fig. 145. Comparación del coeficiente Seebeck obtenido frente al modelo analítico en función a la temperatura media en el material TE.

Se observa en la Fig. 145 que el valor del coeficiente Seebeck calculado difiere considerablemente de los valores considerados en el modelo analítico para realizar el dimensionado del sistema. No se trata de un error sino de que los valores utilizados estaban basados en la información disponible previamente, y los valores reales son muy dependientes del fabricante del material y las proporciones de dopantes que hayan utilizado en el crecimiento del cristal de bismuto telur.

Tabla 24. Coeficientes calculados del polinomio de orden 4 del coeficiente Seebeck.

Material N+P	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
Coeficiente Seebeck fabricante [μV/K]	3.3143e+005	-4.3100e+003	2.1019e+001	-4.5523e-002	3.6959e-005

De acuerdo con la expresión polinómica de orden 4 definida en la ecuación (52), la curva que describe el coeficiente Seebeck queda definida por los coeficientes de su polinomio recogidos en la Tabla 24. Si bien puede apreciarse que en el rango de temperaturas de trabajo esta curva puede perfectamente aproximarse a una recta o curva de orden 1.

Estos coeficientes sólo son válidos en el rango de 10 a 85°C que es donde se han tomado datos.

3.6.2.4.- Conductividad térmica.

Se observa en la Fig. 144 que la conductancia térmica obtenida tiene una similitud plausible con la considerada en el modelo analítico corregido recomendado por algunos autores, por lo que se puede afrontar el estudio de los resultados térmicos con la garantía de que los datos capturados están respaldados por el modelo utilizado.

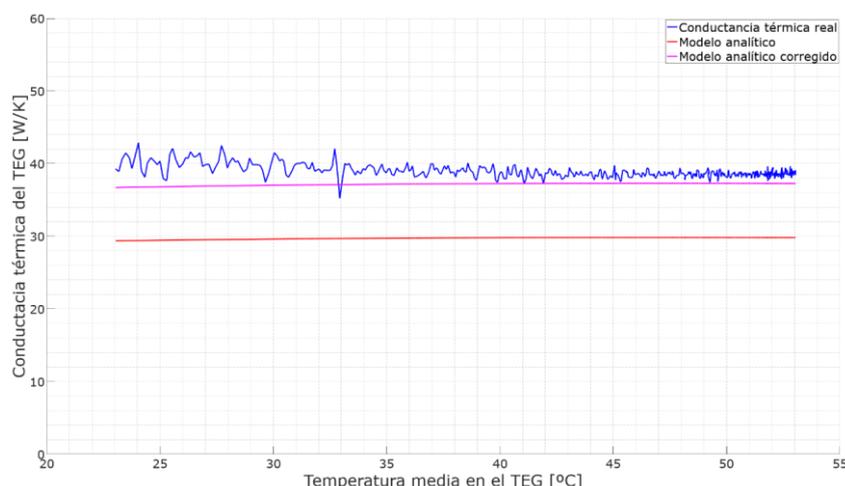


Fig. 146. Comparación de la conductancia térmica obtenida frente al modelo y el modelo analítico corregido en función de la temperatura media en el material TE.

En la Fig. 147 se aprecia que la conductancia térmica de los disipadores tanto frío como caliente es superior al del TEG, tal como cabía esperar. Cuanto mayor fuera la conductividad térmica de los disipadores más se acercaría la solución al caso ideal en que toda la diferencia de temperatura cayera sobre el material termoeléctrico, por lo que aun cumpliendo correctamente los disipadores su función, son muy mejorables y distan mucho de ser considerados ideales.

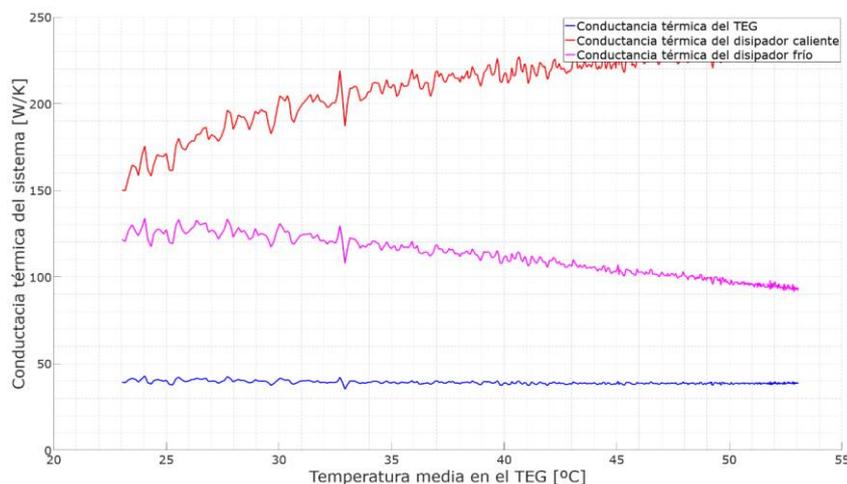


Fig. 147. Conductancia térmica de los intercambiadores frío y caliente frente a la temperatura media.

3.6.2.5.- Coeficientes de transferencia térmica de convección

Este coeficiente, representado habitualmente como h , cuantifica cómo influyen el fluido, la superficie de contacto y el flujo en la transferencia de calor por convección.

Generalmente este coeficiente se calcula cuando se diseña un disipador utilizando programas de diferencias finitas para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes numéricamente, ya que el cálculo analítico presenta muchas dificultades debido a que depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido a través del cual se da la convección; convección forzada o



natural, régimen del fluido laminar o turbulento, la velocidad del flujo, la viscosidad del fluido, la densidad del fluido, la conductividad térmica del fluido, el calor específico del fluido...

Dada la limitación de casuísticas en las que el disipador utilizado va a trabajar, así como la estabilidad del sistema en temperaturas y flujo, y que se dispone de capturas de datos en muchos puntos del sistema, el valor de este coeficiente se despeja directamente de modelo simplificado obteniendo los valores que se muestran en las figuras a continuación (Fig. 147, Fig. 148, Fig. 149, Fig. 150) en función de diferentes parámetros del sistema.

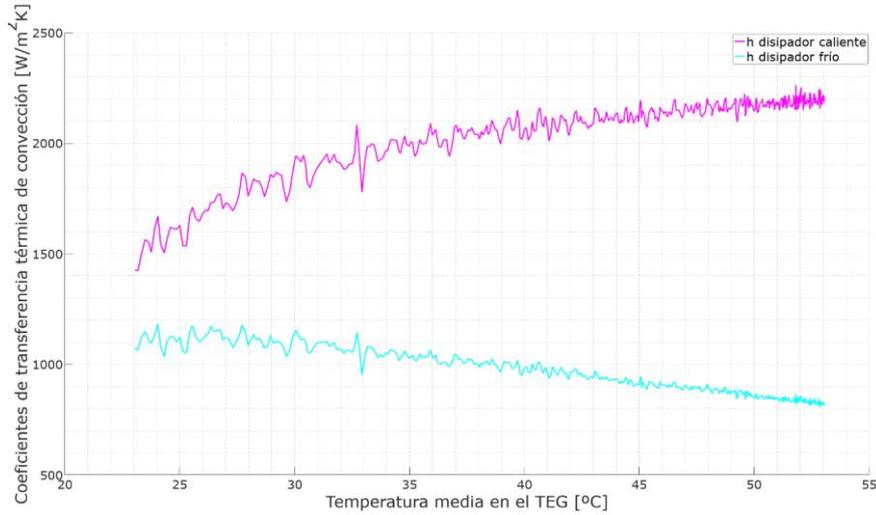


Fig. 148. Coeficientes de transferencia térmica de convección del disipador frío y caliente en función de la temperatura media en el TEG.

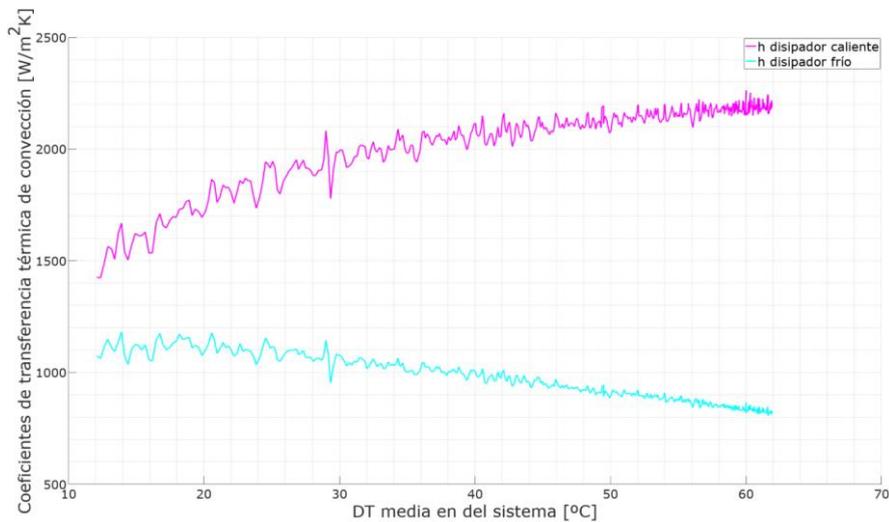


Fig. 149 Coeficientes de transferencia térmica de convección del disipador frío y caliente en función de la diferencia de temperatura en el sistema.

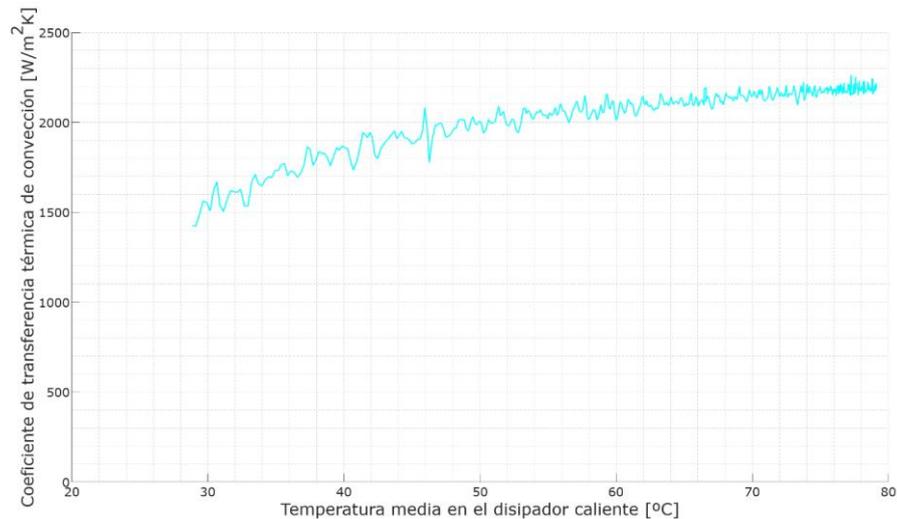


Fig. 150. Coeficiente de transferencia térmica de convección del disipador caliente en función de la temperatura media en el disipador caliente.

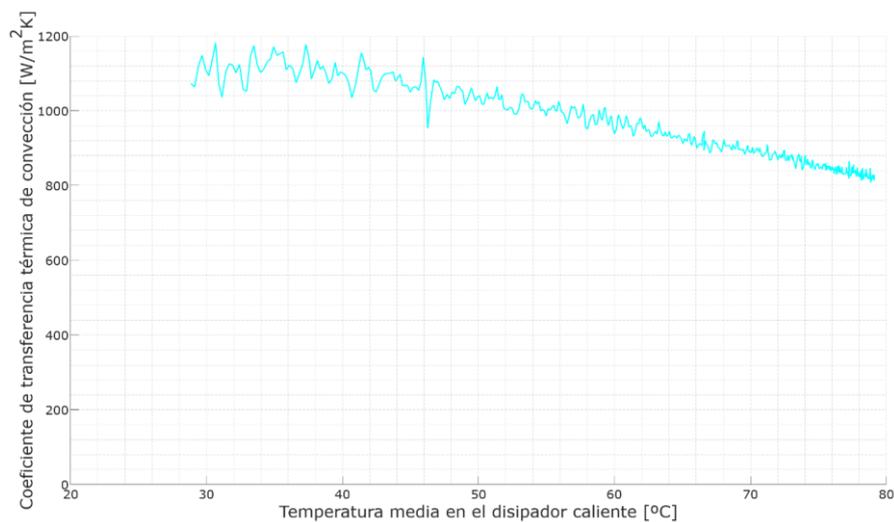


Fig. 151. Coeficiente de transferencia térmica de convección del disipador frío en función de la temperatura media en el disipador frío.

3.6.3.- Resultados del sistema termoeléctrico

Una vez que se dispone del sistema modelizado se procede a comparar los resultados obtenidos con respecto a los resultados esperados de acuerdo con el diseño realizado. Hay que tener en cuenta que el diseño se basó en un modelo analítico que utilizaba parámetros termoeléctricos no suministrados por el fabricante de los módulos TE que se han empleado, por lo que es de esperar que exista diferencia entre ellos, pero que las curvas de tendencia coincidan tanto en forma como en orden de magnitud.

3.6.3.1.- Flujos térmicos

Teniendo en cuenta que se quieren evaluar los resultados de potencia eléctrica generada, se tomarán como referencia los datos capturados en los ensayos con carga adaptada ya que debe existir corriente eléctrica para que se genere potencia, y, por tanto, la potencia y eficiencia sean distintas de cero.

Tal como se indica en el análisis previo de caracterización del sistema, la potencia térmica que circula por el sistema TEG completo viene determinada por la curva que viene indicada por $Q_{IN}(t)$. Siendo la curva $Q_{OUT}(t)$ la resultante del calor entrante desde el disipador caliente más el calor entrante desde el exterior a través de la poliamida (pérdidas) menos la potencia generada en el TEG.

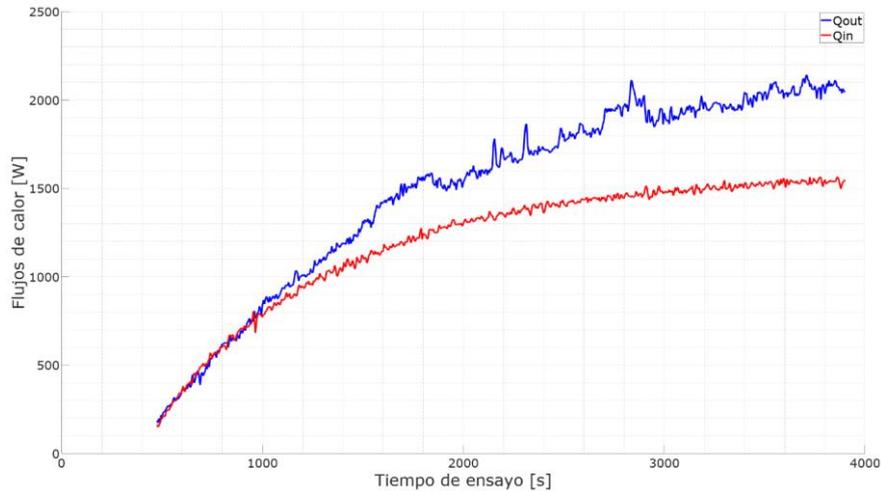


Fig. 152. $Q_{IN}(t)$ y $Q_{OUT}(t)$ en el ensayo con carga.

La potencia aportada al sistema alcanza los 1500 W al final del ensayo.

3.6.3.2.- Potencia eléctrica generada

Se han realizado ensayos con dos flujos máscicos de los fluidos caloportadores. Un primer ensayo con un flujo en el circuito de calentamiento de 15 l/min y 5,75 l/min en el circuito de refrigeración, lejano de las condiciones habituales de funcionamiento del dispositivo y un segundo ensayo con un flujo máscico más próximo a las condiciones de finales de funcionamiento, donde el flujo del circuito de calentamiento alcanza 10 l/min y 8,5 l/min el circuito de refrigeración.

En ambos ensayos se alcanza una potencia máxima generada de 31W a los 3000 segundos de ensayo como muestran las figuras Fig. 153 y Fig. 156, si bien estos resultados no son significativos no tienen por qué coincidir las mismas condiciones térmicas en el mismo instante de tiempo del ensayo. Por ello, en las gráficas de la Fig. 154 y la Fig. 157, se observa la evolución de la potencia eléctrica generada con respecto a la temperatura media en el TEG y se observa que ambos parten de una temperatura inicial cercana a 20°C y alcanzan cerca de 50°C al finalizar el ensayo. Sin embargo, el parámetro más adecuado para la comparación es la diferencia de temperatura en el TEG, donde, tal como muestran las Fig. 155 y Fig. 158, se puede observar que se alcanzan los 31 W con 31°C de diferencia de temperatura con un flujo máscico lejano, mientras que en el caso del flujo máscico próximo se alcanzan con 34°C de diferencia de temperatura. Puede parecer una diferencia menor, pero hay que tener en cuenta que la curva que describe la potencia generada es de carácter exponencial y en esos 3º se incrementa la potencia 6 W, por lo que se puede considerar significativo.

En cualquier caso, la modificación de los sensores de temperatura entre los ensayos puede tener cierta afectación en la diferencia de temperatura entre ambos ensayos ya que la potencia generada es muy similar en ambos.

3.6.3.3.- Flujo másico lejano (15-5)

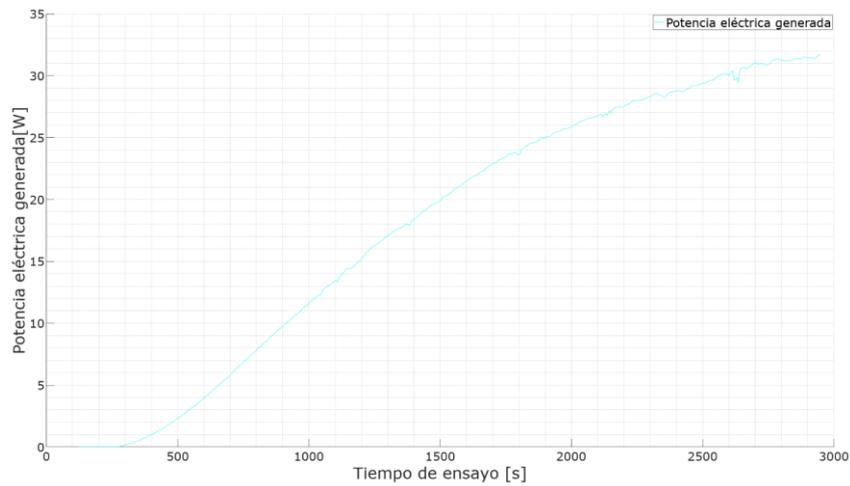


Fig. 153. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para un flujo másico(15-5)

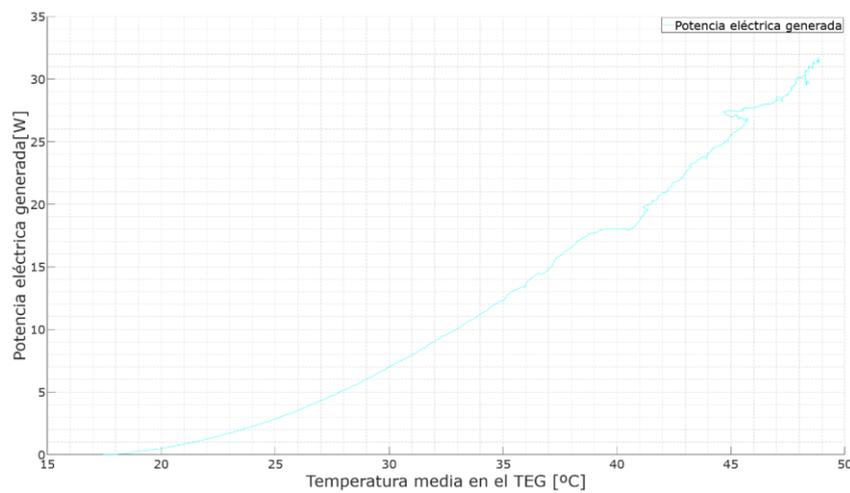


Fig. 154. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (15-5).

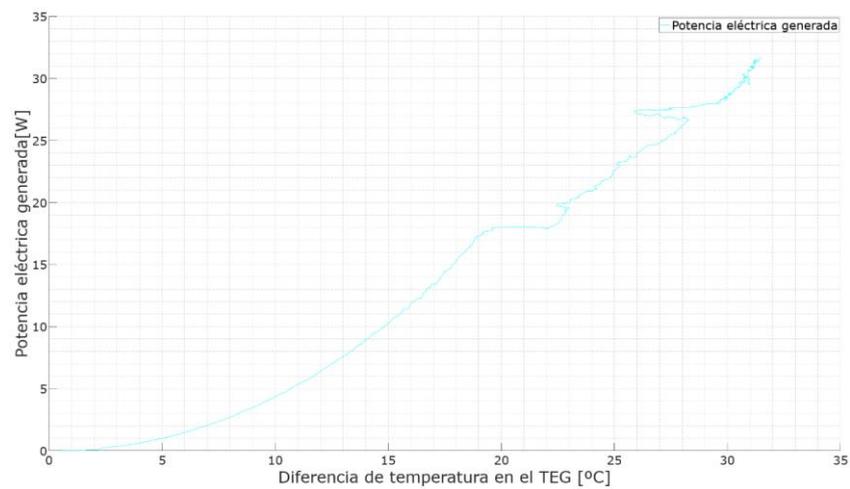


Fig. 155. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (15-5).



3.6.3.4.- Flujo másico próximo (10-8)

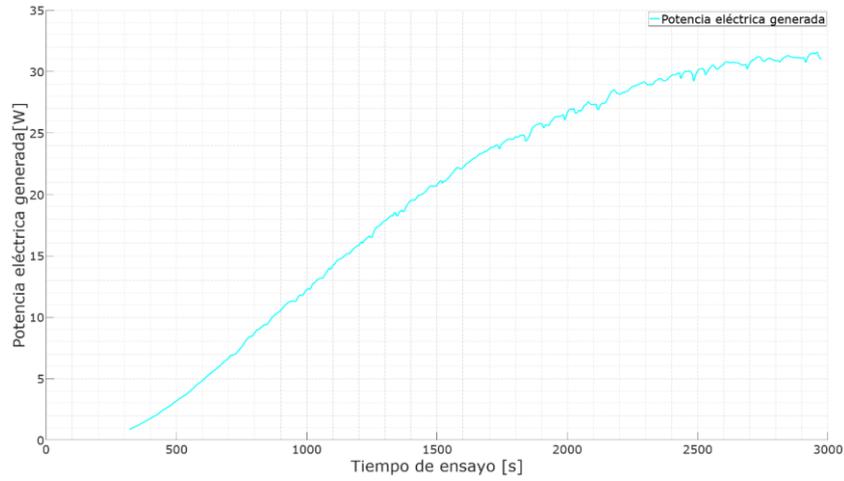


Fig. 156. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para un flujo másico(10-8)

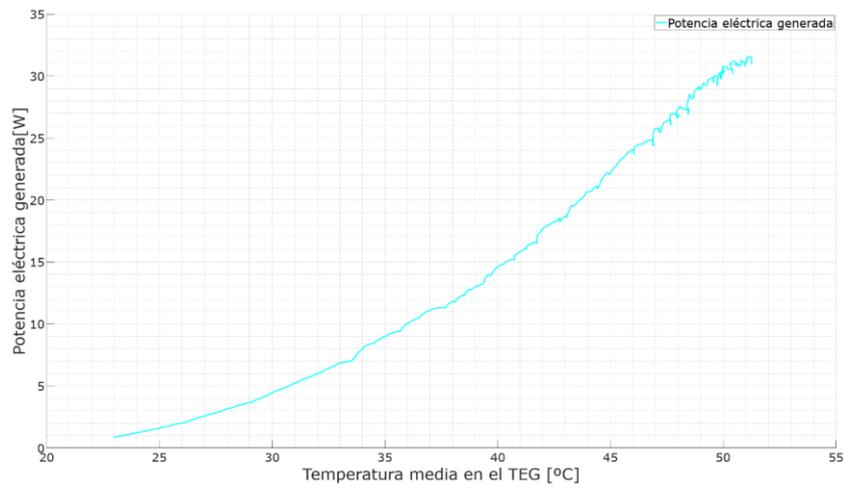


Fig. 157. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (10-8).

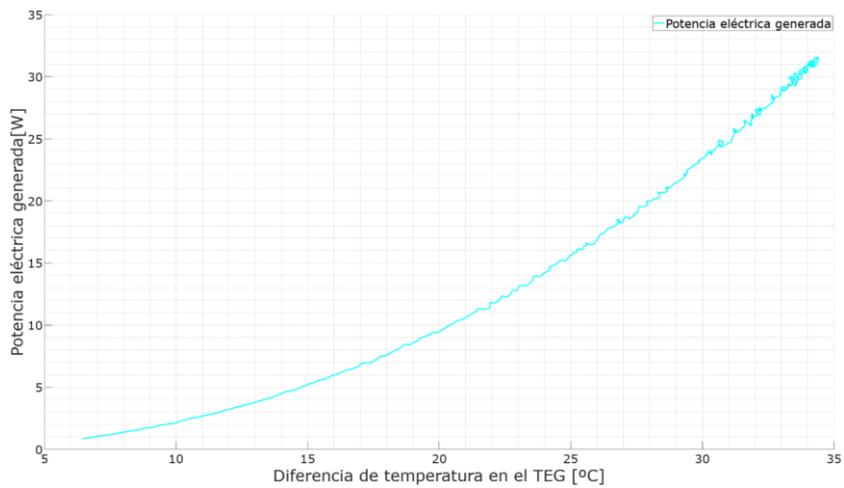


Fig. 158. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (10-8).

3.6.3.5.- Eficiencia de generación eléctrica

Sobre los datos de los mismos ensayos del apartado anterior se evalúa la eficiencia, alcanzando un punto máximo de eficiencia en torno a $\eta = 2.8$ (Fig. 159) para el flujo másico lejano, mientras que con el flujo másico próximo se obtiene $\eta = 2$ (Fig. 162).

A igual diferencia de temperatura en los ensayos, ambos resultados deberían arrojar los mismos resultados, sin embargo, puede observarse en la Fig. 161 y Fig. 164, cómo para una misma diferencia de temperatura todas las medias del ensayo para flujo másico lejano marcan una eficiencia superior en 0,5 al ensayo con flujo másico próximo. Se trata de una incoherencia atribuible a errores en la instrumentación y captura de datos, y por la homogeneidad en la diferencia, que se mantiene a lo largo de todas las temperaturas, es presumiblemente debido a un error en la instalación de los sensores de temperatura.

En cualquier caso, cabe resaltar que la línea de tendencia para el caso del flujo cercano ofrecería una eficiencia $\eta = 0$ para $DT = 0$, como cabe esperar, no ocurriendo lo mismo para el caso del flujo másico lejano, por lo que se utilizarán los datos de flujo másico próximo, como los más adecuados, para comparar los diferentes modelos.

Cabe señalar que el orden y la forma de las curvas de eficiencia, al igual que las de potencia, es coincidente con lo esperable de acuerdo con el diseño realizado y es capaz de generar lo suficiente (18W) para alimentar el VCTE si las condiciones de funcionamiento permiten alcanzar la diferencia de temperatura necesaria (27°C).



3.6.3.6.- Flujo másico lejano (15-5)

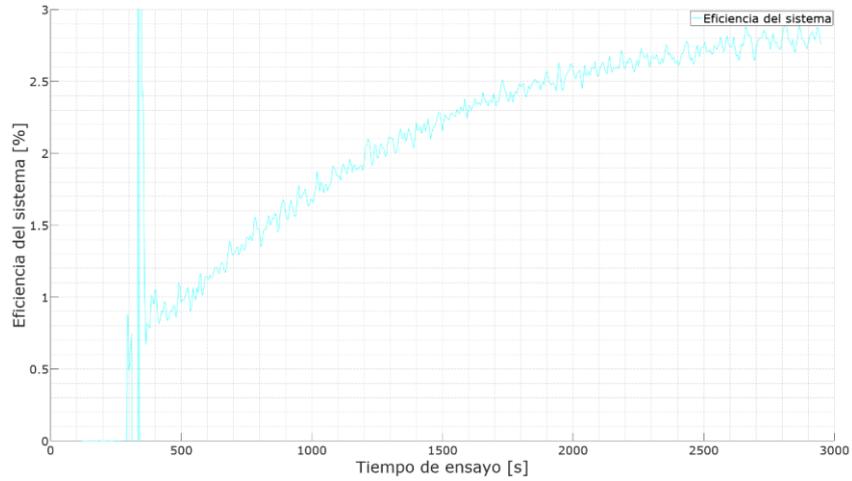


Fig. 159. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para un flujo másico (15-5).

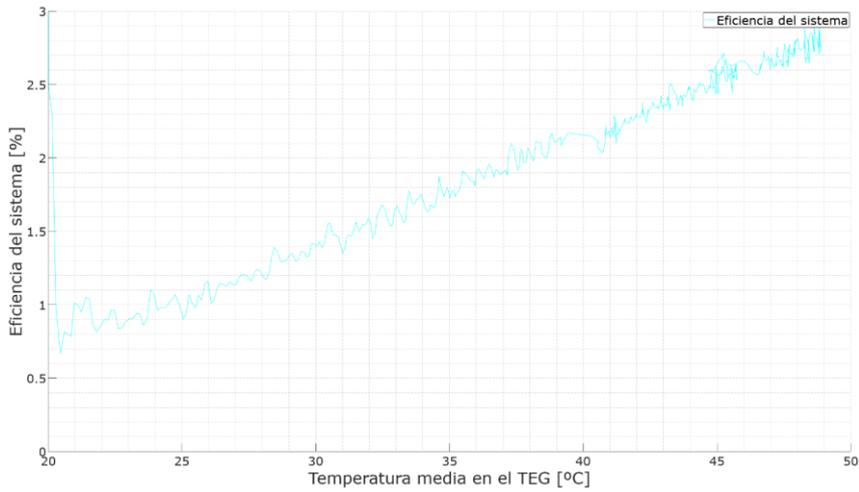


Fig. 160. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (15-5).

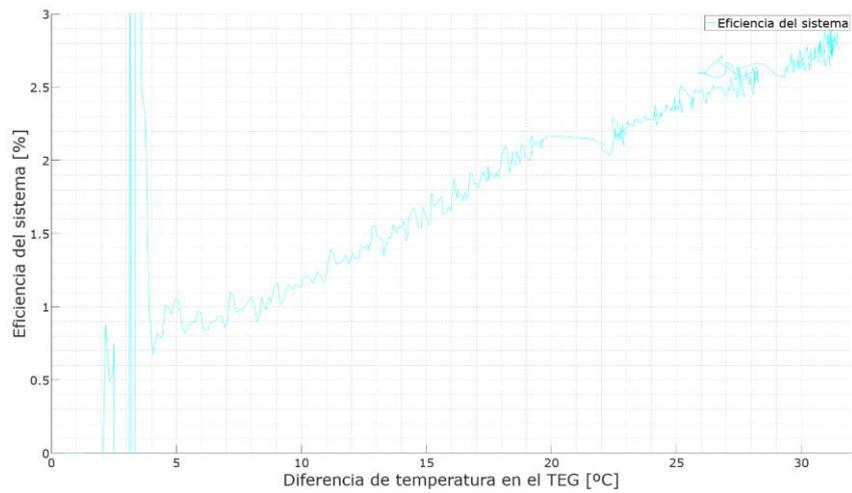


Fig. 161. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (15-5).

3.6.3.7.- Flujo másico próximo (10-8)

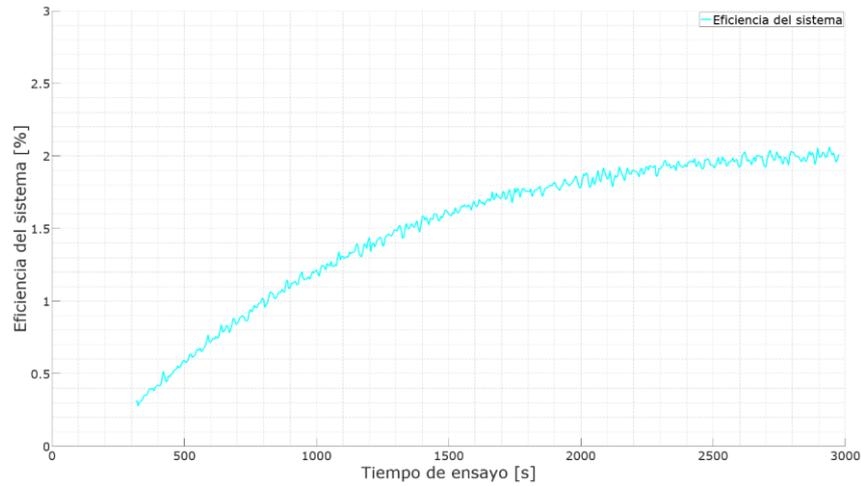


Fig. 162 Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para un flujo másico (10-8).

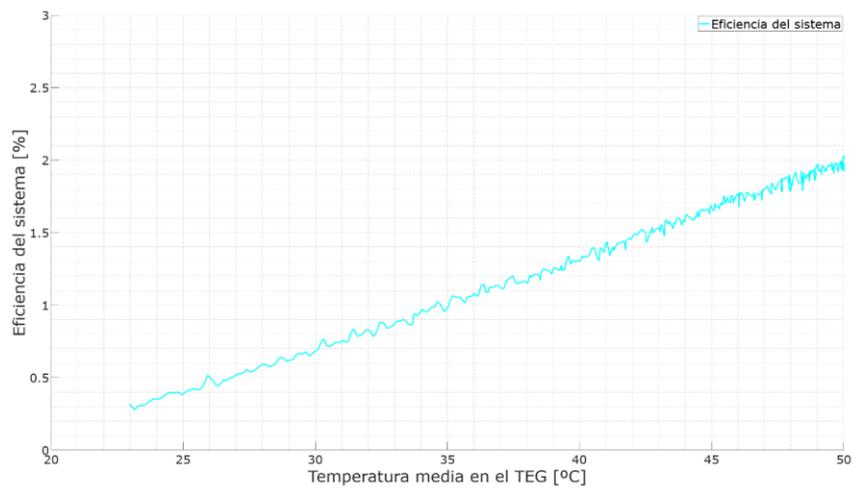


Fig. 163. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para un flujo másico (10-8).

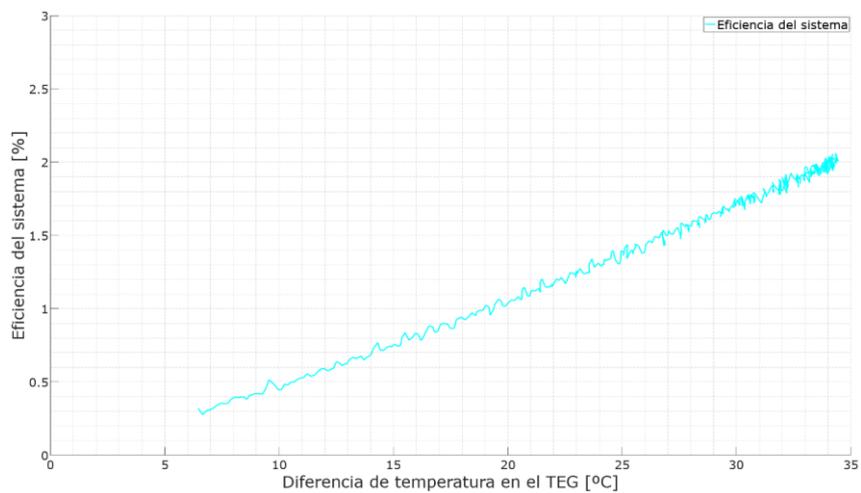


Fig. 164. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para un flujo másico (10-8).

3.6.3.8.- Curva característica

En la Fig. 165, se muestra la curva característica del sistema termoelectrico ante diversas diferencias de temperatura.

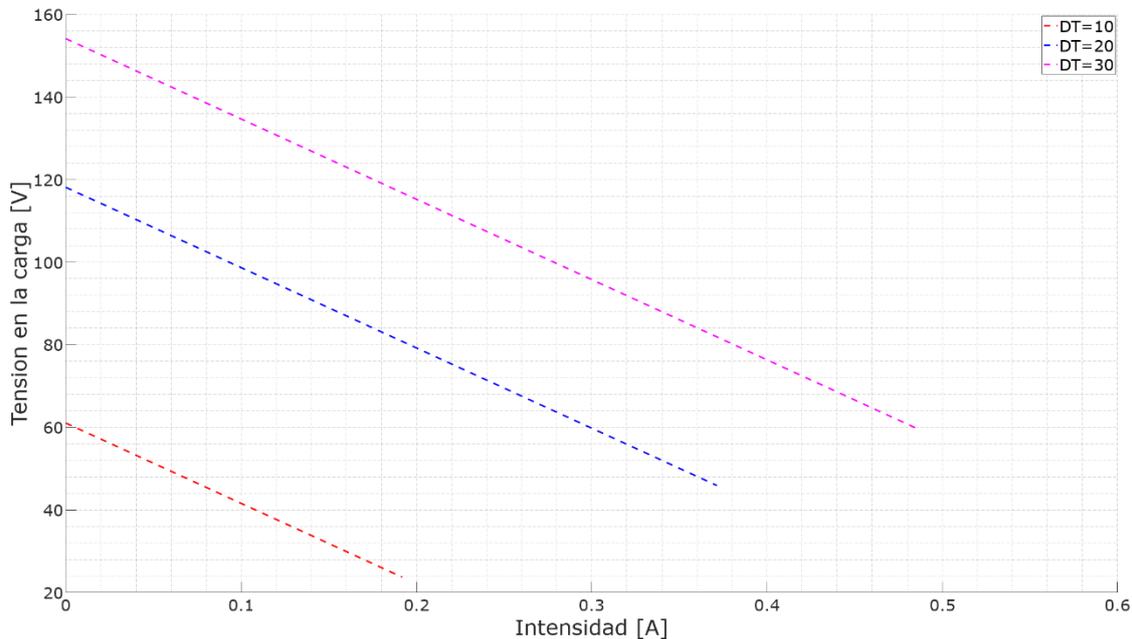


Fig. 165. Curva característica del sistema termoelectrico.

Puede apreciarse que la potencia máxima conseguible con carga adaptada alcanzaría 30.8 W, 17.7 W y 4.9 W para 30°C, 20°C y 10°C de diferencia de temperatura respectivamente, cuando en realidad con la carga utilizada se están obteniendo únicamente 23.4 W, 10 W y 2 W, para las diferencias de temperatura comentadas.

Esto pone de manifiesto dos cuestiones. La primera es que la resistencia de carga utilizada no coincide con la resistencia de carga adaptada teórica que se había calculado debido al deterioro del material. Y la segunda que la diferencia de temperatura necesaria para alcanzar los 18W objetivo es considerablemente inferior ($DT = 20^\circ$) si se emplea una adaptación de impedancias. Hasta 7°C menos, por lo que la impedancia de entrada de la electrónica que será la carga del sistema termoelectrico juega un papel crítico en el alcance de los objetivos.

3.6.4.- Comparación de resultados de los modelos

Se aprecia en las curvas de la Fig. 166 la comparación de resultados del modelo de sistema TE simplificado con respecto a los modelos ideal y no ideal del módulo TE. Se aprecia que los valores de potencia eléctrica generada experimentan una sensible mejora en los resultados a medida que aumenta la diferencia de temperatura, debido como se ha comentado a la diferencia de valores de las propiedades termoelectricas empleadas para los cálculos de potencia generada de los modelos ideal y no ideal con respecto al modelo unidimensional simplificado. Pero se pone de manifiesto la similitud en el resultado de los modelos, el orden de magnitud y la tendencia de las curvas.

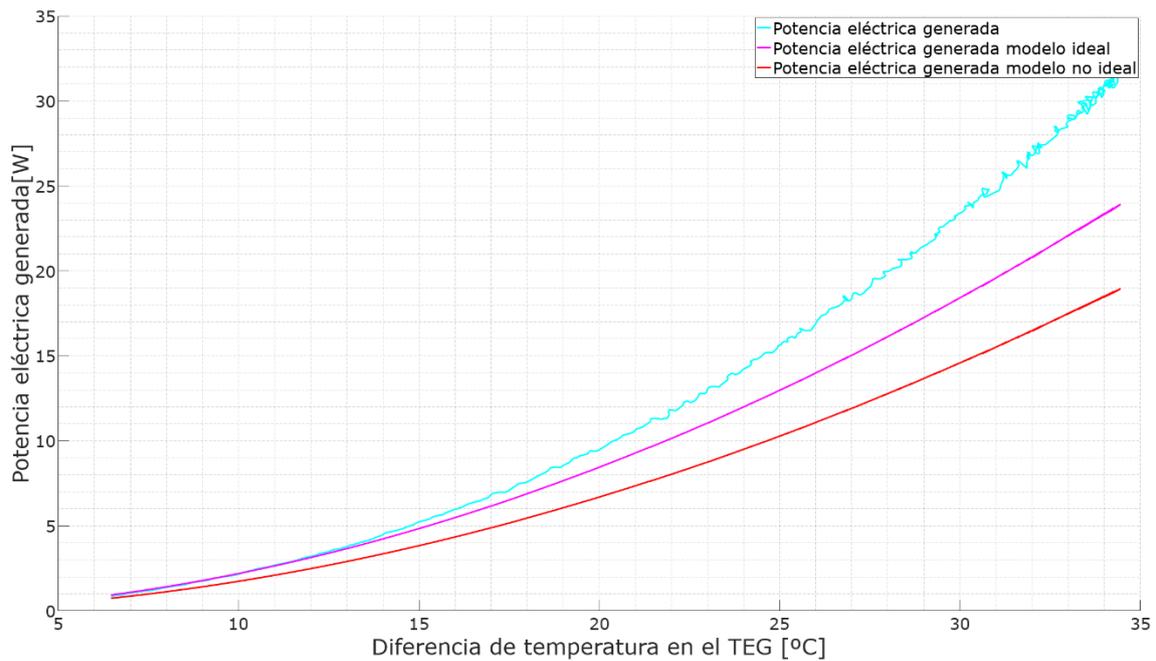


Fig. 166. Comparativa de la potencia eléctrica generada entre el modelo unidimensional simplificado, el modelo ideal y no ideal.

La comparación de la eficiencia que se muestra en la Fig. 167, pone de manifiesto una todavía mayor similitud entre los modelos, por lo que se puede concluir que la versión del modelo unidimensional simplificado disponible es válida para modelizar el TEG y estudiar su comportamiento en condiciones reales de funcionamiento.

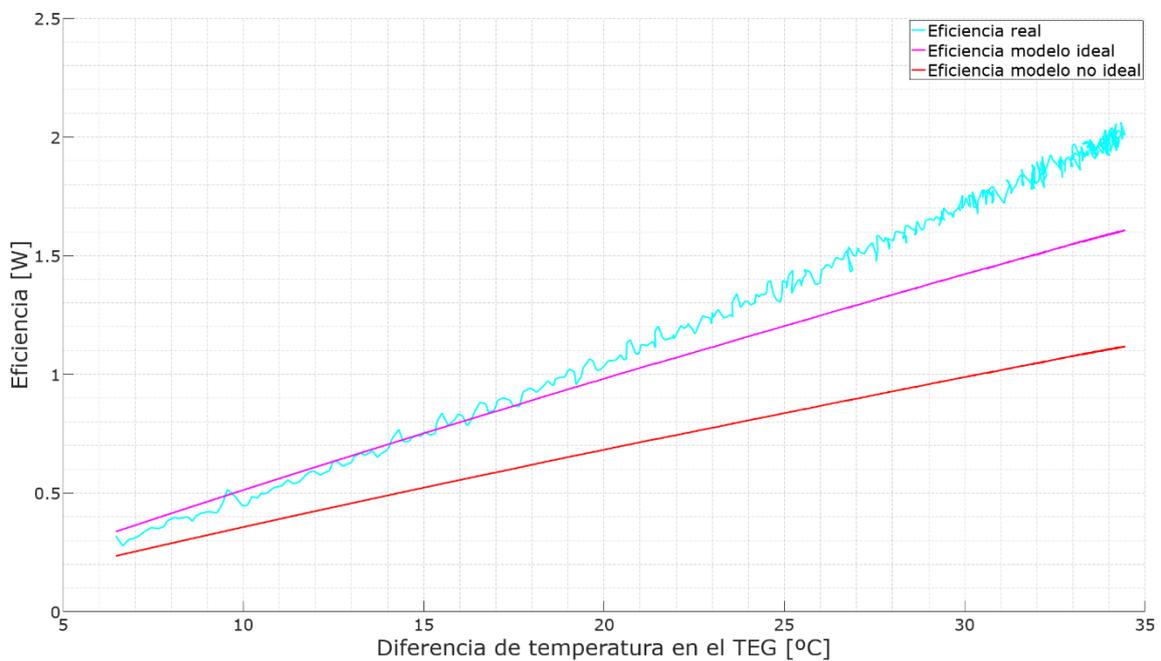


Fig. 167. Comparativa de la eficiencia eléctrica entre el modelo unidimensional simplificado, el modelo ideal y no ideal.



3.7.- Conclusiones

En el capítulo 3 se ha descrito el modo de trabajo de un sistema de generación termoeléctrico y se ha desarrollado un sistema completo basando los cálculos de generador termoeléctrico en un modelo analítico no ideal, un modelo preliminar para permitir el diseño. Se ha desarrollado un modelo analítico unidimensional simplificado que englobará la totalidad del sistema TEG y se ha comparado con su comportamiento experimentalmente.

- El modelo analítico unidimensional simplificado es capaz de predecir la generación termoeléctrica de aplicaciones de recuperación del calor residual para la generación de energía eléctrica para bajas temperaturas.
- El diseño termoeléctrico realizado tiene la capacidad de cumplir sobradamente los objetivos establecidos, aunque dependerá de las condiciones de contorno que se establezcan en próximos capítulos. El deterioro de los materiales termoeléctricos puede poner al límite el alcance de los objetivos, siendo necesario un estudio de su evolución en el tiempo.
- La simplificación de la metodología de ensayo en el establecimiento del estado estacionario ha resultado coincidente en resultados con las estimaciones de los modelos de partida.

El modelo computacional desarrollado resulta en una herramienta muy útil para la caracterización y simulación de aplicaciones de generación termoeléctrica en escenarios de *energy harvesting* de baja temperatura.

Igualmente, al inicio del capítulo se han sentado las bases teóricas y desarrollado una metodología numérica implícita unidimensional de un sistema termoeléctrico bidimensional de aplicación en el capítulo 6, donde las geometrías de los dados difieren de las convencionales y la aplicación de modelos analíticos resulta excesivamente complicado.

- Las limitaciones de la metodología ponen de manifiesto un trabajo de continuidad necesario en el desarrollo de la misma, pero de igual manera permiten reconocer el enorme valor que una herramienta de estas características puede representar para análisis de geometrías y materiales complejos.

CAPÍTULO 4 ARQUITECTURA DEL VENTILOCONVECTOR TERMOELÉCTRICO Y METODOLOGÍA CARACTERIZACIÓN.



4.1.- Introducción.

El capítulo 4 presenta dos fases que pueden ser abordadas por separado. En una primera fase se diseñará y desarrollará un VC-TE completo, y posteriormente se caracterizará el funcionamiento del VC-TE alimentado de manera autónoma por el sistema termoeléctrico del capítulo anterior, alcanzando una expresión de la eficiencia y potencia generada por conjunto en función de los parámetros de diseño del sistema termoeléctrico. Se validará el modelo simplificado como herramienta de diseño termoeléctrico.

En la segunda fase se abordarán los pasos desarrollados para disponer de una evidencia de la mejora de la eficiencia de un ventilador frente a un radiador convencional, para lo que se realizará la comparación de los consumos de un sistema de calefacción convencional (caldera convencional + radiador de alta temperatura) frente a los consumos de un sistema alternativo con Fan-Coil como unidad terminal, en iguales condiciones ambientales.

4.2.- Diseño completo del VC-TE.

En este apartado se pretende detallar el conjunto diseñado del VC-TE, incluyendo desde la integración del sistema TEG del capítulo anterior hasta la adaptación electrónica de la potencia eléctrica generada, así como la adaptación hidráulica del conjunto.

4.2.1.- Estudio de alternativas de diseño para la electrónica de potencia.

Entendiendo por electrónica de potencia aquella electrónica destinada a adaptar la forma de la señal disponible a una nueva forma en tensión y corriente requerida por la carga para su correcto funcionamiento, y optimización de la entrega de potencia, en este apartado se contemplan todas las unidades requeridas para este fin.

4.2.1.1.- Esquema de funcionamiento del sistema electrónico

En el diagrama de la Fig. 168 se muestran las partes principales del sistema de alimentación eléctrica. El diagrama que se muestra es una versión inicial completa, pero no validada, que permite comprender el alcance del estudio en su vertiente más amplia, si bien no se quiere con esto decir que el ventilador final usado sea AC, ni que se vayan a emplear inversores, pero sí que su estudio será necesario. La tensión proveniente de los módulos termoeléctricos se ha de convertir a una tensión que nominalmente será de 12 voltios. Esta será la tensión de alimentación para la bomba de agua.

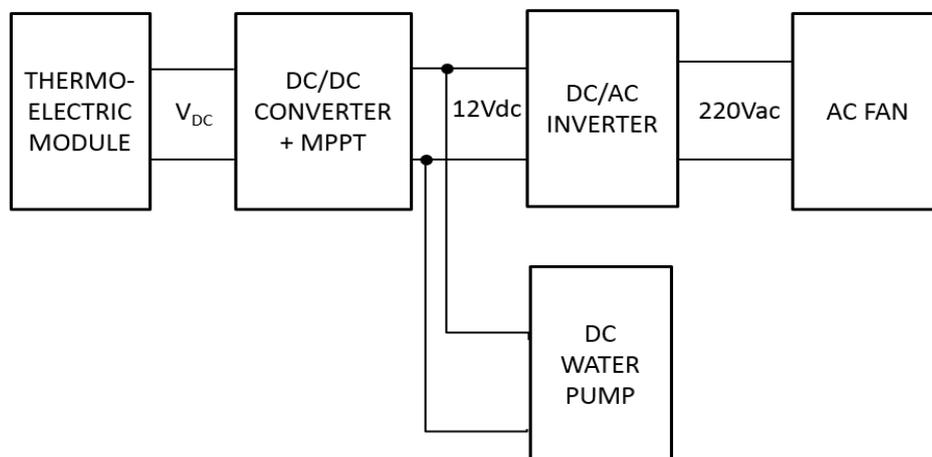


Fig. 168. Diagrama de bloques de la electrónica de potencia



La alimentación del ventilador se lleva a cabo partiendo de esta tensión de 12 voltios mediante un convertidor DC/AC, que suministrará la tensión 220V AC/ 50 Hz requerida por el ventilador.

Los módulos TE ofrecen dos posibilidades de conexionado, en serie y en paralelo, con las características teóricas de la Tabla 25.

Tabla 25. Configuraciones de conexionado serie-paralelo de los módulos termoeléctricos.

Configuración	Características
24 módulos TE en serie	<p>R = 43 Ohm aprox.</p> <p>V en circuito abierto = 33 V aprox.</p> <p>V con carga adaptada = 16.5 V aprox.</p> <p>I con carga adaptada = 0.4 A</p> <p>P con carga adaptada = 6.5 W aprox.</p>
2 ramas en paralelo de 12 módulos TE en serie por cada rama.	<p>R = 11 Ohm aprox.</p> <p>V en circuito abierto = 16.5 V aprox.</p> <p>V con carga adaptada = 8 V aprox.</p> <p>I con carga adaptada = 0.8 A</p> <p>P con carga adaptada = 6.5 W aprox.</p>

4.2.1.2.- Caracterización de los convertidores.

Se utilizan dos convertidores para transformar la forma de la señal eléctrica.

- Un DC/DC para transformar una tensión de entrada variable entre 0 y 24V, correspondiente a la generación del TEG desde la situación de apagado hasta que se estabiliza en la temperatura de funcionamiento, a 12 V que se utilizarán para alimentar dos sistemas: la bomba de agua y el DC/AC.
- Un DC/AC para transformar la señal de 12 V procedente del DC/DC en la tensión alterna que el ventilador del VC-TE necesita.

Cabe señalar que los aspectos más críticos de estos convertidores están relacionados con su eficiencia de conversión, dado el coste que supone la generación de la electricidad.

Por otro lado, la impedancia de entrada y el rango de tensiones de trabajo que permiten manejar son también parámetros de gran importancia.

4.2.1.3.- Caracterización del convertidor DC/DC.

Se utiliza el convertidor DDR-60G-12 de la marca MEAN WELL que permite un rango de entrada de 9-36VDC y 8A, capaz de convertir una potencia máxima de 60 W. Las características cuadran con los requisitos del sistema.

Para calcular la eficiencia de conversión se conectan dos cargas de 24 y 8,7 ohmios a la salida del convertidor, alcanzando potencias de 6 y 16 watios respectivamente. Se verifica la potencia de entrada variando sucesivamente la tensión de entrada al módulo entre los 8 y los 24 voltios. En la Tabla 26 y la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos y la eficiencia calculada para cada una de las cargas y puntos de tensión.

Tabla 26. Eficiencia del convertidor DC/DC trabajando con una carga de 24 Ohm

Vin [V]	Vout [V]	R [Ω]	I [A]	Pout [W]	Pin [W]	Rend%
8,00	12,08	24,00	0,84	6,08	6,72	0,90
12,00	12,08	24,00	0,57	6,08	6,84	0,89
16,00	12,08	24,00	0,43	6,08	6,88	0,88
20,00	12,08	24,00	0,35	6,08	7,00	0,87
24,00	12,08	24,00	0,30	6,08	7,20	0,84

Tabla 27. Eficiencia del convertidor DC/DC trabajando con una carga de 8,7 Ohm

Vin [V]	Vout [V]	R [Ω]	I [A]	Pout [W]	Pin [W]	Rend%
8,00	12,08	8,70	2,46	16,77	19,68	0,85
12,00	12,08	8,70	1,62	16,77	19,44	0,86
16,00	12,08	8,70	1,20	16,77	19,20	0,87
20,00	12,08	8,70	0,96	16,77	19,20	0,87
24,00	12,08	8,70	0,80	16,77	19,20	0,87

Se observa en los resultados, que en el peor de los casos las pérdidas son de unos 3W (rendimiento del orden del 85%).

Experimentalmente se ha comprobado que la tensión mínima que proporciona este convertidor es de 10 V de salida.

4.2.1.4.- Caracterización del convertidor DC/AC

Se preseleccionan dos convertidores de las marcas IPS500 y Too Goo. Para caracterizarlos se suministran tensiones de 10 V, que era la mínima suministrable por el DC/DC, y de 12 V, que es la tensión nominal, variando las velocidades del ventilador.



Fig. 169. Convertidores DC/AC preseleccionados de las marcas IPS500 y Too Goo

Se observa en la Tabla 28 que, al reducir la tensión de entrada, la fuente Too Goo no es capaz de mantener la tensión de salida de 220 voltios. Esta es una característica no deseada, pero que por otro lado puede dar la ventaja de poder adaptar el consumo del ventilador a la potencia disponible de los módulos termoeléctricos.

Tabla 29. Respuesta del convertidor DC/DC IPS500.

Inverter IPS500 a 10'5 voltios					Inverter IPS500 12 voltios				
Selector	Velocidad (tacómetro)	Tension	Corriente	Potencia de la fuente DC	Selector	Velocidad (tacómetro)	Tension	Corriente	Potencia de la fuente DC
Vacio		240	0,45	5,6	Vacio		210	0,5	6,8
V1	635	240	2,58	27	V1	665	210	2,03	25
V2	1700	240	2,72	28,6	V2	1350	210	2,28	27
V3	3500	240	2,76	29	V3	3500	210	2,5	31

Tabla 28. Respuesta del convertidor DC/DC Too Goo.

Inverter Too Goo 10 voltios					Inverter Too Goo 12 voltios				
Selector	Velocidad (tacómetro)	Tension	Corriente DC	Potencia de la fuente DC	Selector	Velocidad (tacómetro)	Tension	Corriente DC	Potencia de la fuente DC
Vacio		195	0,45	4,5	Vacio		230	0,77	9,35
V1	635	195	2,06	20,6	V1	665	230	2,14	25,9
V2	1700	195	1,88	19	V2	1350	230	2	24,3
V3	3500	195	1,7	17,1	V3	3500	230	2,11	25,6

Se observa en la Tabla 29 que la regulación de la tensión de salida de la fuente IPS500 es más estable, pero se aprecian dos inconvenientes para su aplicación:

- Al caer la tensión de entrada, la tensión convertida varía, dentro de los límites aceptables del suministro AC, pero la potencia no. En condiciones de baja generación de potencia de los módulos termoelectricos, esto supone un inconveniente, ya que no se podría adaptar el consumo del sistema a la potencia disponible.
- La etapa IPS500 tiene menor variación de potencia con las variaciones de la tensión de entrada.
- La etapa Too Goo tiene menor consumo en vacío.
- Las pérdidas de potencia son del orden de 6 vatios.

4.2.1.5.- Caracterización del ventilador.

Se evalúan dos ventiladores; un ventilador DC (ahorrando la necesidad del convertidor DC/AC) y uno AC, que incorpora de serie el equipo ventiloconvector con idea de minimizar los cambios sobre el diseño original del equipo.

4.2.1.6.- Ventilador AC.

El convector que se utiliza está definido en las especificaciones y no es una variable de diseño en la solución estudiada. Utiliza un ventilador AC con motor monofásico que se puede conectar directamente a la red AC, por lo que para funcionar se requiere una tensión AC de 220V 50Hz.



Fig. 170. Ventilador AC incorporado en el modelo de Aermecc.



Fig. 171. Características técnicas del convector AC del modelo de Aermecc.

Como se puede observar en la Tabla 30, el motor se puede utilizar en varias posiciones. Mediante un análisis previo se pudo determinar que la potencia total del ventilador es de entre 15W y 18W. Esto lo consigue, por un lado, variando la carga del motor, por otro lado, variando el factor de potencia, por lo que habrá que verificar que el inversor a implementar soporte este tipo de cargas a esta potencia.

Tabla 30. Cálculo de la potencia aparente del ventilador.

Alimentación a red del ventilador				
Selector	Velocidad (tacómetro)	Tension	Corriente	Potencia aparente (calc)
V1	635	223	0,082	18,286
V2	1700	223	0,079	17,617
V3	3500	223	0,077	17,171

Se alimenta el ventilador mediante un autotransformador. Se observan leves diferencias de consumo según la velocidad seleccionada ya que la tensión AC tiene una influencia en el consumo mucho más destacada que la velocidad de funcionamiento del ventilador.

4.2.1.7.- Ventilador DC.

El diagrama de conexionado eléctrico difiere ligeramente de lo explicado para el ventilador AC. Por un lado, el convertidor DC/AC ya no es necesario, y, por otro lado, aprovechando que el sistema consta de tres bloques con 24 módulos termoeléctricos cada uno, se conectan cada uno de estos directamente a un ventilador DC, haciendo igualmente innecesario el convertidor DC/DC. Esta configuración implica un ahorro directo con respecto a la configuración AC, por la eliminación de las ineficiencias de conversión de los convertidores.

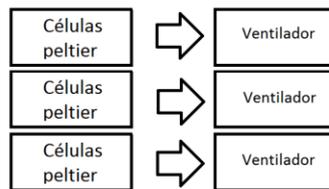


Fig. 172. Diagrama de conexión de los bloques termoeléctricos con los ventiladores DC.

En la Fig. 173 se muestra el Fan-Coil con los ventiladores axiales dispuestos en línea, así como la zona en la que se realizan las interconexiones eléctricas.

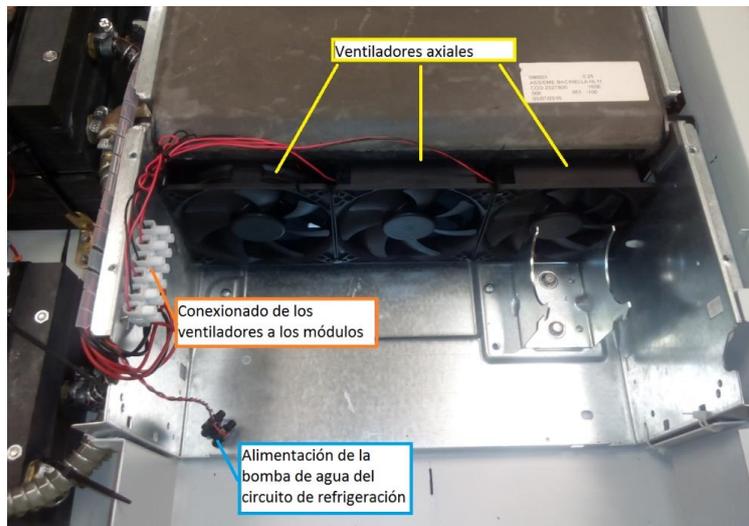


Fig. 173. Disposición de los ventiladores DC instalados en el Fan-Coil

Se ha utilizado el modelo de ventiladores MEC0251V1-000U-A99 de la marca SUNON, que se ajusta, con sus dimensiones de 120 x 120 x 25 mm, perfectamente a la cavidad disponible, además de que sus características eléctricas de funcionamiento nominal (12 V DC 5,4 W) coinciden también con la potencia generable desde cada bloque TE.

4.2.1.8.- Caracterización de la bomba de agua.

La bomba caracterizada tiene la referencia QR50 que se muestra en la Fig. 174. Se trata de una bomba con alimentación DC.

Se realiza una caracterización de la bomba en cuatro puntos de carga: sumergiendo la bomba en agua de forma que la diferencia entre la presión de entrada y de salida sea mínima (idealmente nula), con la salida cerrada (caudal cero) y acoplando sucesivamente dos tubos diferentes entre la entrada y la salida (sistema 1 y sistema 2), que producirán una pérdida de presión no cuantificada. Para cada uno de los cuatro puntos de caudal/presión se varía la alimentación de la bomba. Se comprueba igualmente que no haya diferencias de consumo trabajando en circuito cerrado o recirculando el agua en circuito abierto. Se adjuntan los resultados en la Tabla 31, donde el punto de funcionamiento nominal de la bomba queda marcado en amarillo.



Fig. 174. Bomba de agua del sistema de refrigeración líquida.

Tabla 31. Caracterización del consumo de la bomba de agua.

Bomba de agua					
Carga	Alimentación (V)	Escape libre		Circuito cerrado	
		Corriente	Potencia	Corriente	Potencia
Sistema 1	10	0,41	4,21	0,42	4,26
Sistema 1	12	0,48	5,9	0,48	5,9
Sistema 1	14	0,547	7,69	0,55	7,77
Sistema 2	10	0,42	4,32	0,43	4,35
Sistema 2	12	0,5	6	0,49	6
Sistema 2	14	0,56	7,92	5,6	7,93
Sin caudal (Q=0)	10	0,33	3,32	0,33	3,32
Sin caudal (Q=0)	12	0,37	4,5	0,37	4,5
Sin caudal (Q=0)	14	0,41	5,86	0,41	5,86
Cortocircuitada (Q=max)	10	0,46	4,5	N.A.	N.A.
Cortocircuitada (Q=max)	12	0,53	6,43	N.A.	N.A.
Cortocircuitada (Q=max)	14	0,6	8,5	N.A.	N.A.

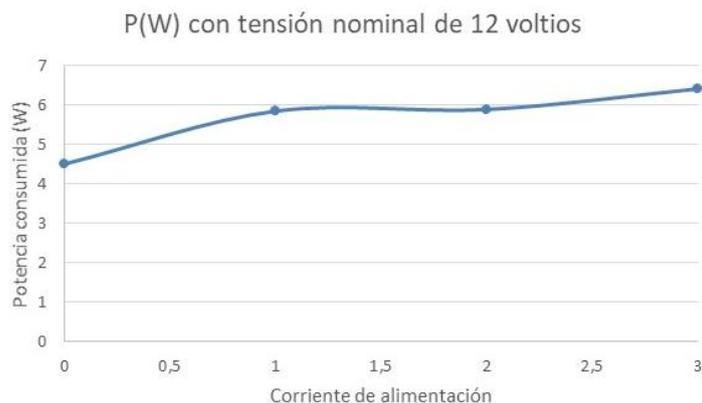


Fig. 175. Curva de potencia consumida por la bomba en función de la intensidad aplicada.

Se observa que el consumo de potencia es poco dependiente del punto de funcionamiento (Fig. 175), y más dependiente de la tensión de alimentación.

4.2.1.9.- Prototipo funcional del sistema eléctrico.

De acuerdo con las medidas realizadas, se verifica que el rango de variación del consumo de potencia del sistema eléctrico se sitúa entre los 44 y los 27 W.

Tabla 32. Consumos del sistema eléctrico

Consumos del sistema (W)	Máximo	Mínimo
El motor del ventilador alimentado con convertidor tiene un consumo de	26	17,5
La bomba de agua tiene un consumo de	8	4,5
El convertidor DC DC tiene unas pérdidas estimadas de	6	3
El convertidor DC AC tiene unas pérdidas estimadas de	4	2
Total consumos (W)	44	27

Los menores consumos se obtienen cuando la salida del convertidor DC/DC es de 10 voltios (el mínimo). Es reseñable el consumo del ventilador y la electrónica asociada (convertidor DC/AC). Reduciendo el consumo del ventilador, o incluso utilizando uno con alimentación DC, es como mejor se optimiza el empleo de módulos termoeléctricos.

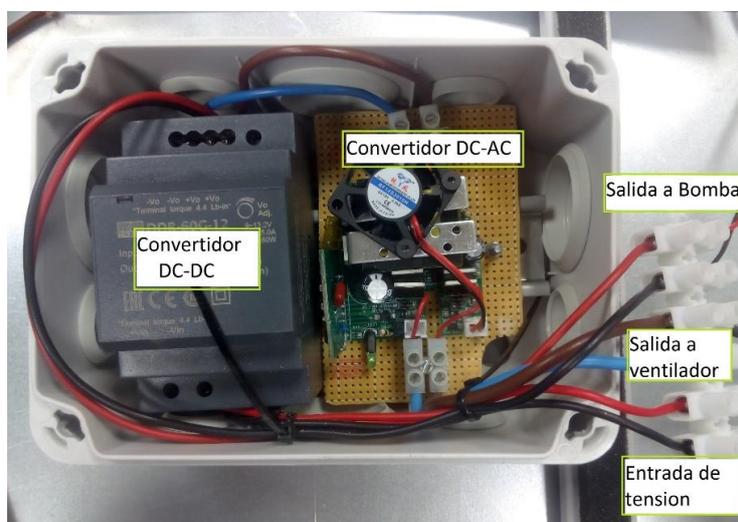


Fig. 176. Imagen del sistema electrónico de adaptación de la carga.

4.2.2.- Diseño y desarrollo del VC-TE

Con las restricciones de diseño y configuraciones a calcular, correctamente definidas, se han llevado a cabo los cálculos necesarios para estimar las dimensiones del sistema termoeléctrico y el número potencial de módulos necesarios, sirviendo el número de módulos necesarios para alcanzar el objetivo como criterio de selección.

Para estos cálculos preliminares que tratan de descartar las configuraciones menos viables, se utiliza el software comercial AZTEC perteneciente a la empresa MELCOR. Se trata de un software básico que permite obtener resultados rápidamente, que permite, entre otras cosas, la simulación termoeléctrica básica de modo conjunto de los módulos termoeléctricos de su marca integrados en elementos de disipación convencionales de aletas, pero con escaso control sobre las condiciones de contorno y las operaciones que se realizan.



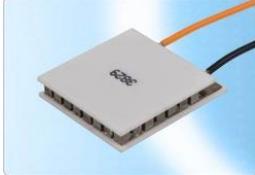
Fig. 177. Software comercial AZTEK de la empresa MELCOR.

4.2.2.1.- Consideraciones iniciales.

El objetivo que se persigue en este apartado es el de hallar la configuración óptima, considerando óptimo un diseño que sea eficaz, eficiente y económicamente factible. Al tratarse de un dimensionamiento analítico preliminar, no se trata de encontrar una solución de detalle, sino de efectuar una comparación válida de los conceptos presentados en la sección anterior.

Para la realización del análisis hay que tener en cuenta las consideraciones que se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Resumen de consideraciones para el análisis teórico de la configuración hidráulica.

<p>Restricciones geométricas:</p> <p>El volumen disponible para la colocación del sistema termoeléctrico es de 358 x 164 x 269 mm³.</p>	
<p>Carga eléctrica:</p> <p>La carga eléctrica que debe alimentar el sistema termoeléctrico es un motor de corriente continua. Para satisfacer las exigencias que cumplía el motor original, se elige un motor de Micro Motors S.R.L., con una velocidad nominal igual a la original, 830 rpm, que puede ser alimentado a 12 o 24 V DC, entregando una potencia de 5 W.</p>	
<p>Módulos termoeléctricos:</p> <p>Los módulos termoeléctricos se presentan en un amplio rango de tamaños y espesores, por lo que, para restringir el abanico, se tendrán en cuenta aquellos integrados en el software de Laird Technologies AZTEC.</p>	

<p>Condiciones iniciales:</p> <p>Los cálculos se realizarán en las siguientes condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none">- Temperatura del bloque de agua uniforme de 65 °C- Temperatura ambiente de 20 °C.- El ventilador se encuentra parado.- El bloque de agua se encuentra ya a la temperatura de trabajo.	
<p>Carga térmica:</p> <p>La potencia térmica que ha de ser capaz de suministrar el ventiloconvector al ambiente es de 2.01 kW para la mayor velocidad de giro del ventilador, 1.46 kW para la velocidad intermedia y 1.06 kW para la baja.</p>	

4.2.2.1.1.- Restricciones geométricas.

Como ya se ha mencionado, una de las restricciones para acotar las configuraciones disponibles es la delimitación de un volumen donde han de encontrarse todos los componentes. Según los planos y medidas tomadas directamente sobre un ventiloconvector (ver Fig. 178), se ha determinado que el volumen disponible es de 358 x 164 x 269 mm³.



Fig. 178. En rojo, volumen disponible para la instalación del sistema TE.

4.2.2.1.2.- Carga eléctrica.

La carga eléctrica del sistema es el motor eléctrico que hace girar el ventilador radial que impulsa el aire hacia la batería de intercambio. En el sistema original, este motor eléctrico es un motor de corriente alterna alimentado a 220 V que gira en vacío a una velocidad de 830 rpm. Debido a que la corriente generada en los módulos termoeléctricos es continua, se propone el uso de un motor también de corriente continua con el fin de reducir las ineficiencias derivadas de la transformación a alterna mediante un inversor, que a estos niveles de potencia supondría una pérdida del 30 % de la energía generada.



Fig. 179. Motor eléctrico original y sus características.



Realizada una búsqueda en catálogos de fabricantes de motores de corriente continua, se decide tomar como referencia para los cálculos el motor de la Fig. 179 cuyas características se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34 Características técnicas del motor de referencia

Fabricante	Micro Motors S.R.L.
Modelo	E192 12/24 – 5
Tensión nominal	12 o 24 V
Longitud	86 mm
Par nominal	20 N·cm
Velocidad sin carga / en par nominal	800/510 o 830/575 rpm
Corriente sin carga / en par nominal	<0.4/1.75 o <0.2/0.95 A
Potencia absorbida en par nominal	21 o 22.8 W

4.2.2.1.3.- Módulos termoeléctricos.

El tamaño en el que se suministran los módulos termoeléctricos es muy variado. Hay fabricantes con una gama muy amplia, con tamaños que van desde pocos milímetros hasta varias decenas. Para hacer una evaluación rápida del número necesario para cada situación, teniendo en cuenta la carga (motor eléctrico), se empleará el software de cálculo de AZTEC. Este programa contiene muchos de los módulos disponibles comercialmente de su catálogo.

4.2.2.1.4.- Condiciones iniciales.

Con el fin de hacer lo menos perceptibles posibles las diferencias entre un ventilador convencional y el ventilador termoeléctrico, los cálculos se realizan en las siguientes condiciones iniciales:

- Temperatura del bloque de agua uniforme de 65 °C.
- Temperatura ambiente de 20 °C.
- El ventilador se encuentra parado.
- El bloque de agua se encuentra ya a la temperatura de trabajo.

Aunque la temperatura de agua de entrada es de 70 °C, se considera que la temperatura del bloque de agua será de 65 °C aplicando un criterio conservador, considerando que el ventilador convencional tiene un salto térmico de 10 °C cediendo al ambiente 2.01 kW.

4.2.2.1.5.- Carga térmica

La potencia térmica que ha de ser capaz de suministrar el ventilador al ambiente es de 2.01 kW para la mayor velocidad de giro del ventilador, 1.46 kW para la velocidad intermedia y 1.06 kW para la baja.

Esta potencia térmica puede ser suministrada por la batería de intercambio principal y/o por el resto de los componentes de disipación existentes en el circuito, como disipadores de aletas o intercambiadores de tubos y aletas secundarias.

4.2.2.2.- Análisis de configuraciones básicas

El sistema hidráulico, encargado de transportar el calor al sistema TEG y de propiciar su refrigeración, ofrece varias posibilidades en cuanto a configuración se refiere, cuyo análisis se realizó en un ejercicio previo a los desarrollos eléctricos y el dimensionado del sistema termoeléctrico mostrado en el Capítulo 3.

Tal como muestra la Fig. 180, se han planteado las siguientes configuraciones alternativas:

- Bloque de agua – TEG – Disipador de aletas. (a)
- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua. (b)
- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua con un segundo circuito y dos baterías. (c)
- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua con un segundo circuito y una única batería. (d)

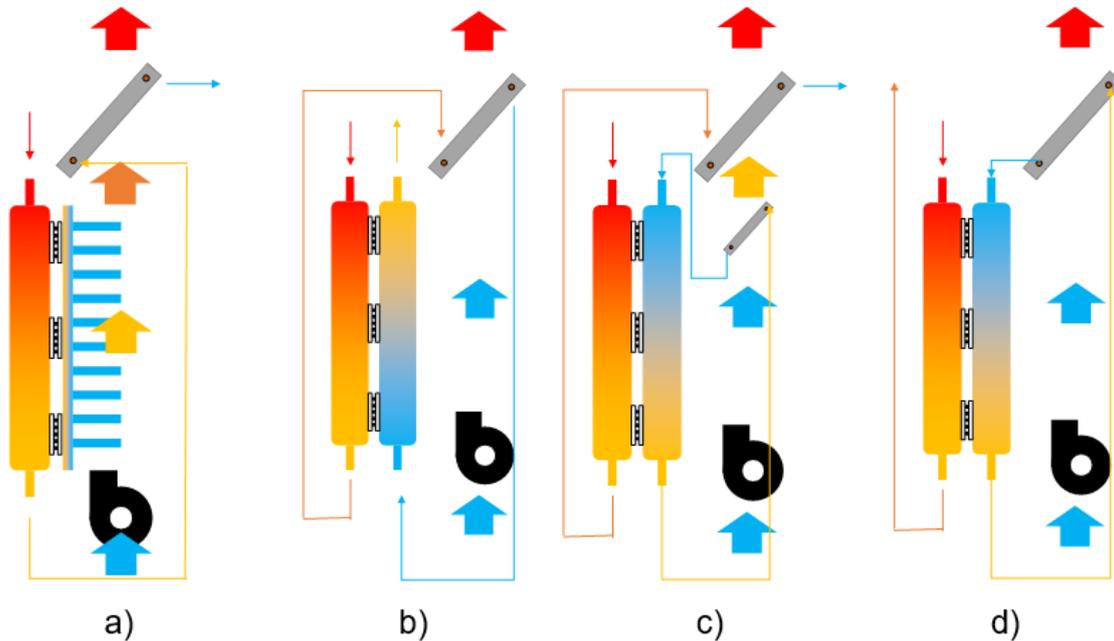


Fig. 180. Esquema conceptual de las diferentes configuraciones hidráulicas propuestas con los elementos que las conforman.

Con el fin de restringir geoméricamente el abanico de tamaños del sistema y facilitar la industrialización de este nuevo dispositivo, se ha considerado que todos los componentes han de estar integrados dentro del ventiloconvector de instalación colgante para uso residencial, Omnia UL 11P sin mueble.



Fig. 181. Ventiloconvector Omnia UL 11P parcialmente desmontado, siendo visible el ventilador y su motor eléctrico.

Todas estas configuraciones están compuestas por los siguientes elementos básicos:

- a) **Bloques de agua:** a través de ellos circula el agua. Son intercambiadores de calor de muy baja resistencia térmica y sobre ellos se colocarán en todos los casos los módulos. Ejercen siempre de foco caliente y, en las configuraciones b, c, y d, de foco frío.
- b) **Módulos termoeléctricos:** de planta cuadrada o rectangular y un cierto espesor.
- c) **Disipadores de aletas:** empleados como foco frío en la configuración a). Estos dispositivos se encuentran englobados dentro de los *heat sink*, sumideros de calor, ya que son empleados para evacuar el calor de distintas fuentes térmicas. Se propone el uso de un disipador de aletas ya que son elementos económicos y una tecnología madura y con una gran flexibilidad en cuanto a tamaños, diseños y resistencias térmicas.
- d) **Batería de tubos y aletas:** estos intercambiadores se caracterizan por estar compuestos por aletas que incrementan la superficie de intercambio térmico con la corriente de aire que los atraviesa. Estos elementos se encargan de ceder la energía del agua al aire para ser empleado en el calentamiento de la estancia.

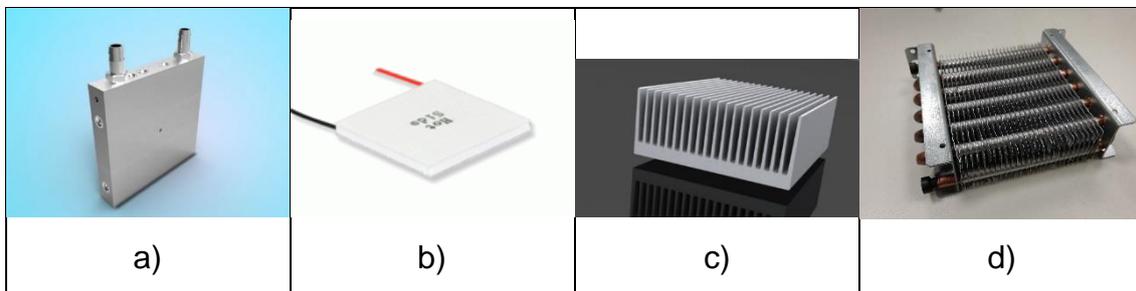


Fig. 182. Elementos empleados para la construcción de los circuitos hidráulicos de los VC-TE

4.2.2.2.1.- Bloque de agua – TEG – Disipador de aletas.

En este concepto, el agua proveniente de la caldera pasa en primer lugar por un bloque de agua. El bloque de agua es un bloque de aluminio, cobre u otro material de alta conductividad térmica al cual se le han practicado una serie de orificios, ya sea por taladrado o fresado. A través de los conductos resultantes de las operaciones anteriores discurre el fluido que intercambia calor, cediendo o absorbiendo. En este caso, como ya se ha mencionado, el fluido es agua y cede calor a los módulos termoeléctricos (TEG). Los bloques de agua son dispositivos que se caracterizan por tener una resistencia térmica muy baja en comparación con otras fuentes o sumideros de calor, como pueden ser los disipadores de aletas. Esto se debe en parte a que, en su interior, la convección entre el fluido y el sólido se realiza de forma forzada. A cambio, producen una importante pérdida de carga en el circuito de agua.



Fig. 183. Bloque de agua en su configuración típica para refrigeración de electrónica

El segundo componente o grupo de componentes de este montaje son los módulos termoeléctricos. De planta cuadrada o rectangular y un cierto espesor, estos dispositivos contienen en su interior una serie de semiconductores en forma de dados que, en presencia de un diferencial de temperatura generan una diferencia de potencial. Su efecto es reversible y aplicada una tensión e intensidad en ellos, se comportan como una bomba de calor.

El último elemento de este montaje es el disipador de aletas. Estos dispositivos se encuentran englobados dentro de los *heat sink*, sumideros de calor, ya que son empleados para evacuar el calor de distintas fuentes térmicas. Se propone el uso de un disipador de aletas ya que es una tecnología plenamente desarrollada y con una gran flexibilidad en cuanto a tamaños, diseños y resistencias térmicas. Esta última característica varía fuertemente si el intercambio de calor con el aire exterior es forzado. Al tratar de colocar el conjunto del generador termoeléctrico en el interior del módulo del ventilador, se espera que la propia corriente del ventilador fuerce la convección sobre las aletas, favoreciendo el intercambio de calor.

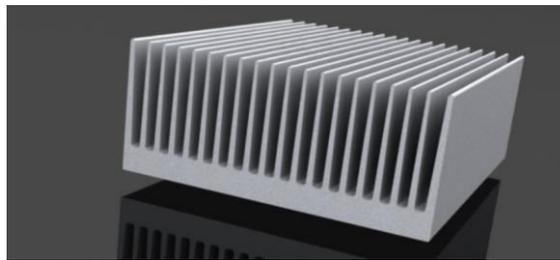


Fig. 184. Ejemplo de disipador extruido de aletas

Presentados los elementos que componen el sistema, se muestra a continuación la interacción entre los mismos mediante el diagrama (a) de la Fig. 180. En este diagrama se aprecia como el agua entra a un bloque de agua a alta temperatura y va cediendo su energía conforme lo atraviesa. Esta energía en forma de calor pasa a través de los módulos termoeléctricos, que se encuentran ubicados en uno de los laterales y es donde se realiza la conversión de energía térmica en energía eléctrica. Al otro lado del módulo se encuentra un disipador de aletas, donde se disipa calor al ambiente y que puede ser empleado directamente para calentar la estancia. La energía generada en los módulos termoeléctricos debido al salto térmico se emplea en el movimiento del ventilador, fuerza el paso de aire fresco a través de la carcasa del ventilador. Este aire ayuda a mantener a baja temperatura la cara fría de los módulos e incrementa la cantidad de calor que los atraviesa, así como la energía convertida en ellos. Finalmente, esta corriente de aire precalentado atraviesa la batería del ventilador, donde absorbe calor del circuito de agua, el cual viene desde la salida del bloque de agua. De ahí sale al exterior con el fin de cumplir el propósito de calefactar la estancia. La salida de agua de la batería retorna por las tuberías de la instalación doméstica a la caldera o al colector.

4.2.2.2.- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua.

Esta configuración tiene los mismos componentes que los presentados en la sección anterior, a excepción del disipador de aletas, elemento del cual se prescindiría y se sustituye por otro bloque de agua.

A continuación, se presenta la interacción de los distintos componentes mediante el diagrama (b) de la Fig. 180. En el diagrama se aprecia como el agua a alta temperatura que proviene de la caldera entra al bloque de agua y cede su energía conforme lo atraviesa. Esta energía, al igual que en la primera configuración atraviesa los módulos termoeléctricos y es convertida parcialmente en energía eléctrica. A la salida de este primer bloque de agua, se redirige el caudal hacia la batería del intercambiador agua-aire, donde la corriente de aire impulsada por el



ventilador extrae el calor empleado en incrementar la temperatura de la estancia. El caudal de agua continúa su camino dentro del sistema hacia el segundo bloque de agua, donde, debido a su menor temperatura, ejercerá como foco frío y se calentará absorbiendo el calor que ha pasado a través de los módulos.

4.2.2.2.3.- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua con un segundo circuito y dos baterías.

Esta configuración cambia notablemente su topología con respecto a las desarrolladas en los apartados anteriores. Mientras que anteriormente se ha considerado que existía un único circuito de agua, aunque con variación en los elementos que recorre, en esta configuración existen dos circuitos de agua, uno de ellos incluido en el circuito de calefacción de la vivienda o local y el otro interno en el ventiloconvector.

Este segundo circuito está compuesto por el bloque de agua que actúa en el foco frío, similar en función al del apartado anterior, y por un intercambiador agua-aire, similar al empleado en la batería del ventiloconvector. Un ejemplo de este dispositivo se puede ver en la Fig. 185.



Fig. 185. Intercambiador agua-aire de tubos y aletas

Estos intercambiadores se caracterizan por estar compuestos por aletas que incrementan la superficie de intercambio térmico con la corriente de aire que los atraviesa.

En el diagrama (c) de la Fig. 180 se muestra la interacción entre los distintos componentes de esta configuración. El agua caliente, como en los anteriores casos, viene de la caldera y entra por uno de los *cold plates*, el del lado caliente de los módulos termoelectricos, cediéndoles calor. Una vez ha recorrido todo el bloque de agua, se dirige a la batería principal del ventiloconvector, donde cederá la energía restante a la corriente de aire que la atraviesa. Finalmente, esta corriente retorna a la caldera. El otro circuito absorbe en el bloque de agua que hace de foco frío el calor que atraviesa los módulos termoelectricos. Sin embargo, en ausencia de una refrigeración, el sistema tendería a un equilibrio termodinámico que haría que la tensión generada en el termoelemento fuese cero. Por esta razón, el circuito secundario lo completa el intercambiador de tubos y aletas. Aprovechando la corriente de aire generada por el ventilador del ventiloconvector, se refrigera el foco frío. Además, de este modo se calienta el aire en dos etapas. La circulación de este circuito se puede realizar de dos modos. La primera de ellas, más conveniente a nivel energético, es debida al efecto termosifón. La diferencia de densidades ocasionada por la variación térmica dentro del circuito hace que se haga efectivo un caudal sin aporte energético exterior. El inconveniente de este planteamiento es que el caudal sea tan pequeño que la temperatura del foco frío se eleve excesivamente y la energía generada por los módulos termoelectricos no sea suficiente para accionar el motor del ventilador. En ese caso, sería necesario emplear una bomba de circulación, que a su vez debería ser alimentada por los módulos termoelectricos.

4.2.2.2.4.- Bloque de agua – TEG – Bloque de agua con un segundo circuito y una única batería.

Esta configuración es una variación de la configuración mostrada en la sección anterior, con la diferencia de que, en este caso, el circuito secundario es también el encargado de proporcionar todo el calor necesario a la habitación o estancia donde esté colocado el ventilador.

En el diagrama (c) de la Fig. 180 se muestra la interacción de los distintos componentes de esta configuración. El agua caliente viene de la caldera y entra por uno de los *cold plates*, el del lado caliente de los módulos termoeléctricos, cediéndoles calor. Una vez ha recorrido todo el bloque de agua y cedido calor a los módulos, emprende su retorno hacia la caldera para volver a ser calentada. Al otro lado de los módulos se encuentra el bloque de agua que actúa como foco frío. Este es parte del circuito secundario de agua que circula por la batería intercambiadora de calor y cede energía al ambiente. La circulación en este circuito se puede realizar de dos modos. El primero de ellos es por termosifón, un efecto conocido por inducirse movimientos en una masa de agua debido a cambios de densidad, originados en este caso por variaciones térmicas. La otra posibilidad pasaría por incluir una bomba que hiciese circular el agua. Esta opción mejoraría el funcionamiento tanto de los módulos como del intercambiador, pero como contrapartida, requeriría una alimentación que también debería obtenerse a partir de los módulos termoeléctricos.

4.2.2.3.- Cálculos preliminares y dimensionamiento.

Los dimensionamientos que aparecen a continuación para determinar la adecuación de las diferentes configuraciones se basan en restricciones establecidas en el apartado siguiente, fruto de la evaluación inicial de la influencia del circuito de refrigeración en un dispositivo TEG.

Para evaluar la influencia del circuito de refrigeración en la generación de un TEG se ha utilizado el TEG de Thermonamic descrito en el apartado anterior y conectado tal como recoge la Fig. 232. Este ensayo permite conocer la diferencia de temperatura factible con el Fan-Coil de Aermec, definido en las especificaciones técnicas del capítulo 3. Permite, igualmente, conocer el grado de dependencia de la generación eléctrica con factores propios del Fan-Coil como son el flujo de agua impulsado por la bomba y el flujo de aire impulsado por el ventilador.

4.2.2.3.1.- Influencia del circuito de refrigeración en un dispositivo TEG.

En el esquema de la Fig. 186 se pueden apreciar los dos circuitos cerrados de la bancada de ensayos. Utilizando el TEG descrito, el circuito de refrigeración dispone de una bomba de líquido y de un intercambiador agua-aire con un ventilador para intercambiar con el ambiente, tal como se muestra en la Fig. 232.

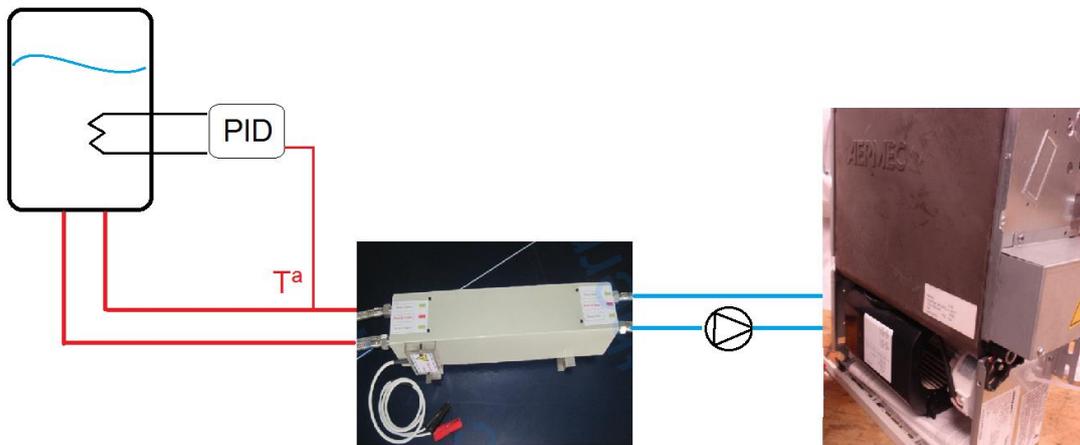


Fig. 186. Esquema de montaje del ventilador con TEG para el desarrollo del primer ensayo.

4.2.2.3.2.- Dependencia de la potencia eléctrica generada con el flujo de líquido de refrigeración.

El caudal de agua caliente procedente de la instalación de calefacción doméstica es una variable independiente que no puede ser controlada por el dispositivo de calefacción termoeléctrico. Sin embargo, el caudal del sistema de refrigeración depende directamente de la bomba seleccionada y de la caída de presión a lo largo del circuito de refrigeración. Por esta razón, en primer lugar, se ha analizado la influencia del caudal de agua de refrigeración y de la temperatura del lado caliente sobre la potencia de salida.

El caudal de agua caliente es de 4,5 l/min para cada prueba, y la temperatura del agua de refrigeración es el resultado del equilibrio térmico. Se ha medido la tensión de salida para cargas eléctricas y de circuito abierto de 10, 22, 50 y 100 Ω . Los resultados [131] se muestran a continuación:

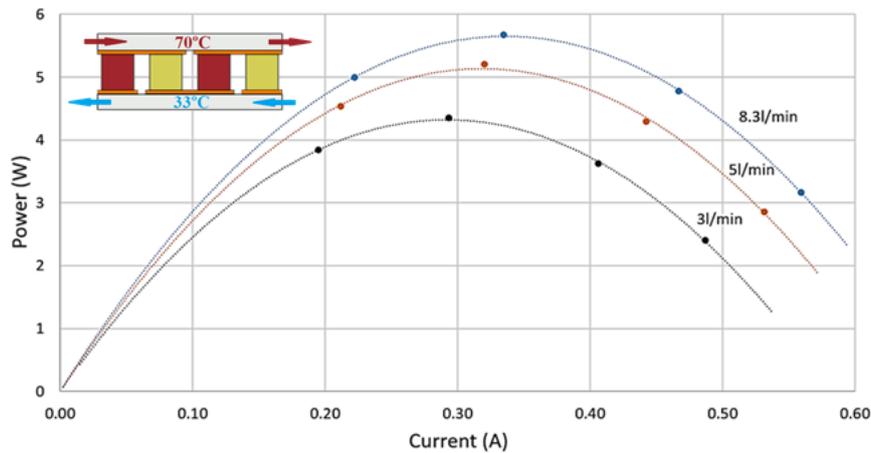


Fig. 187. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 70 °C.

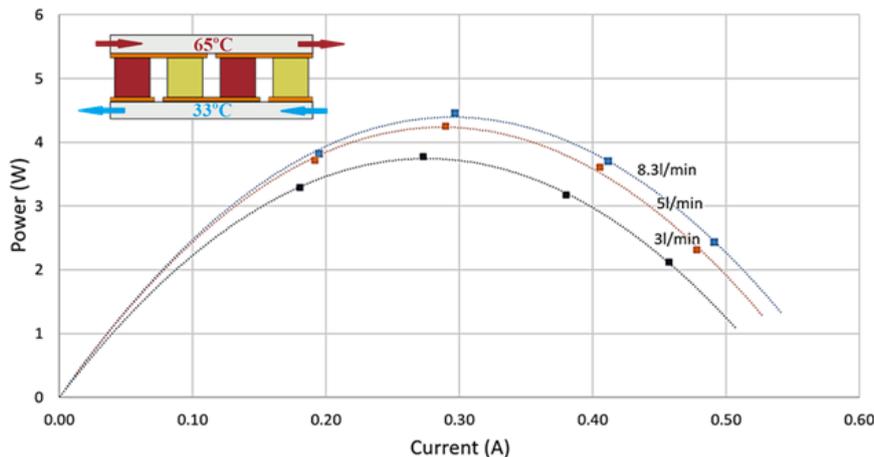


Fig. 188. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 65 °C.

La Fig. 187, Fig. 188, Fig. 189 y Fig. 190, muestran los diagramas de corriente-potencia obtenidos para diferentes pruebas. Tanto la potencia de salida como la corriente se obtienen analíticamente mediante la ley de Ohm considerando el valor medido de la tensión de salida y el valor de la carga eléctrica, que es conocido. Estos resultados confirman que la potencia de salida aumenta con la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente de los módulos termoeléctricos. También se ha demostrado que el caudal de agua de refrigeración tiene una

influencia importante en la potencia de salida. Sin embargo, parece que cuanto menor sea el caudal de agua de refrigeración, menor será la influencia.

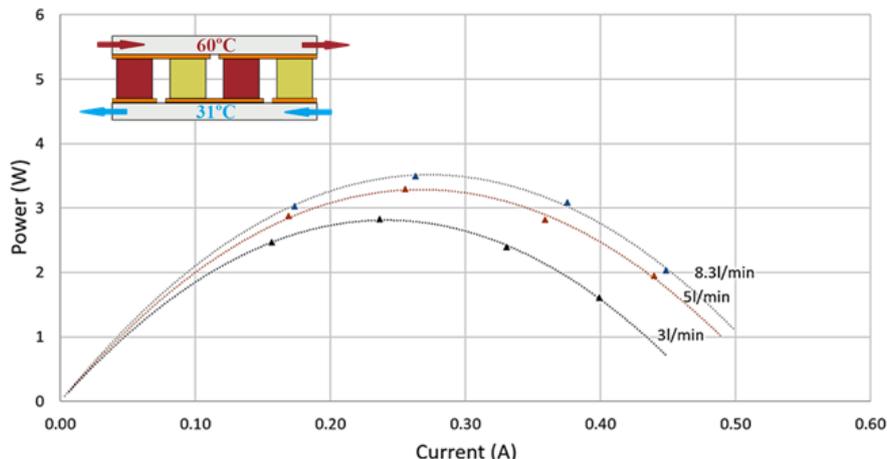


Fig. 189. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 60 °C.

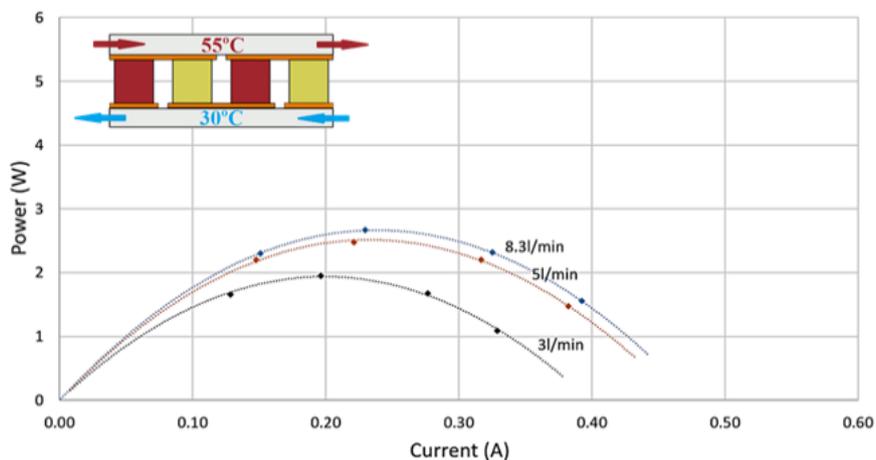


Fig. 190. Análisis de la influencia del caudal en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 55 °C.

Considerando las condiciones de trabajo más realistas para una instalación de calefacción doméstica (temperatura del agua caliente entre 60-80 °C), es posible concluir que la potencia máxima de salida podría oscilar entre 3 W y más de 5 W dependiendo del caudal de agua de refrigeración.

4.2.2.3.3.- Dependencia de la potencia eléctrica generada con el flujo de aire.

La definición del ventilador y sus condiciones de funcionamiento están directamente condicionadas por el tiempo necesario para homogeneizar la temperatura ambiente y el nivel de confort térmico requerido, que depende, entre otras cosas, del caudal del aire y de su temperatura. Por ello, se analiza la influencia de la velocidad del ventilador y, por tanto, la influencia del flujo de aire a través del intercambiador de calor del Fan-Coil en la potencia de salida.

4.2.2.3.3.1 Resultados con ventilador de AC.

El ventilador de AC incluido en el Fan-Coil comercial puede funcionar a tres niveles de velocidad diferentes (I, II y III) impulsando 80, 120 y 180 m³/h de aire respectivamente, y la potencia máxima de entrada es de 18 W. Con el propósito de conocer la influencia que tendría sobre el sistema

termoeléctrico y su carga, el sistema termoeléctrico no alimenta directamente al ventilador de CA en ninguno de los regímenes estudiados en estos ensayos. Se ha alimentado con una fuente de alimentación externa, con el único propósito de caracterizar el sistema termoeléctrico. Se ha medido la potencia de salida de estos tres niveles de velocidad manteniendo el caudal de agua de refrigeración constante en 3 l/min en cada prueba.

Los resultados obtenidos (Fig. 191 y Fig. 192) muestran que la potencia de salida es similar para los tres niveles de velocidad. Sin embargo, si el ventilador está apagado, se reduce drásticamente. Esto ocurre porque el calor transferido a la habitación se interrumpe, con el consiguiente aumento de la temperatura del agua de refrigeración y, por lo tanto, la disminución de la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente de los módulos termoeléctricos.

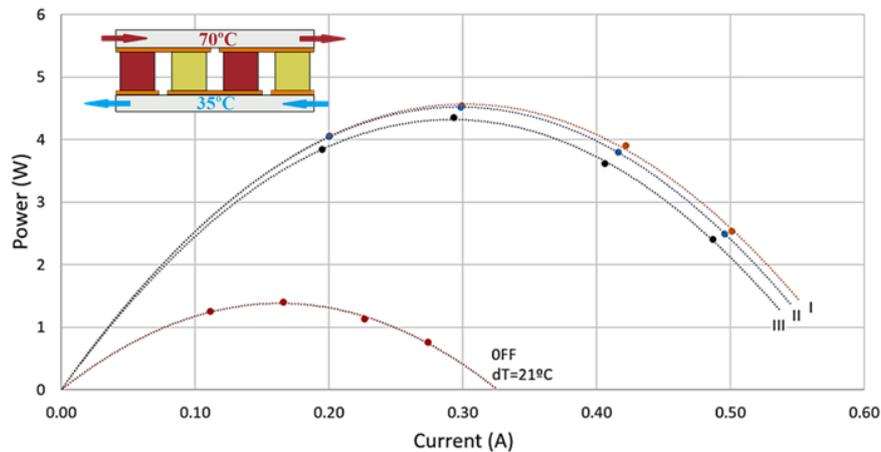


Fig. 191. Análisis de la influencia de la velocidad del ventilador en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 70 °C.

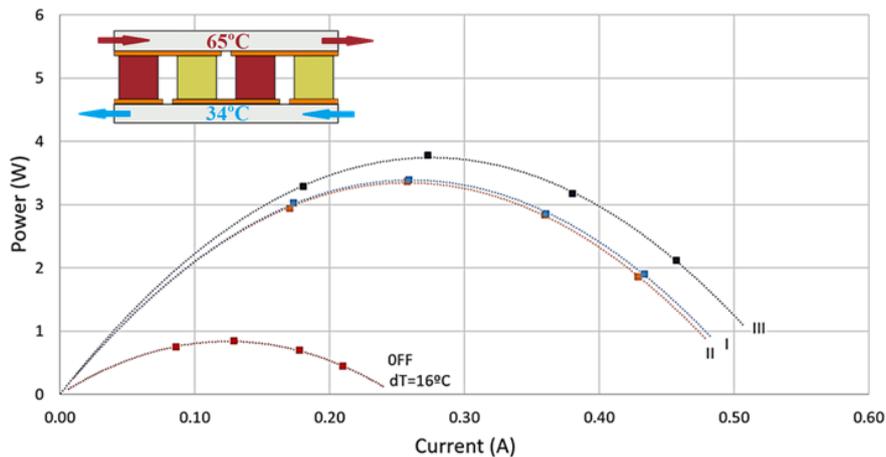


Fig. 192. Análisis de la influencia de la velocidad del ventilador en la generación de energía para una temperatura media del lado caliente de 65 °C.

4.2.2.3.3.2 Resultados con ventilador de DC.

Los resultados de la caracterización muestran que el sistema termoeléctrico no es capaz de alimentar el ventilador de CA de la unidad de Fan-Coil en ninguno de los regímenes estudiados. Por esta razón, en esta etapa se ha seleccionado e integrado en el sistema un nuevo ventilador de corriente continua. De este modo, se evita la necesidad de un convertidor DC-AC que haría que el sistema fuera más caro y menos competitivo en el mercado (tal y como se ha comentado en apartados anteriores).

En primer lugar, el ventilador de CC ha sido alimentado por una fuente de alimentación externa de CC para comparar los diagramas de potencia-corriente con los obtenidos con el ventilador de CA. El ventilador seleccionado es un ventilador axial de 12 V_{DC} con un consumo máximo de potencia de 5,4 W, 3100 rpm y un caudal máximo de 184 m³/h.

Se han realizado pruebas de 70 °C y 65 °C para la temperatura media del agua caliente y de 3 l/min para el caudal de agua de refrigeración, y se han trazado junto con los resultados anteriores para su comparación.

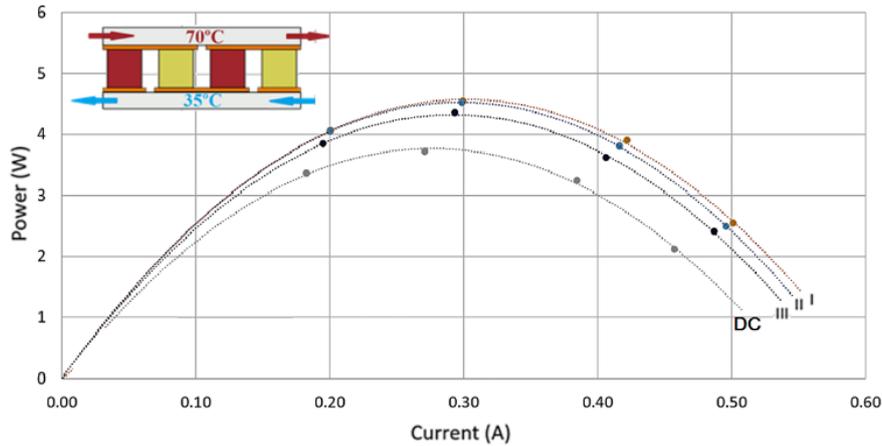


Fig. 193. Comparación de los diagramas de potencia-corriente para los niveles de velocidad I, II, III del ventilador de CA y del ventilador de CC con una temperatura media del lado caliente de 70 °C.

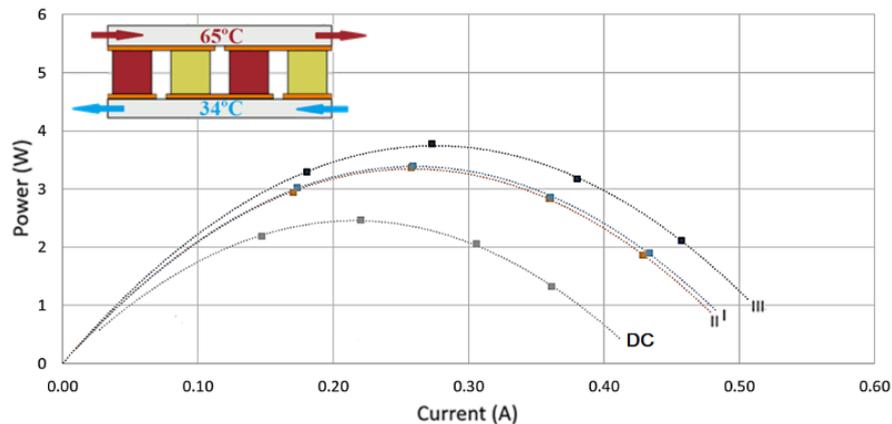


Fig. 194. Comparación de los diagramas potencia-corriente para los niveles de velocidad I, II, III del ventilador de CA y del ventilador de CC con una temperatura media del lado caliente de 65 °C.

Debido al menor caudal impulsado por el ventilador de CC, por la escasa adaptación del ventilador a la batería del Fancoil, el equilibrio térmico, entre la temperatura del foco caliente y frío (relacionados entre sí, y con el flujo que aporta el ventilador) se consigue para temperaturas medias del agua del lado frío más altas: 37°C en lugar de 35°C para los resultados mostrados en la Fig. 193 y 39°C en lugar de 34°C para los resultados mostrados en la Fig. 194. Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente de los módulos termoeléctricos es menor con un ventilador de CC que con un ventilador de AC, lo que justifica la menor potencia generada. También se muestra que la potencia máxima de salida del TEG disminuye en torno al 15% para el ensayo a 70 °C y al 28% para el ensayo a 65°C, pero el consumo máximo de potencia del ventilador se reduce a más de la tercera parte, de 18 W a 5,4 W (reducción del 70 %).

Podría decirse que el ventilador AC es más eficiente desde el punto de vista térmico, al estar mejor adaptado, pero menos eficiente desde el punto de vista eléctrico, y viceversa, respecto al ventilador DC.

4.2.2.3.4.- Comportamiento del sistema en conjunto.

Después de esta comparación, el ventilador de CC ha sido alimentado directamente a través del generador termoeléctrico y se han llevado a cabo varias pruebas de calentamiento-enfriamiento con el fin de analizar el comportamiento del sistema en su conjunto. El ensayo consistió en un proceso de calentamiento de hasta 70 °C de temperatura media del lado caliente, un período de estado estacionario y un proceso de enfriamiento hasta detectar que la potencia generada no es suficiente para mover el ventilador.

Durante las pruebas, se ha medido la temperatura ambiente, las temperaturas de entrada y salida de los lados caliente y frío, y el voltaje y la corriente suministrados al ventilador. Los resultados se muestran a continuación:

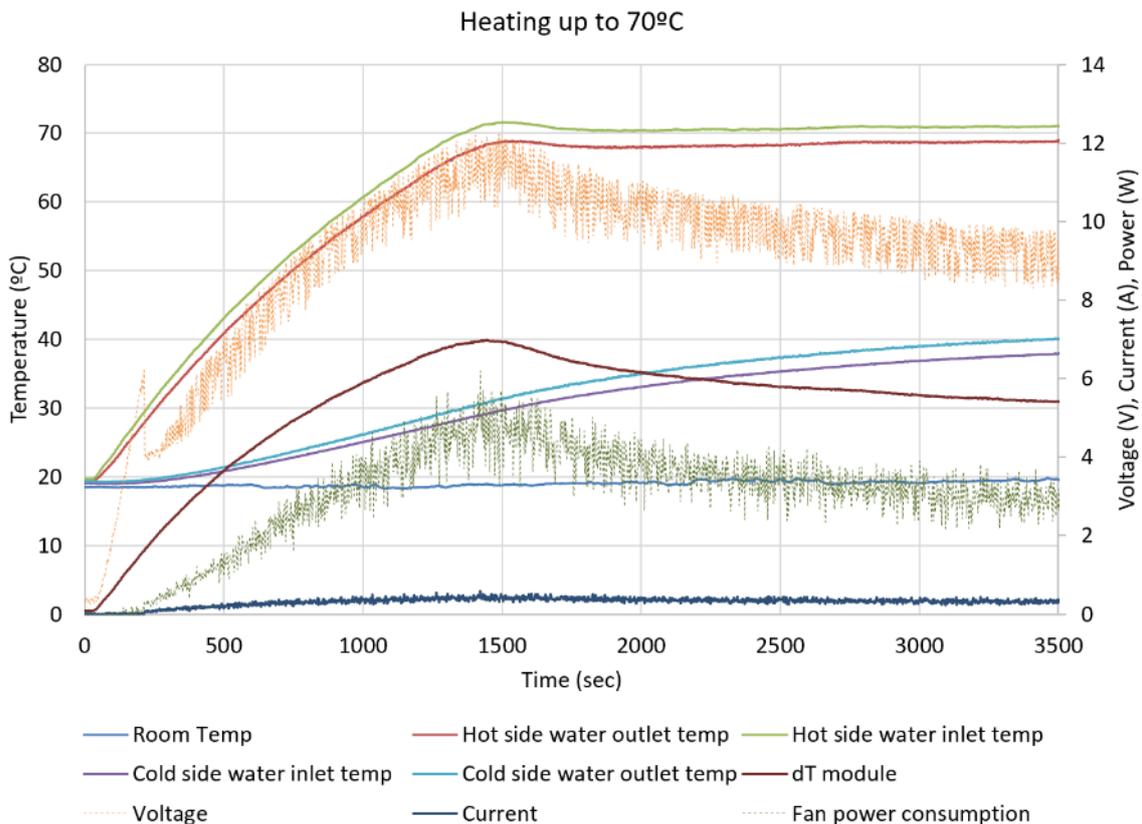


Fig. 195. Proceso de calentamiento hasta una temperatura media del lado caliente de 70 °C.

La Fig. 195 muestra que la tensión suministrada al ventilador aumenta rápidamente durante los primeros segundos de la prueba. Esto se debe a que la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente de los módulos TE también aumenta rápidamente durante este período. Cuando la tensión de salida alcanza el valor de 6 V, el ventilador comienza a moverse. Entonces el voltaje baja a alrededor de 4 V debido a la impedancia del ventilador. Después de 25 minutos, se alcanza el voltaje máximo de salida y la potencia máxima, y tiende a estabilizarse a 8.8 V y 2.7 W respectivamente desde allí, como se muestra en la Fig. 196.

Se puede apreciar que la señal de voltaje tiene un ruido importante mientras el ventilador está funcionando. Se debe al ruido electromagnético introducido por las bobinas del motor del ventilador.

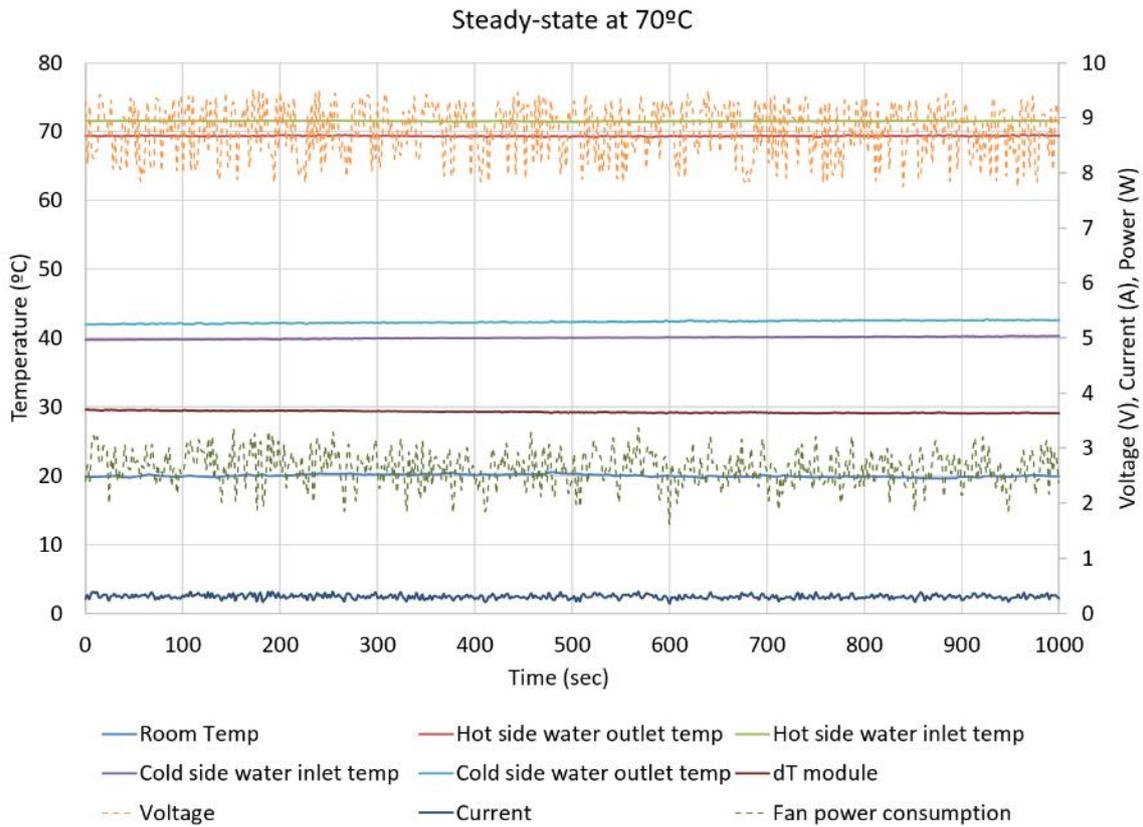


Fig. 196. Estado estacionario a una temperatura media del lado caliente de 70 °C.

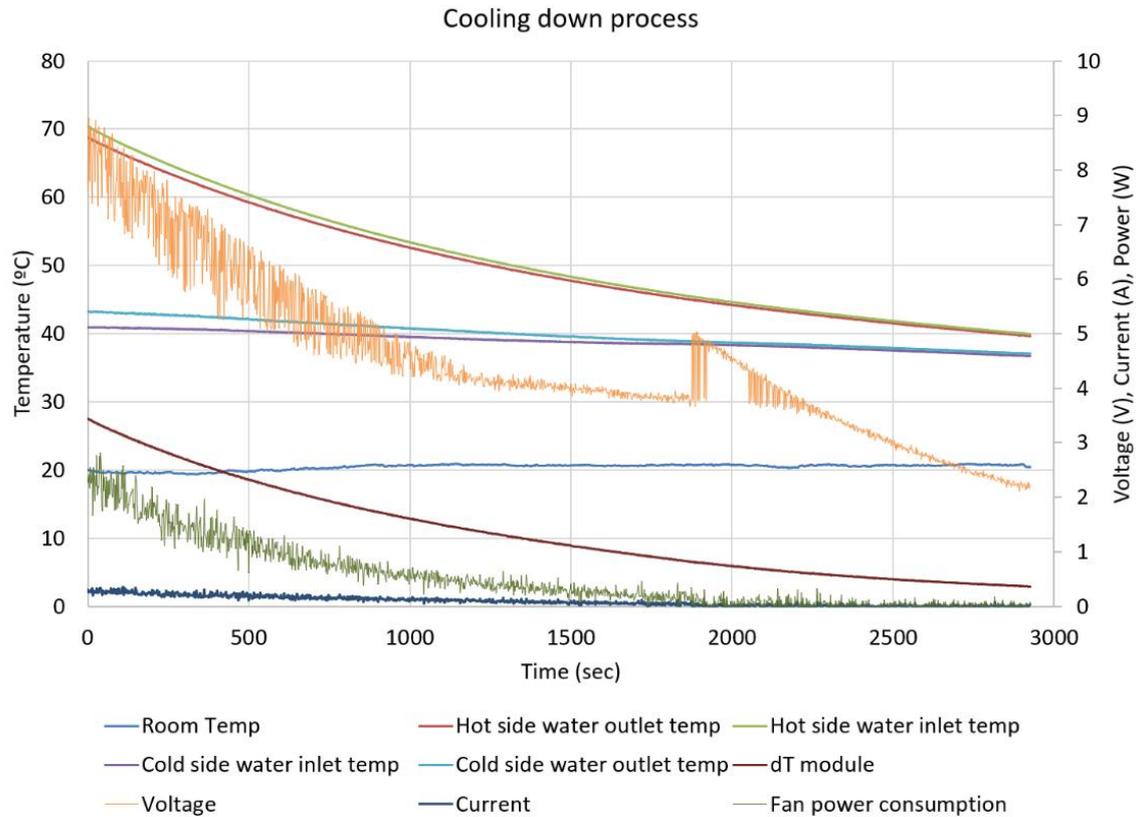


Fig. 197. Proceso de enfriamiento desde una temperatura media del lado caliente de 70 °C.



Como se muestra en la Fig. 196, la temperatura media del agua del lado frío del generador termoeléctrico es de alrededor de 40 °C durante el periodo estacionario. Esta agua es la que pasa a través del intercambiador de calor del Fan-Coil y la que transporta el calor que será transferido finalmente a la habitación. La temperatura del aire impulsado dependerá de la temperatura del agua y del caudal de aire, entre otros, y al mismo tiempo, todas estas condiciones de funcionamiento darán como resultado un determinado nivel de confort para el usuario. Este nivel de confort es el factor clave que hará que el sistema sea adecuado o no para aplicaciones domésticas. Si bien este punto será analizado en futuros trabajos.

La Fig. 197 muestra que el voltaje suministrado al ventilador comienza a disminuir a medida que la diferencia de temperatura entre el lado frío y el lado caliente de los módulos TE disminuye. Cuando la tensión suministrada al ventilador cae por debajo de 4 V, el ventilador se detiene e inmediatamente la tensión disponible vuelve a aumentar a 5 V.

4.2.2.3.5.- Dimensionamiento configuración (a).

En esta configuración, conformada por bloque de agua, módulo termoeléctrico y disipador de pines o aletas, se emplean tantos disipadores como módulos termoeléctricos sean posicionados. Los disipadores de gran tamaño (tamaño similar a la cavidad) están diseñados para propósitos de refrigeración de componentes electrónicos de alta potencia, por lo que pueden tener resistencias térmicas relativamente elevadas. Los disipadores de pequeño tamaño, con una elevada cantidad de aletas, pines u otros componentes de disipación, tienen resistencias térmicas bajas incluso para condiciones de convección natural.

Como referencia de disipador, se considera el modelo ICK S 40x40x20 de Fischer Elektronik. Uno de los motivos que justifican su elección es que bajo él se pueden colocar todos los módulos termoeléctricos evaluables en el software AZTEC y además, es lo suficientemente pequeño para no incurrir en grandes resistencias de dispersión térmica o *spreading* en caso de emplearse módulos de pequeño tamaño. La resistencia térmica de este disipador en condiciones de convección natural es de 3.5 K/W.

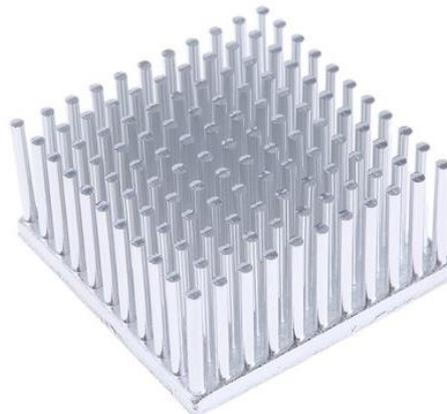


Fig. 198. Disipador ICK S 40x40x20 de Fischer Elektronik

Las entradas al programa de cálculo se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Entradas del programa de cálculo

T^a del lado caliente	65 °C	
T^a ambiental	20 °C	
Resistencia térmica del lado frío para cada módulo TE	3.5 K/W	
Tensión requerida	12	24
Intensidad requerida	0.4	0.2

TEG Module Part Number	Voc (V)	Vml (V)	Iml (mA)	Pml (mW)	Eff (%)	Heat (W)	Tc (°C)	Rint (Ω)	# Series	# Parallel	Total TEGs
HT4,6,F2,2143	.75	.38	200	75	1.7%	4.5	35.5	1.9	32	2	64
HT4,7,F2,3030	.81	.41	191	78	1.6%	4.9	36.7	2.1	23	3	69
HT2,12,F2,3030	1.41	.71	112	79	1.6%	5.1	37.6	6.3	16	4	64
HT9,3,F2,2525	.34	.17	471	80	1.5%	5.2	38.0	0.4	62	1	62
HT3,12,F2,3030	1.29	.65	127	82	1.4%	5.8	39.9	5.1	16	4	64
HT6,7,F2,3030	.67	.33	247	82	1.3%	6.3	41.8	1.3	31	2	62
HT4,12,F2,4040	1.13	.56	146	82	1.2%	6.7	43.1	3.9	20	3	60
HT4,12,F2,3030	1.10	.55	149	82	1.2%	6.8	43.6	3.7	20	3	60
HT8,7,F2,3030	.56	.28	289	80	1.1%	7.4	45.7	1.0	34	2	68
HT6,12,F2,4040	.86	.43	176	76	0.9%	8.1	48.2	2.4	23	3	69
HT8,12,F2,4040	.68	.34	197	67	0.7%	9.1	51.7	1.7	27	3	81

Fig. 199. Resultados de generación de cada módulo termoeléctrico y agrupaciones para 12 V y 0.4 A.

TEG Module Part Number	Voc (V)	Vml (V)	Iml (mA)	Pml (mW)	Eff (%)	Heat (W)	Tc (°C)	Rint (Ω)	# Series	# Parallel	Total TEGs
HT4,6,F2,2143	.75	.38	200	75	1.7%	4.5	35.5	1.9	64	1	64
HT4,7,F2,3030	.81	.41	191	78	1.6%	4.9	36.7	2.1	40	2	80
HT2,12,F2,3030	1.41	.71	112	79	1.6%	5.1	37.6	6.3	31	2	62
HT9,3,F2,2525	.34	.17	471	80	1.5%	5.2	38.0	0.4	90	1	90
HT3,12,F2,3030	1.29	.65	127	82	1.4%	5.8	39.9	5.1	31	2	62
HT6,7,F2,3030	.67	.33	247	82	1.3%	6.3	41.8	1.3	61	1	61
HT4,12,F2,4040	1.13	.56	146	82	1.2%	6.7	43.1	3.9	33	2	66
HT4,12,F2,3030	1.10	.55	149	82	1.2%	6.8	43.6	3.7	33	2	66
HT8,7,F2,3030	.56	.28	289	80	1.1%	7.4	45.7	1.0	67	1	67
HT6,12,F2,4040	.86	.43	176	76	0.9%	8.1	48.2	2.4	39	2	78
HT8,12,F2,4040	.68	.34	197	67	0.7%	9.1	51.7	1.7	47	2	94

Fig. 200. Resultados de generación de cada módulo termoeléctrico y agrupaciones para 24 V y 0.2 A.

A la vista de la Fig. 199 y Fig. 200, el número de módulos para satisfacer las necesidades de generación eléctrica oscila entre 60 y 94 módulos. Al emplear en todos los casos el mismo disipador, el área total ocupada por los módulos, que definirá el tamaño inicial del bloque de agua, es directamente proporcional al número de módulos. Por tanto, para minimizar el gasto en módulos y poder emplear el espacio en otros elementos como las baterías, se seleccionan aquellas configuraciones que demandan un menor número de módulos. En este caso se seleccionará el módulo HT4,12,F2,4040, que necesita una asociación serie-paralelo de 20-3 para el caso de 12 V. Los resultados de esta asociación se muestran en la Fig. 201.

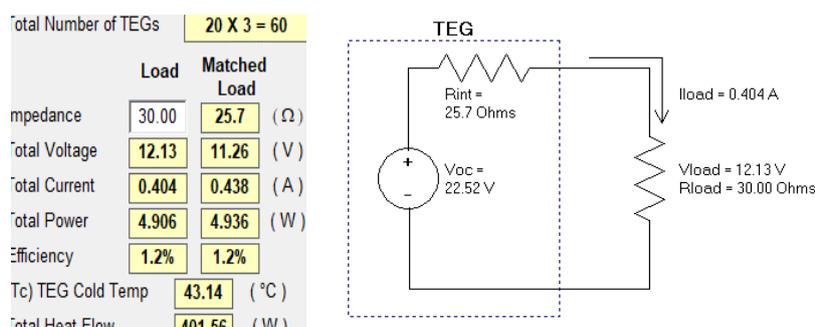


Fig. 201. Características de potencia eléctrica desarrollada y flujo térmico que atraviesa los módulos

En la vista frontal del hueco disponible en el ventilconvector, Fig. 178, las dimensiones son 358.4 x 269.4mm. Sabiendo que los disipadores son de tamaño 40 x 40 mm, la dimensión útil máxima es de 320 x 240 mm, correspondiente a 8 módulos en la dirección horizontal y 6 en la vertical, haciendo un total de 48 módulos. Al ser una capacidad inferior a los 60 módulos que se han determinado que son necesarios, indica que es necesario emplear un bloque de agua con módulos a ambos lados.

Para minimizar la altura del bloque de agua con el fin de dejar espacio a otros elementos en la parte superior, como la batería del intercambiador, es necesario aprovechar la dirección horizontal y diseñando el sistema para una uniformidad térmica, se decide escoger una configuración a tresbolillo 8-7-8-7 por cada lado (ver Fig. 202).

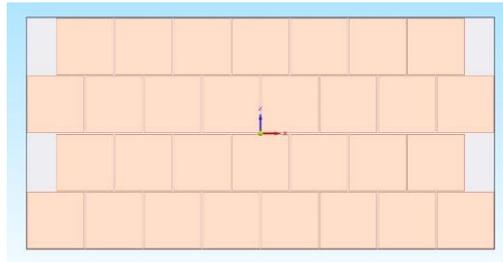


Fig. 202. Configuración de los módulos sobre el bloque de agua por uno de los lados.

El tamaño del bloque de agua es de 320 x 160 mm, lo que deja un espacio en la parte superior para otros elementos de aproximadamente 110 mm. Esto implica que la batería del intercambiador deberá ser de menor tamaño, pero en el diseño de detalle se podrá reducir considerablemente el tamaño, eliminando un componente cuya única función es el aislamiento térmico y optimizando el flujo de aire. Sin embargo, no supone un grave inconveniente, ya que el flujo de aire que atraviesa los disipadores de los termoeléctricos absorbe en torno a un 20% de la potencia térmica que requiere, siendo este cálculo muy conservador, sabiendo que los disipadores, en convección forzada, tendrán un mejor desempeño.

4.2.2.3.6.- Dimensionamiento configuración (b).

Esta configuración está conformada por un bloque de agua, los módulos termoeléctricos y otro bloque de agua de iguales dimensiones. Este bloque está, al igual que en el apartado anterior, hecho a medida. En el anterior cálculo no se ha considerado su resistencia térmica, ya que se le supone una temperatura uniforme al ser pequeña la potencia transferida. En este caso, al actuar también como foco frío, sí se deberá de tener en consideración. Para ello, se toma como referencia un bloque de agua de dimensiones del orden del que se diseñará en las futuras tareas de diseño de detalle. Este bloque es el RG76004 de GUASCH (RECTIFICADORES GUASCH, S.A.). Su hoja de especificaciones muestra su resistencia térmica global.

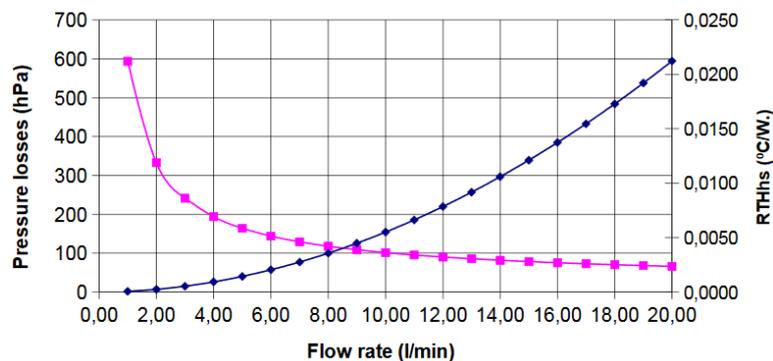


Fig. 203. Curvas de resistencia térmica y caída de presión del disipador de agua RG76004.

Esta resistencia térmica se da para una de sus caras, de dimensiones 300 x 120 mm. Esta área permitiría colocar 21 módulos en su superficie. Teniendo en cuenta que, según el fabricante del ventiloinvector, el caudal circulante de agua es de 176 l/h o aproximadamente 3 l/min, la resistencia térmica sería de unos 0.0085 K/W. Dividiendo entre los 21 módulos, la resistencia térmica se vería incrementada hasta un valor de 0.1785 K/W.

En este caso, las entradas para el programa de cálculo serán indicadas en la Tabla 36, suponiendo que la entrada de agua al segundo disipador, el del lado frío, se efectúa tras un salto térmico de 20 °C en la batería del intercambiador agua-aire.

Tabla 36. Entradas del programa de cálculo.

Tª del lado caliente	65 °C	
Tª ambiental	55 °C	
Resistencia del lado frío para cada módulo TE	0.1785 K/W	
Tensión requerida (V)	12	24
Intensidad requerida (A)	0.4	0.2

En las Fig. 204 y Fig. 205 se muestran los resultados de estos cálculos.

TEG Module Part Number	Voc (V)	Vml (V)	lml (mA)	Pml (mW)	Eff (%)	Heat (W)	Tc (°C)	Rint (Ω)	# Series	# Parallel	Total TEGs
HT4,6,F2,2143	.25	.12	63	8	0.5%	1.5	55.3	2.0	88	7	616
HT4,7,F2,3030	.28	.14	63	9	0.5%	1.7	55.3	2.2	79	7	553
HT2,12,F2,3030	.50	.25	38	10	0.5%	1.8	55.3	6.5	46	11	506
HT9,3,F2,2525	.12	.06	163	10	0.5%	1.9	55.3	0.4	167	3	501
HT3,12,F2,3030	.49	.25	47	12	0.5%	2.2	55.4	5.3	47	9	423
HT6,7,F2,3030	.27	.14	99	14	0.5%	2.6	55.5	1.4	74	5	370
HT4,12,F2,4040	.49	.24	62	15	0.5%	2.9	55.5	4.0	46	7	322
HT4,12,F2,3030	.49	.24	64	16	0.5%	3.0	55.5	3.8	45	7	315
HT8,7,F2,3030	.27	.13	137	18	0.5%	3.6	55.6	1.0	87	3	261
HT6,12,F2,4040	.47	.24	95	23	0.5%	4.5	55.8	2.5	44	5	220
HT8,12,F2,4040	.46	.23	131	30	0.5%	6.1	56.1	1.8	43	4	172

Fig. 204. Resultados de generación de cada módulo termoeléctrico y agrupaciones para 12 V y 0.4 A.

TEG Module Part Number	Voc (V)	Vml (V)	lml (mA)	Pml (mW)	Eff (%)	Heat (W)	Tc (°C)	Rint (Ω)	# Series	# Parallel	Total TEGs
HT4,6,F2,2143	.25	.12	63	8	0.5%	1.5	55.3	2.0	160	4	640
HT4,7,F2,3030	.28	.14	63	9	0.5%	1.7	55.3	2.2	143	4	572
HT2,12,F2,3030	.50	.25	38	10	0.5%	1.8	55.3	6.5	86	6	516
HT9,3,F2,2525	.12	.06	163	10	0.5%	1.9	55.3	0.4	285	2	570
HT3,12,F2,3030	.49	.25	47	12	0.5%	2.2	55.4	5.3	85	5	425
HT6,7,F2,3030	.27	.14	99	14	0.5%	2.6	55.5	1.4	132	3	396
HT4,12,F2,4040	.49	.24	62	15	0.5%	2.9	55.5	4.0	83	4	332
HT4,12,F2,3030	.49	.24	64	16	0.5%	3.0	55.5	3.8	81	4	324
HT8,7,F2,3030	.27	.13	137	18	0.5%	3.6	55.6	1.0	141	2	282
HT6,12,F2,4040	.47	.24	95	23	0.5%	4.5	55.8	2.5	78	3	234
HT8,12,F2,4040	.46	.23	131	30	0.5%	6.1	56.1	1.8	85	2	170

Fig. 205. Resultados de generación de cada módulo termoeléctrico y agrupaciones para 24 V y 0.2 A.



Como se aprecia en los resultados, el número de módulos TE es considerablemente elevado, siendo las configuraciones que menor número de módulos requieren de 170 y 172 módulos con el modelo HT8,12,F2,4040.

Esta elevada cantidad de módulos dificulta acomodar el sistema en el interior del ventiloincubador, por lo que se plantea emplear ambas caras del bloque de agua usado como foco frío y colocar dos bloques de agua actuando como foco caliente a los lados.

Siendo el mayor número de módulos TE acomodables por cara de 32 unidades, sabiendo que cada foco frío debe estar rodeado por dos focos calientes y que el número mínimo de módulos a utilizar es de 170, el número de paneles de módulos termoelectricos debe ser 6. Esto indica que debe haber 4 bloques de agua de foco caliente y 3 bloques de agua de foco frío. La composición esquemática sería la siguiente:

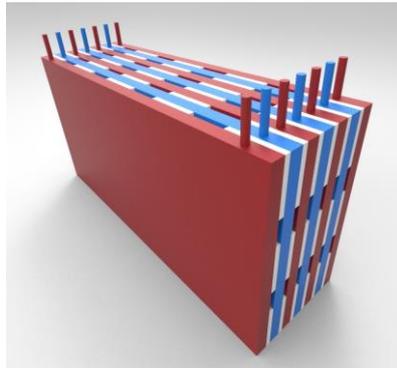


Fig. 206. Esquema donde se muestran los bloques de agua caliente de entrada en rojo, bloques de agua fríos en azul y módulos termoelectricos en blanco.

En este caso, las agrupaciones de módulos serán de cuatro paneles de 4 x 7 módulos y dos paneles de 4 x 7, en los que en una fila habrá que incluir un módulo más, quedando por tanto cuatro paneles de 28 módulos y dos de 29. Se emplea el módulo es el HT8, 12, F2,4040. Esta configuración se hace para el caso de 24 V y 0.2 A, que es la que menos módulos demanda. La configuración de 12 V y 0.4 A requiere 172 módulos del mismo modelo, con lo que serían 6 paneles uniformes de 4 x 7 módulos.

HT8,12,F2,4040		
Total Number of TEGs 85 X 2 = 170		
	Load	Matched Load
Impedance	120.00	74.7 (Ω)
Total Voltage	24.04	19.51 (V)
Total Current	0.200	0.261 (A)
Total Power	4.818	5.093 (W)
Efficiency	0.5%	0.5%
(Tc) TEG Cold Temp	56.08	($^{\circ}\text{C}$)
Total Heat Flow	1038.34	(W)
Total Voltage (Voc)	39.02	(V)

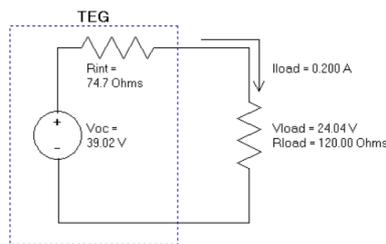


Fig. 207. Características de potencia eléctrica desarrollada y flujo térmico que atraviesa los módulos.

En este caso, a diferencia del apartado anterior, el calor que atraviesa los módulos no se emplea en calentar la estancia, por lo que la batería del intercambiador, cuyo tamaño se ve comprometido debido a la instalación de los bloques de agua y los módulos, ha de ser capaz de evacuar la misma cantidad de calor al ambiente.

4.2.2.3.7.- Dimensionamiento configuración (c).

Esta configuración está compuesta por bloques de agua entre los cuales se colocan los módulos termoelectricos, dos baterías de intercambio y dos circuitos de agua independientes. El procedimiento de cálculo será el mismo que el desarrollado para la siguiente configuración, que

por motivos de cronología del proyecto se ha calculado en primer lugar. No resulta capaz de suministrar energía eléctrica suficiente para mover el ventilador, mejorando únicamente en el aporte energético a la habitación gracias a la segunda batería.

4.2.2.3.8.- Dimensionamiento configuración (d).

Esta configuración está compuesta por bloques de agua entre los cuales se colocan los módulos termoeléctricos, una batería de intercambio y dos circuitos de agua independientes. A diferencia de la configuración expuesta en el apartado anterior, el circuito primario conectado a la caldera no intercambia calor directamente en una batería de intercambio. Es el calor que atraviesa los módulos termoeléctricos el que se intercambiará, transportado por el circuito secundario, en el intercambiador de aletas con el aire impulsado por el ventilador.

Para el cálculo de esta configuración se ha seguido un proceso de cálculo en el cual se trata de igualar la potencia térmica que atraviesa los módulos a la potencia térmica que se disipa al ambiente en la batería del intercambiador.

El procedimiento del cálculo es el mostrado en la Fig. 208, y está apoyado por el programa AZTEC y una hoja de cálculo.

Se estudian temperaturas entre los 20 °C y los 65 °C, delimitados por los límites inferior y superior del análisis. Finalizados los cálculos, se busca en qué punto la potencia que atraviesa los módulos es la misma que la que atraviesa la batería del intercambiador y pasa al ambiente, cumpliendo con un balance cero de energía en el sistema en un estado estacionario.

El análisis con esta configuración cifra el equilibrio térmico del sistema cuando la temperatura de la entrada del agua es de 59.9 °C. Las temperaturas, flujos térmicos y energía eléctrica generada en el sistema quedan expresados en la Tabla 37.

Tabla 37. Resultados del análisis de la configuración (d).

Tª entrada agua Cold-Plate (Salida batería intercambiador)	59.9 °C
Tª salida agua Cold-Plate (Entrada batería intercambiador)	60.8 °C
Tª entrada aire Intercambiador	20.0 °C
Tª salida aire Intercambiador	23.1 °C
Potencia térmica	174.4 W
Potencia eléctrica	0.43 W
Tensión (Con carga 30 Ω/V_{oc})	3.59 V / 6.56 V
Intensidad	0.12 A

Teniendo en cuenta que al sistema termoeléctrico se le sigue requiriendo la alimentación de un motor eléctrico a 12 V y 0.4 A o 24 V y 0.2 A, esta configuración se encuentra muy alejada de los requisitos de potencia. Además, hay que tener en cuenta que se está suponiendo que el agua está movida dentro del circuito secundario por una bomba, con lo que habría que generar la potencia adicional para mover dicha bomba.

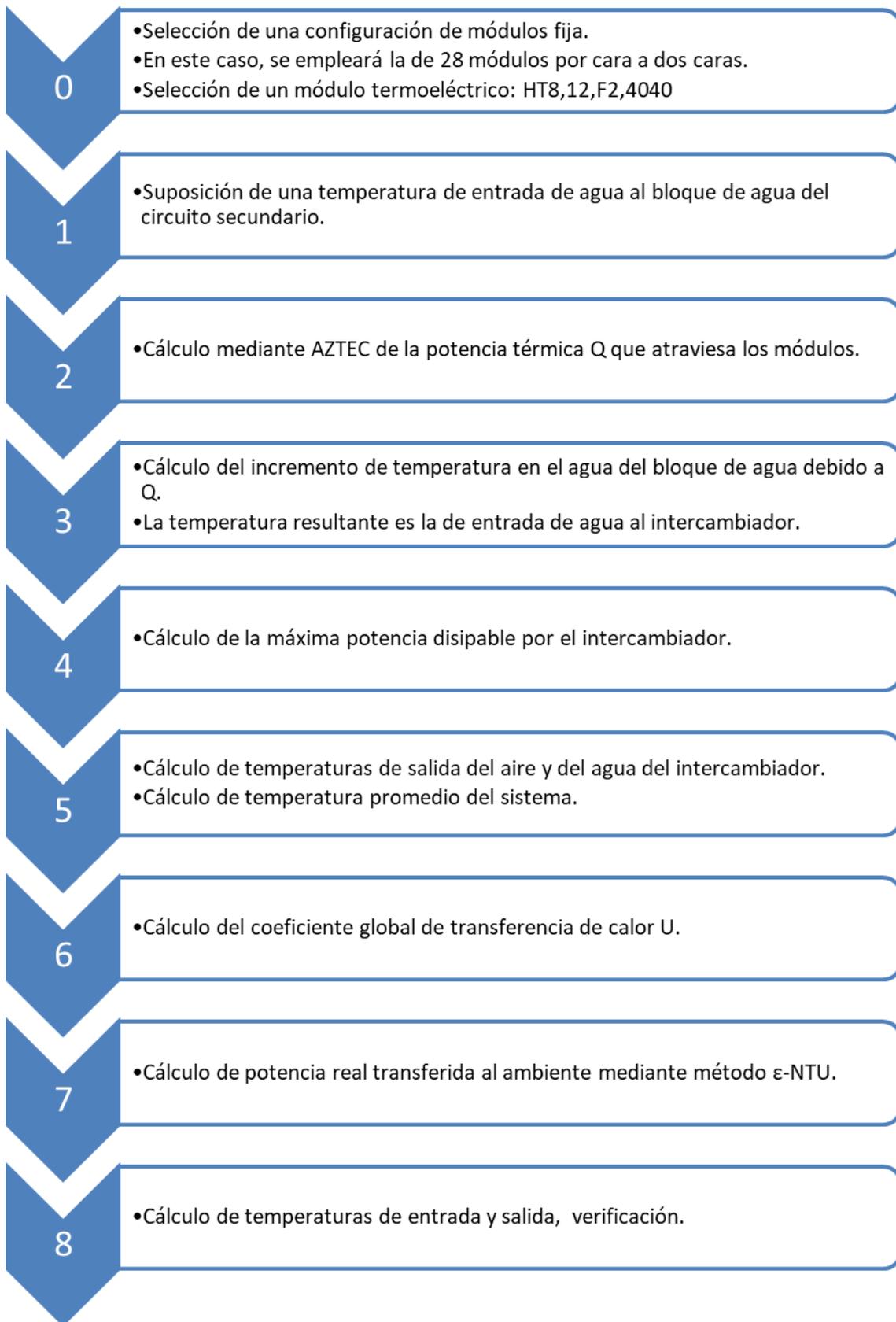


Fig. 208. Procedimiento del cálculo para la configuración (d)

4.2.2.4.- Resultados experimentales preliminares.

Para el desarrollo del prototipo básico, en primer lugar, se ha tratado de analizar el funcionamiento de un Fan-Coil al que se le incluye un sistema de generación termoeléctrica comercial. De esta manera, ha sido posible evaluar distintas configuraciones desde un punto de vista térmico y de generación eléctrica para determinar si mediante un sistema de generación comercial es posible generar la potencia eléctrica necesaria para alimentar el ventilador, a partir de las condiciones de contorno específicas de esta aplicación. Este prototipo básico, a su vez, permitirá validar en cierta manera los cálculos preliminares.

Tras el estudio del estado del arte, se ha optado por adquirir un sistema generador termoeléctrico de Thermonamics, concretamente el modelo TEG-LL-30, que consta de 16 módulos termoeléctricos de 55 mm x 55 mm de dimensión y de 127 pares cada uno de ellos.

Como se puede observar en la Fig. 209, el dispositivo cuenta con tres placas entre las cuales se disponen los termoelementos (8 entre cada dos placas, 16 en total). El agua caliente proveniente de la fuente térmica se hace pasar por la placa intermedia que está en contacto con el lado caliente de los termoelementos. Por otro lado, el agua fría pasa por las dos placas exteriores que están en contacto con el lado frío de los termoelementos.

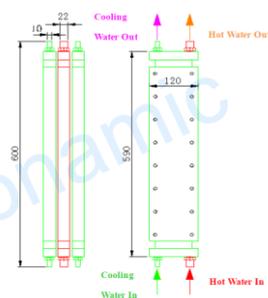


Fig. 209. Esquema del sistema termoeléctrico TEG-LL-30.

Con el objetivo de analizar cuál sería la configuración más adecuada de cara al diseño y construcción de un prototipo funcional, se han analizado las configuraciones más prometedoras del estudio preliminar desarrollado en el apartado anterior.

- **Circuito único:** El agua procedente de la caldera o similar se hace pasar en primer lugar por el foco caliente del sistema de generación termoeléctrica, después atravesará el Fan-Coil, y una vez enfriado, se introducirá en el foco frío del sistema de generación, para, finalmente, volver a la caldera.
- **Circuito doble:** El circuito primario será el que conecte la caldera o similar con el foco caliente del sistema de generación termoeléctrica. El circuito secundario conectará el foco frío del sistema de generación con el Fan-Coil. Cada circuito requerirá de su propia bomba de recirculación.

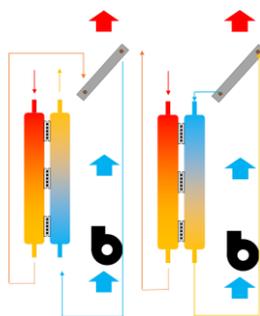


Fig. 210. Configuraciones de circuito único y doble.

Las pruebas experimentales desarrolladas con la configuración de aletas (a), ponían de manifiesto una falta de homogeneidad en la temperatura del disipador de aletas, incrementándose la temperatura considerablemente hacia el exterior a medida que cada fila de módulos iba realizando su aportación térmica. Este incremento de temperatura ocasionaba una reducción progresiva del salto térmico entre las caras de los módulos termoelectricos a lo largo del disipador. Por consiguiente, la potencia eléctrica generada se reducía considerablemente.

Estos ensayos han permitido obtener las curvas de potencia-intensidad, de manera que a simple vista es posible identificar cuál de las opciones permite obtener un mejor resultado. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para ambas configuraciones: único circuito y dos circuitos.

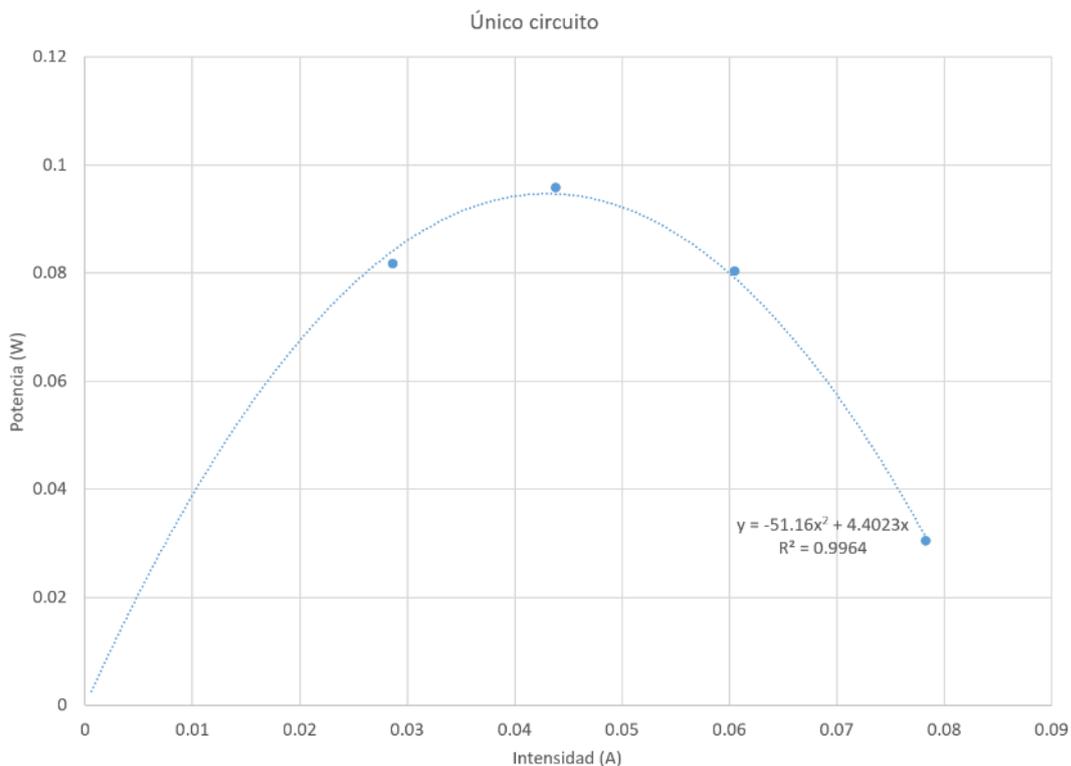


Fig. 211. Resultados experimentales para único circuito

Como se puede observar en la Fig. 211, para un único circuito, los resultados de potencia eléctrica generada obtenidos resultan muy pobres. Esto es debido a que con esta configuración, el salto térmico obtenido entre el lado caliente y el lado frío de los termoelementos es únicamente de 5°C, lo que reduce en gran manera la eficiencia eléctrica del sistema.

Tras los ensayos de la configuración de único circuito, se ha procedido a realizar las mismas pruebas para la configuración de dos circuitos. En este caso, se han analizado además, la influencia de los caudales de ambos circuitos, así como la temperatura conseguida en el lado caliente del sistema de generación TE.

En primer lugar, se han llevado a cabo mediciones para los caudales máximos que se pueden obtener con las bombas instaladas en el banco de ensayos. Y en segundo lugar, estos caudales se han ido reduciendo hasta los 3 l/min.

En la Fig. 212, se muestran las curvas de potencia-intensidad obtenidas.

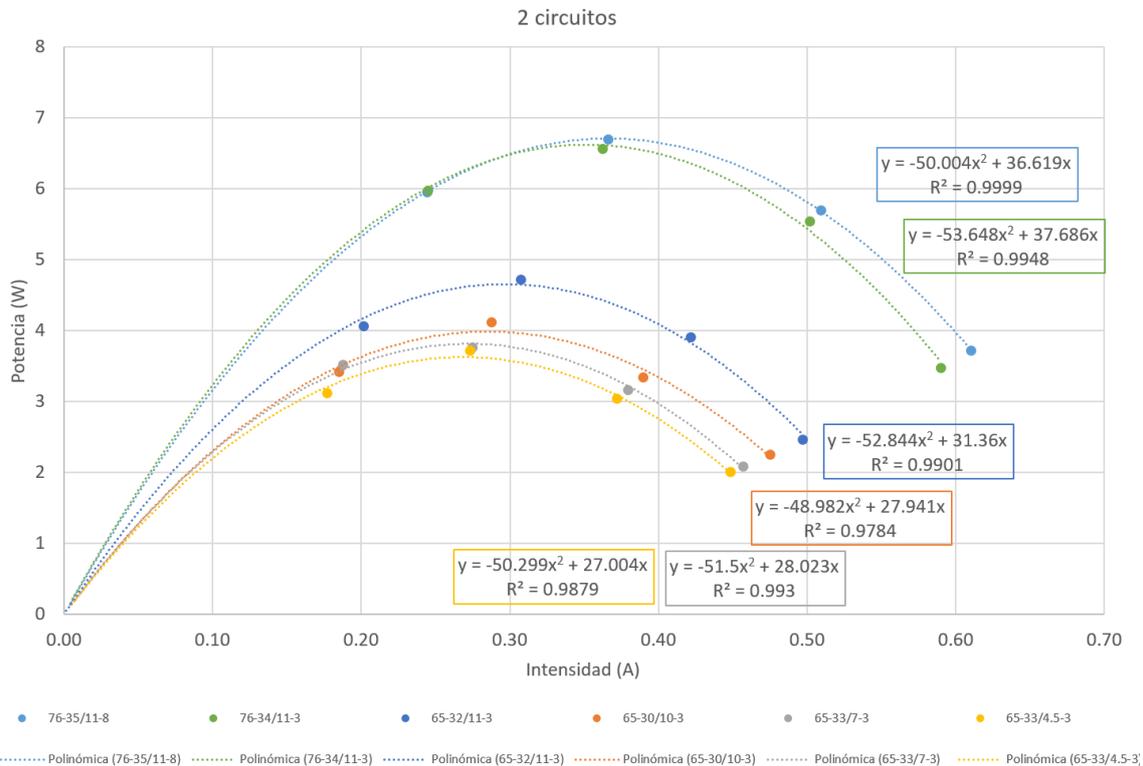


Fig. 212. Resultados experimentales para dos circuitos.

La denominación de los ensayos se ha realizado de la siguiente manera:

- Tª media lado caliente - Tª media lado frío / Caudal primario- Caudal secundario
- Ejemplo: 76-35/11-8
 - Tª lado caliente: 76 °C.
 - Tª lado frío: 35 °C.
 - Caudal primario: 11 l/min.
 - Caudal secundario: 8 l/min.

Como se puede observar en los resultados obtenidos, la influencia de reducir el caudal en el circuito secundario es relativamente pequeña comparándola con la influencia de reducir 10 °C la temperatura del lado caliente de los módulos termoeléctricos.

El ensayo más cercano a las condiciones de funcionamiento finales en cuanto a caudales de agua se refiere, es el marcado en amarillo. Es necesario destacar que el caudal mínimo conseguido es de 4.5 l/min mayor al requerido. Sin embargo, se estima que esta variación no modificará en gran medida los resultados de potencia eléctrica generada.

Los resultados muestran claramente que el sistema termoeléctrico comercial seleccionado no es válido para la generación eléctrica necesaria para la alimentación del ventilador del Fan-Coil (18W modelo actual). Además, se tendrían que alimentar las bombas de ambos circuitos, lo que aleja aún más el resultado obtenido del objetivo final.

Estos resultados demuestran la necesidad de realizar un diseño ad-hoc del sistema termoeléctrico (descrito en el Capítulo 3), con un dimensionamiento adecuado y mejorado de los sistemas de intercambio de calor, tanto del lado caliente como del frío, para los caudales y temperaturas de funcionamiento para la aplicación estudiada.

4.2.3.- Detalle constructivo del prototipo VT-TE funcional.

En este apartado se muestran una sucesión de imágenes que ayudan a entender el alcance del desarrollo y la problemática del cumplimiento de los requisitos especificados en el apartado anterior.

La ubicación del sistema TEG se hace de forma que el flujo térmico se maximice a través de las mismas, interconectando los módulos TE en serie. Estos detalles pueden apreciarse en las figuras adjuntas (Fig. 213 a la Fig. 216), en las que se puede identificar la parte correspondiente de cada esquema.



Fig. 213. Esquema de disposición hidráulica de un bloque TEG.

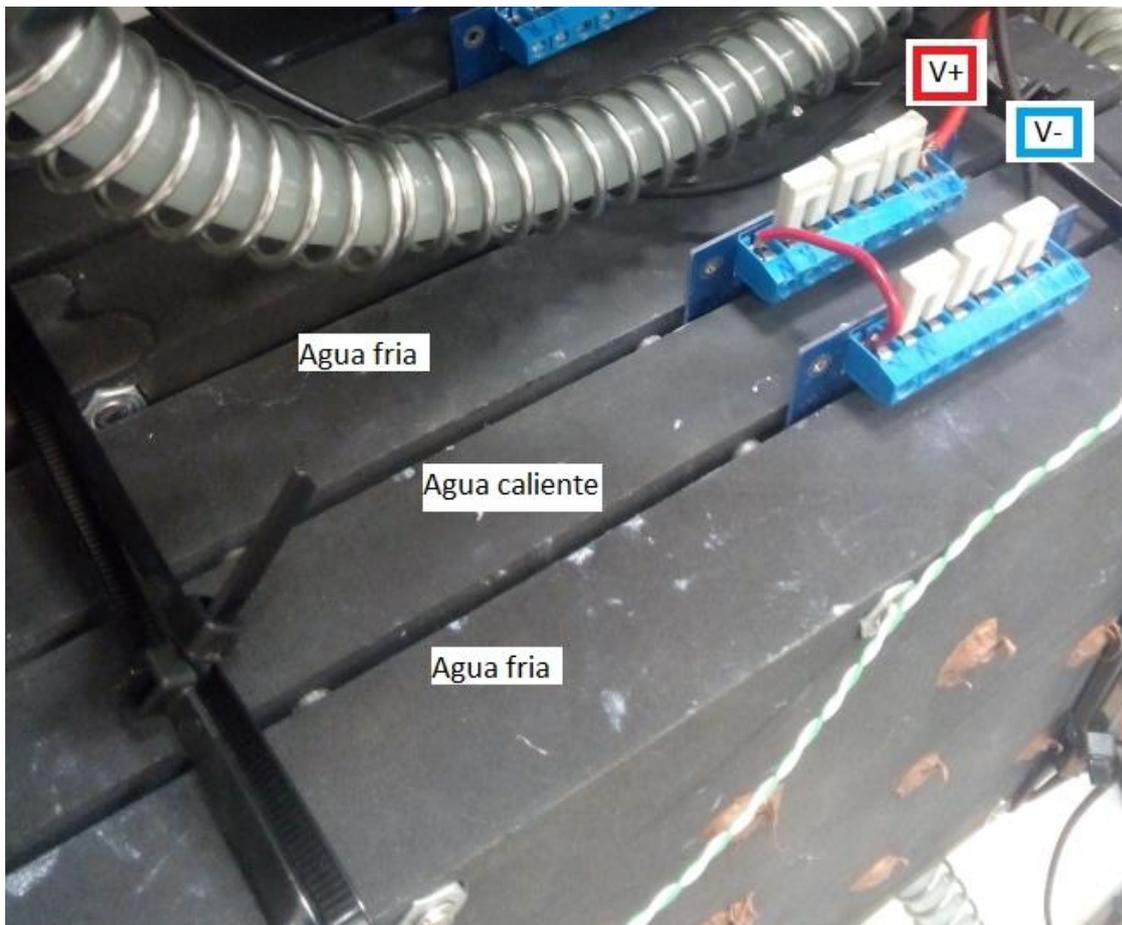


Fig. 214. Prototipo de bloque TEG correspondiente al esquema de disposición hidráulica.

El funcionamiento esperado con un circuito de calefacción es mostrado en la Fig. 215.

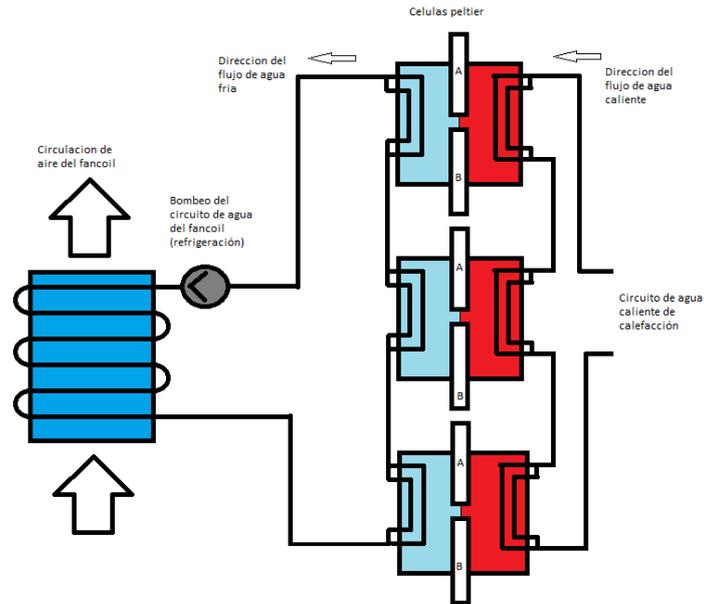


Fig. 215. Esquema general de la disposición hidráulica del VC-TE.

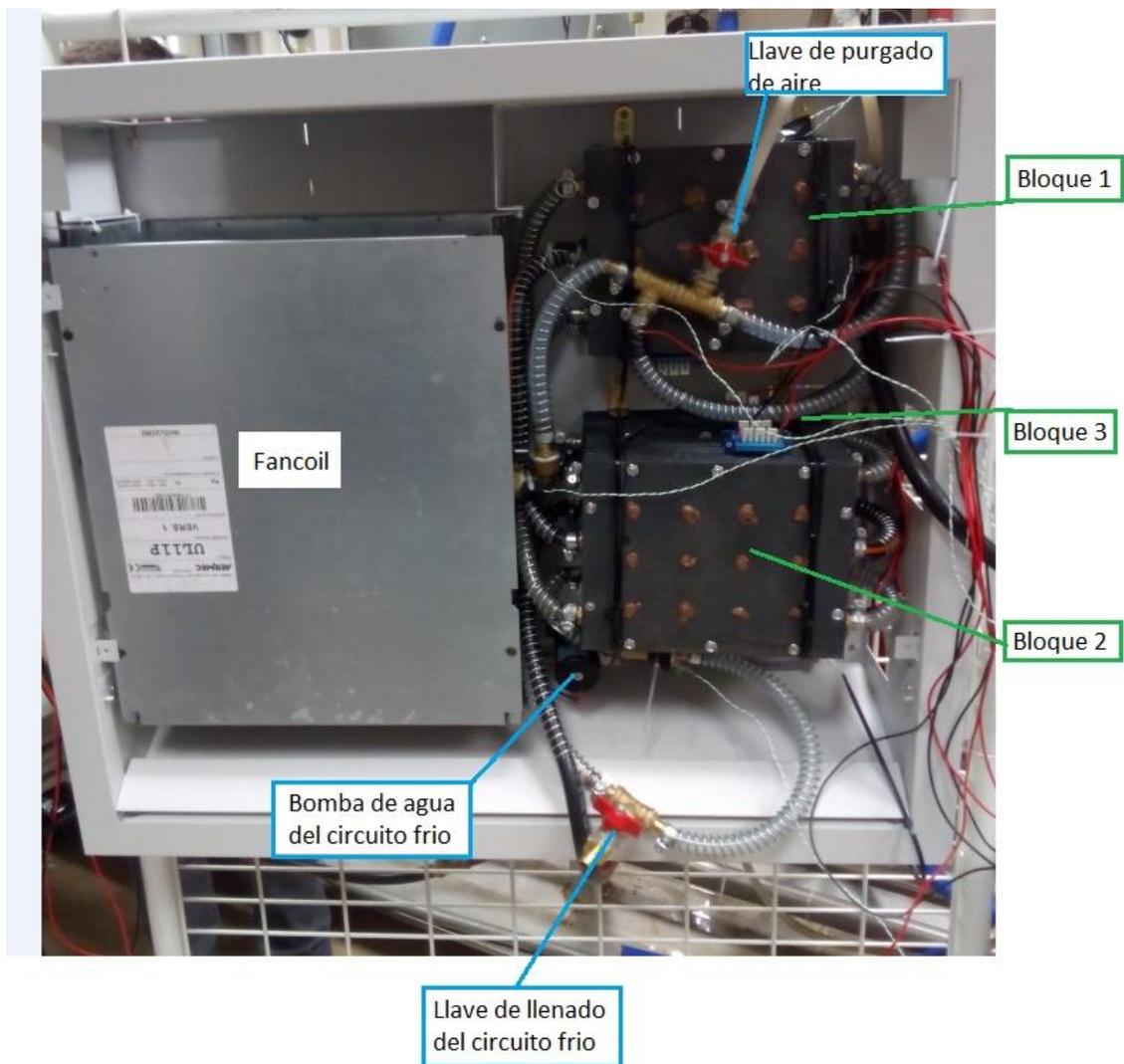


Fig. 216. Visión general del prototipo de VC-TE.

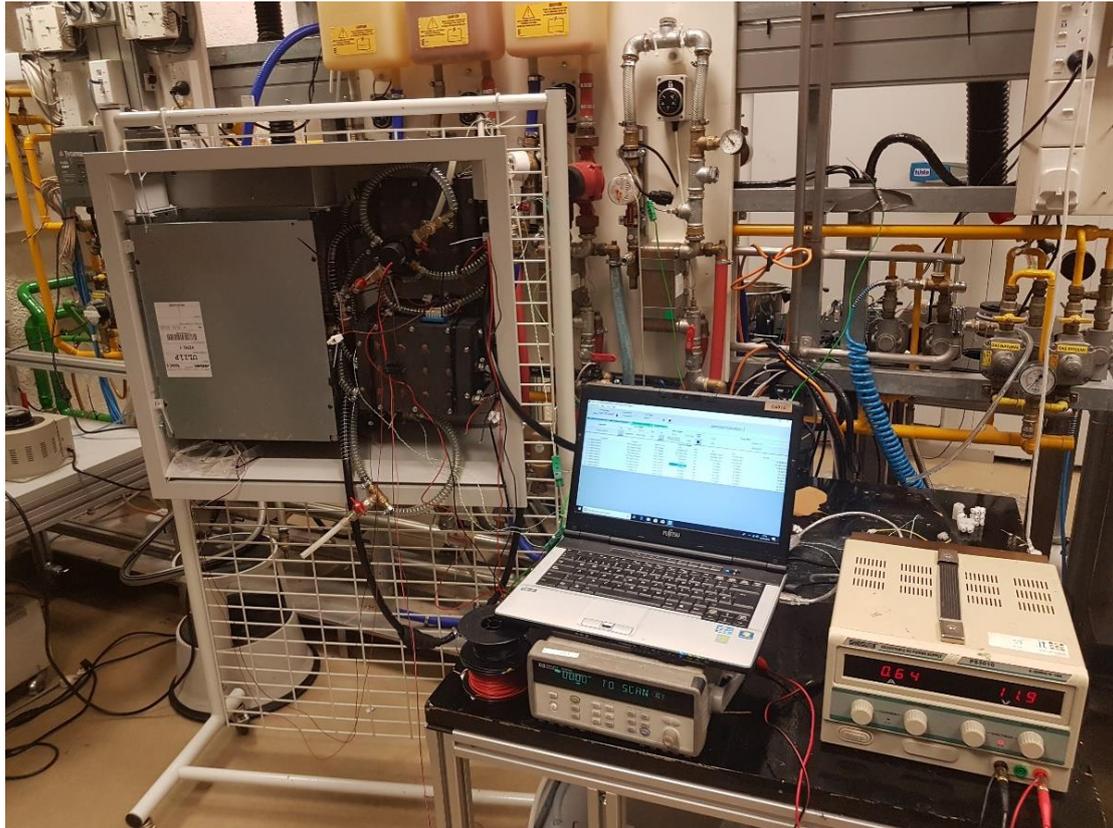


Fig. 217. Detalle de VC-TE instalado sobre pedestal en banco de ensayos con captura de datos

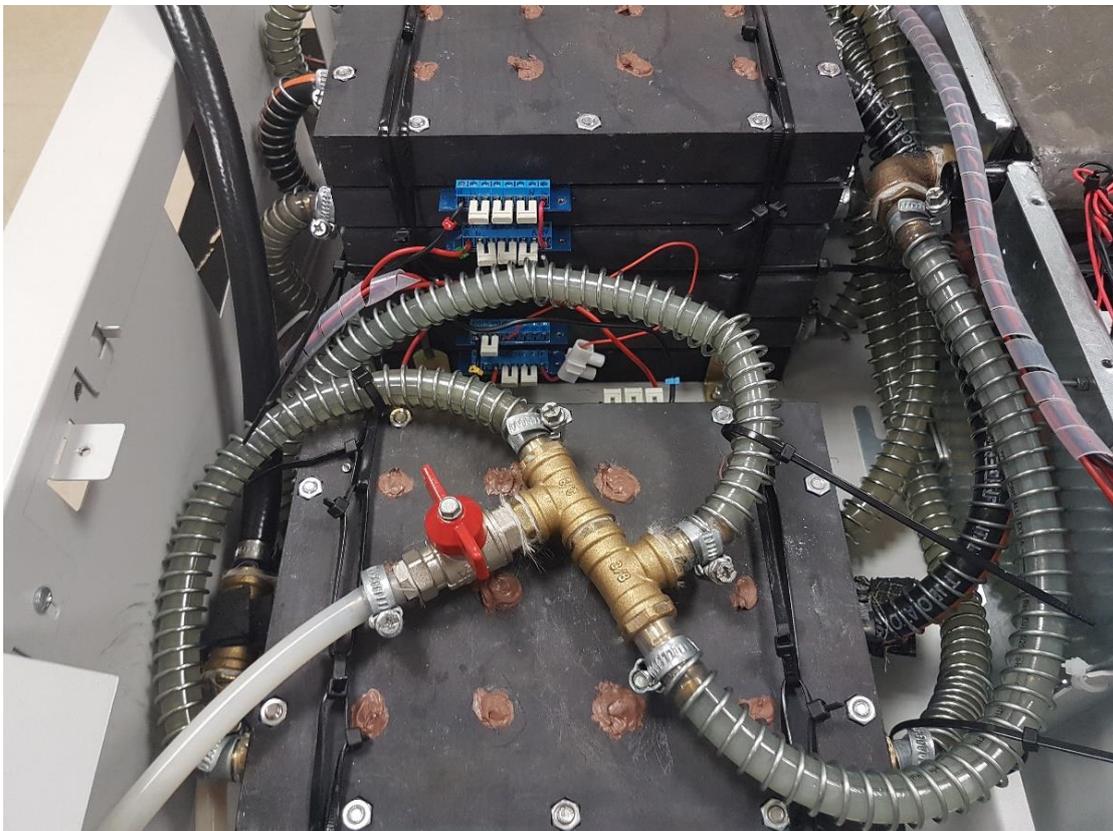


Fig. 218. Detalle de los tres bloques termoelectrónicos instalados en el VC-TE y su sistema de llenado e interconexión hidráulica.

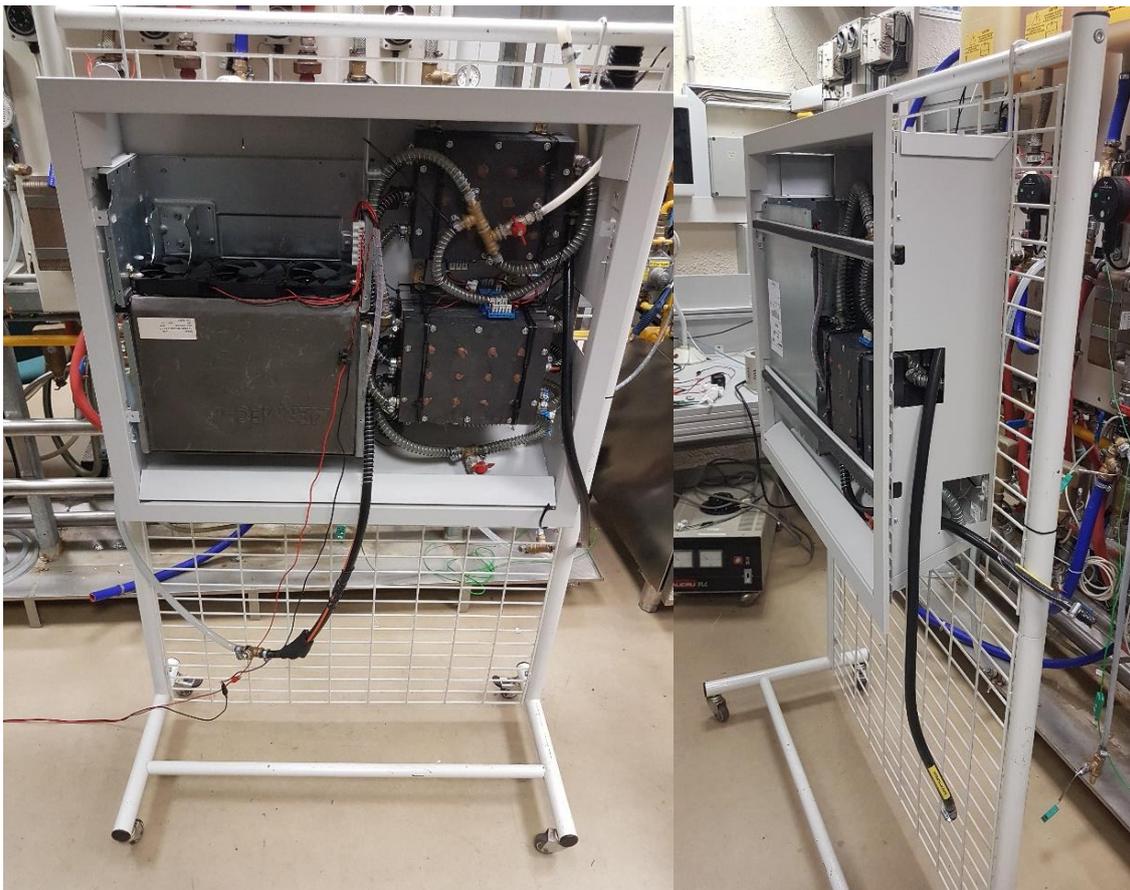


Fig. 219. Visión frontal y lateral de VC-TE instalado sobre pedestal

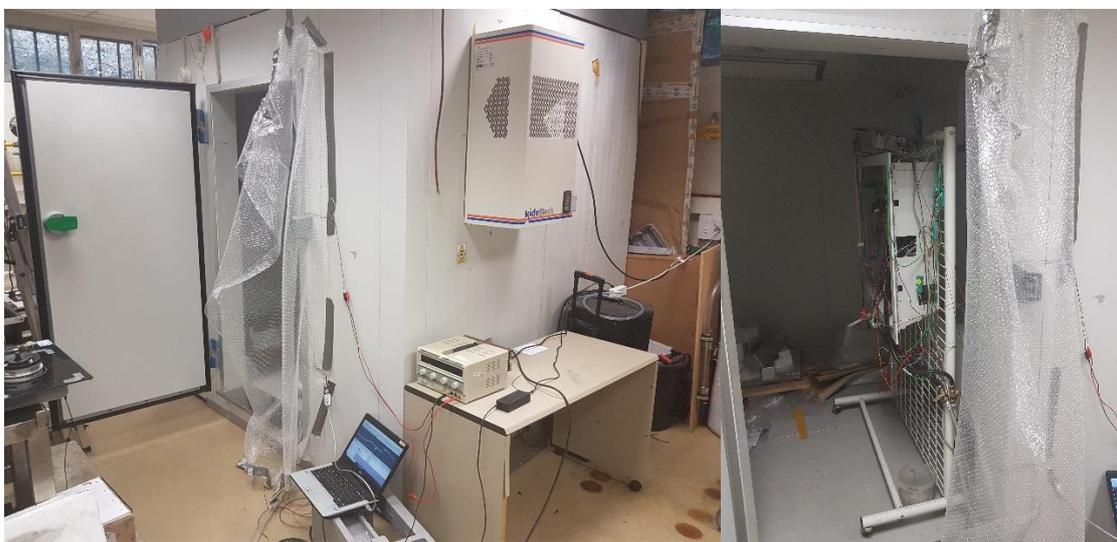


Fig. 220. Exterior de cámara climática con sistema de captura de datos y equipo de refrigeración instalado (izq.) y equipo VC-TE sobre pedestal instalado en interior de cámara climática (der)



Fig. 221. Interior de VC-TE (izquierda) y equipo embalado previo a su entrega (derecha).

4.2.3.1.- Consideraciones para la puesta a punto del VC-TE.

4.2.3.1.1.- Llenado del circuito de agua del Fan-Coil.

Primeramente, es necesario llenar completamente el circuito de agua fría del Fan-Coil de forma que no queden burbujas de aire, ya que, de quedar burbujas, podrían provocar un cebado deficiente de la bomba de agua y un flujo irregular o nulo, lo que penalizará el rendimiento del sistema. La verificación del cebado de la bomba se realiza visualmente, verificando tanto la ausencia de burbujas de aire en el circuito de agua del Fan-Coil, como que el consumo de corriente de la bomba sea regular y sin oscilaciones.

Para llenar el circuito es necesario colocar el Fan-Coil en horizontal, abrir la llave superior y conectar una entrada de agua en la inferior, de forma que el agua entre con poca presión. A fin de evacuar las burbujas de aire que pudiesen quedar retenidas, será necesario poner en marcha la bomba del circuito de agua del Fan-Coil a intervalos de 10 segundos con la bomba arrancada y otros diez con la bomba parada.

No es recomendable aplicar la presión del agua de red, ya que las estanqueidades del circuito hidráulico no están preparadas para resistir presiones de esa magnitud, y podría dañarse el sistema.

Será necesario, también, alimentar la bomba del circuito de agua fría del Fan-Coil suministrando 12 voltios DC de forma externa, para que la recirculación de agua entre el Fan-Coil y los módulos que integran los módulos TE sea efectiva.

4.2.3.1.2.- Funcionamiento del circuito.

La tensión eléctrica generada por los módulos TE será proporcional a la temperatura entre la parte fría y la parte caliente. Es por lo tanto necesario que la entrada de agua caliente al circuito de calefacción se haga a una temperatura mínima, y que esta temperatura sea constante (de igual manera que sucede en un circuito de calefacción).

Una vez la tensión generada en los módulos TE suba y se genere la tensión necesaria, los ventiladores comenzarán a girar.

Para activar la bomba de agua será necesario alimentarla a una tensión de 12 voltios DC. En las condiciones probadas en Centro Stirling, el consumo normal de la bomba cebada es del orden de 0,27 A. Es recomendable encender la bomba cerca de un minuto después de conectar el agua caliente al circuito del Fan-Coil, de forma que la diferencia de temperatura vista por el sistema termoelectrónico sea máxima.

4.2.3.1.3.- Condiciones de encendido.

A continuación, se detallan los pasos a dar para el encendido del dispositivo:

- Atemperar el sistema a una temperatura de unos 10 °C.
- Una vez estabilizada la temperatura del sistema, será necesario contar con un circuito de calentamiento del agua de al menos 6 KW, de forma que la temperatura caliente suba rápidamente una vez comenzada la prueba.
- Un par de minutos después se pondrá en marcha la bomba del circuito interno de refrigeración.
- En esta situación, la tensión generada por los módulos TE será máxima, y se podrá alimentar el ventilador a partir de la electricidad generada por los módulos termoeléctricos.

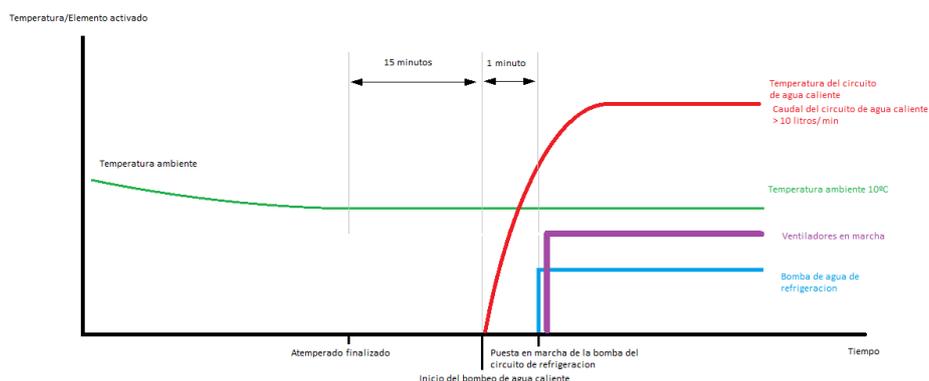


Fig. 222. Proceso de encendido del VC-TE.

4.3.- Entorno de caracterización del VC-TE.

Se ha desarrollado un banco de ensayos para caracterizar el VC-TE en condiciones de funcionamiento realistas, en el cual se genera un gradiente térmico mediante una caldera con dos flujos de agua a diferente temperatura que harán que los TEG generen la energía necesaria para activar el sistema y permitan su caracterización y validación.

Para ello, ha sido necesario diseñar y montar un banco de ensayos que además a los elementos del capítulo anterior (caudalímetros de agua, bombas de recirculación, sensores de temperatura, control de temperatura PID, ...) incluya los siguientes elementos:

- **Elementos del banco de ensayos:** además del equipamiento básico, incluye una cámara frigorífica, un equipo de refrigeración, una caldera y un anemómetro. Sistema de adquisición de datos NI-CompactDAQ: para la toma y el preprocesado de datos.
- **Dispositivos de experimentación y caracterización:** incluye los diferentes elementos calefactores que se van a testear, tanto para ser caracterizados como para ser comparados, lo que incluye un radiador de alta temperatura, dos ventiloconvectores, un Fan-Coil de referencia OMNIA ULP 11 y otro de la gama YORK de la compañía Johnson Controls, y un TEG (sistema de generación termoeléctrica TEG-LL-30).

4.3.1.- Banco de ensayos para la caracterización de sistema termoeléctrico

4.3.1.1.- Cámara frigorífica.

Esta cámara permite disponer de un entorno controlado y aislado del exterior donde minimizar las pérdidas de calor y ensayar los diferentes componentes, incluido el VC-TE. La cámara es un modelo universal de la empresa KIDE S.Coop, con unas dimensiones exteriores de 10,63 m³ (2,15 x 2,15 x 2,30 m³).

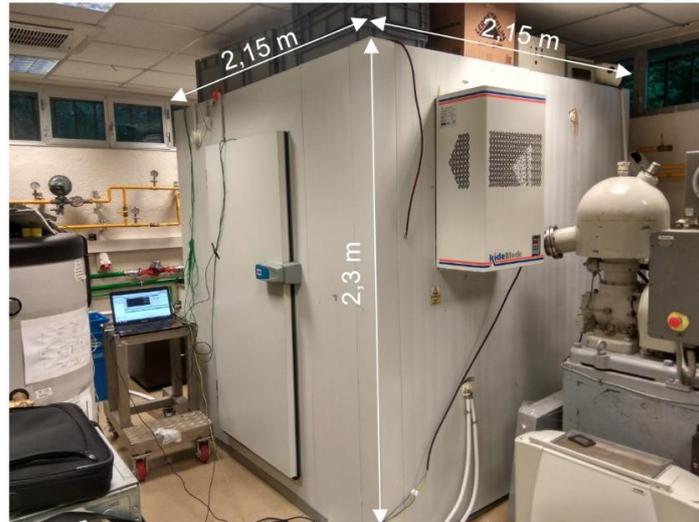


Fig. 223. Cámara frigorífica de la empresa Kide S.Coop

La cámara está fabricada a partir de panel sándwich, de 150 mm de espesor, conteniendo espuma de poliuretano rígida en su interior. Se trata de un aislante con muy buenas propiedades térmicas como pueden apreciarse en la Tabla 38.

Tabla 38. Propiedades de la espuma de poliuretano rígida

Densidad (ρ)	kg/m ³	40
Calor específico (C_p)	J/kgK	1674
Conductividad térmica (k)	W/mK	0,026

4.3.1.2.- Equipamiento de refrigeración.

Para establecer las condiciones iniciales en el interior de la cámara, se utiliza un equipo de refrigeración, de la marca KideBlock, que permita bajar la temperatura de partida. Se trata de un equipo de la misma empresa suministradora que la cámara, por lo que se aseguran los cierres y estanqueidades. Es el modelo EMB 1006M1Z, que cuenta con una potencia de refrigeración aproximada de 1.2 kW, suficiente para alcanzar los 10 °C que las condiciones iniciales requeridas.



Fig. 224. a) vista exterior del equipo frigorífico y b) vista interior.

4.3.1.3.- Anemómetro

Se empleará el anemómetro/higro-termómetro HTA 4200, de PACER Instruments, para la medición de velocidades del aire tanto en el caso del Fan-Coil como en el de convección natural. Este anemómetro cuenta con una resolución de 0.01 m/s, por lo que su rango de medición resulta apropiado para los flujos con los que se va a trabajar, que se presuponen bajos.



Fig. 225. Anemómetro empleado para la toma de medidas.

4.3.1.4.- Caldera.

El agua caliente se obtiene de una caldera de condensación ISOFAST CONDENS de Sanier Duval, de 35 kW de potencia nominal. Esta caldera puede funcionar para producción simultánea de ACS y calefacción, pero para los ensayos únicamente se utilizará el modo de calefacción. Como termostato se empleará el mando Exacontrol E7 R, incluido con la caldera. Este mando funciona por radio y dispone de una pantalla LCD y controles con los que ajustar la temperatura de consigna y la programación horaria deseadas.

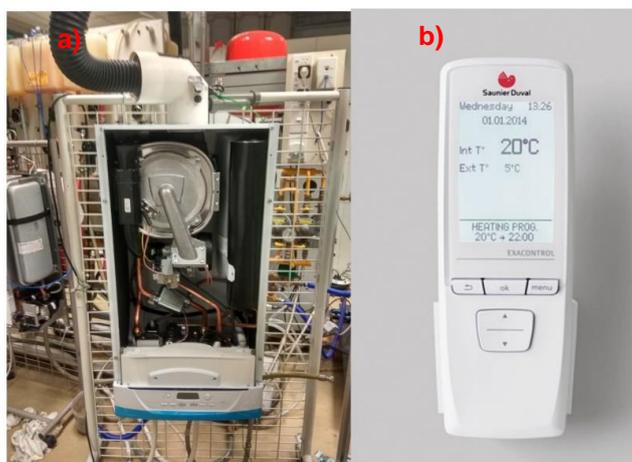


Fig. 226. a) Caldera empleada para los ensayos y b) termostato colocado en el interior de la cámara.

La regulación de la potencia de la caldera es modulante, permitiéndole desarrollar su potencia de forma proporcional. Su funcionamiento se basa en comparar los datos de la temperatura de impulsión y retorno del circuito de calefacción con la consigna establecida como temperatura de confort, o incluso datos de una sonda exterior si se quisiera optimizar su funcionamiento. Esta última opción no se empleará, ya que el exterior se corresponde con el laboratorio, donde la temperatura está controlada mediante climatización.

La modulación permite mayor control sobre la entrega de potencia y reduce los ciclos de encendido desde temperaturas de radiador más bajas, además de disponer de una temperatura de salida del agua al circuito de calefacción más constante.

4.3.2.- Sistema de adquisición de datos.

La toma de medidas de temperatura se realiza en distintos puntos de la cámara mediante termopares, sellando los orificios para el paso de los mismos con espuma de poliuretano. La recepción de los datos se realizará mediante el equipo de adquisición de datos NI-CompactDAQ (NI cDAQ – 9172), con conexión USB a PC portátil. Mediante el software SignalExpress de National Instruments se grabarán los datos tanto gráfica como numéricamente.

Por otro lado, se ha desarrollado un programa en Labview de adquisición de datos, para el preprocesado de la información.

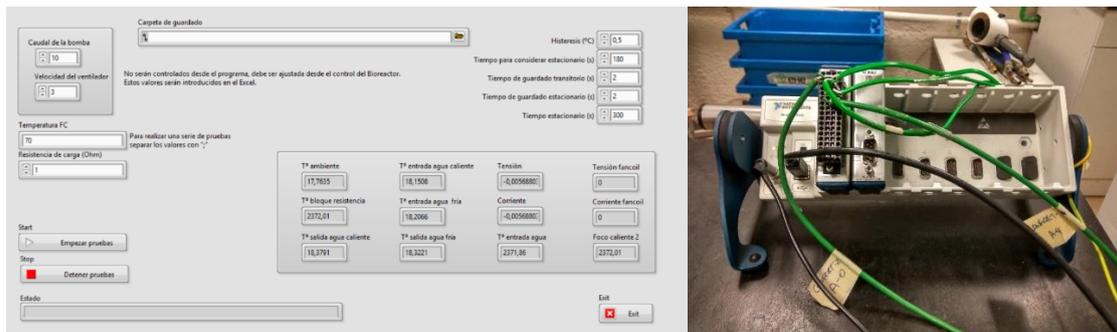


Fig. 227. Banco de pruebas y software de adquisición de datos y módulos de captura de CompactDAQ

4.3.3.- Dispositivos de experimentación y caracterización.

4.3.3.1.- Radiador de alta temperatura

Los ensayos para la validación del modelo de radiador de alta temperatura con convección natural se han realizado con un radiador de 3 elementos perteneciente a la marca FONDITAL (modelo Blitz S5 600/100).

La potencia entregada por cada elemento del radiador viene determinada por una fórmula (87) común a todos los radiadores según la norma EN 442-1, en la que varían dos coeficientes en función del modelo.

$$P_{elemento} = K_m \Delta T^n \quad (87)$$

Por ejemplo, la potencia máxima alcanzable se daría cuando, la temperatura del aire fuera de 15 °C y la de la superficie del radiador de 65 °C, por lo que la diferencia de temperaturas será de 50 °C. Los coeficientes se obtienen de la hoja de características del radiador de la Tabla 39 ($K_m = 0,8161$ y $n = 1,3034$).

$$P_{elemento} = 0,8161 \cdot 50^{1,3034} = 133,7W \quad (88)$$



Fig. 228. Geometría del radiador de alta temperatura instalado en cámara frigorífica.

Tabla 39. Características técnicas del catálogo Fondital del radiador.

Modelo	Profundidad (C) mm	Altura (B) mm	Distancia entre ejes (A) mm	Longitud (D) mm	Diámetro Conexiones pulgadas	Contenido de agua litros/ elem.	Potencia técnica ΔT 30K W/elem.	Potencia técnica ΔT 50K W/elem.	Exponente n	Coficiente K_m	
Super	350/100	97	407	350	80	G1	0,24	48,1	93,4	1,3001	0,5776
S5	500/100	97	557	500	80	G1	0,31	59,6	115,3	1,2930	0,7330
S5	600/100	97	657	600	80	G1	0,35	68,7	133,7	1,3034	0,8161
Super	700/100	97	757	700	80	G1	0,38	79,9	158,0	1,3337	0,8566
Super	800/100	97	857	800	80	G1	0,42	88,4	175,1	1,3372	0,9364

Presión máxima de ejercicio: 1600 kPa (16 bar)

Teniendo en cuenta que el radiador empleado en el ensayo es de tres elementos la potencia total será:

$$P_{\text{radiador}} = 3 \cdot 133,7 = 401,1W \quad (89)$$

4.3.3.2.- Fan-coil

Este Fan-Coil, perteneciente a la gama YORK de la compañía Johnson Controls, se utiliza en los ensayos en la cámara adiabática, para la identificación de la evidencia de mejora de la eficiencia de los ventiloconvectores frente a los radiadores.



Fig. 229. Dimensiones del Fan-Coil de Johnson Controls

En la Fig. 230 puede verse el interior un Fan-Coil de esta marca con los elementos descritos.

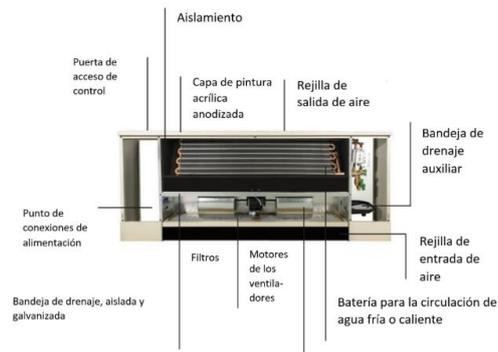


Fig. 230. Elementos interiores del Fan-Coil de Johnson Control.

Mediante el anemómetro se han tomado medidas de las velocidades de salida de aire del equipo, para los tres niveles de funcionamiento que ofrece:

1. 1,06 – 1,07 m/s.
2. 1,57 – 1,58 m/s.
3. 2,08 – 2,10 m/s.

4.3.3.3.- TEG

El TEG de la compañía Thermonamic, identificado en el estado del arte, se utiliza para validar las características operativas de un ventilador alimentado con termoelectricidad y el ajuste del banco de pruebas.

El modelo utilizado, TEG-LL-30, está compuesto por 16 módulos de Bi_2Te_3 con 241 pares termoelectrónicos y dimensiones de 55 mm x 55 mm por módulo.



Fig. 231. Dispositivo TEG de Thermonamic TEG-LL-30

En primer lugar, se han realizado varias pruebas para caracterizar el sistema termoelectrónico. Para ello, el ventilador de CA ha sido alimentado por una fuente de alimentación externa. Una vez realizada la caracterización, se ha seleccionado un ventilador de CC adecuado y se ha integrado en el nuevo sistema. El rendimiento con el nuevo ventilador ha sido analizado mediante varias pruebas de calentamiento y enfriamiento.

En la Fig. 232, se muestra el banco de ensayos desarrollado con los elementos arriba comentados, donde se aprecia una imagen del interfaz de usuario del programa de adquisición de datos desarrollado.

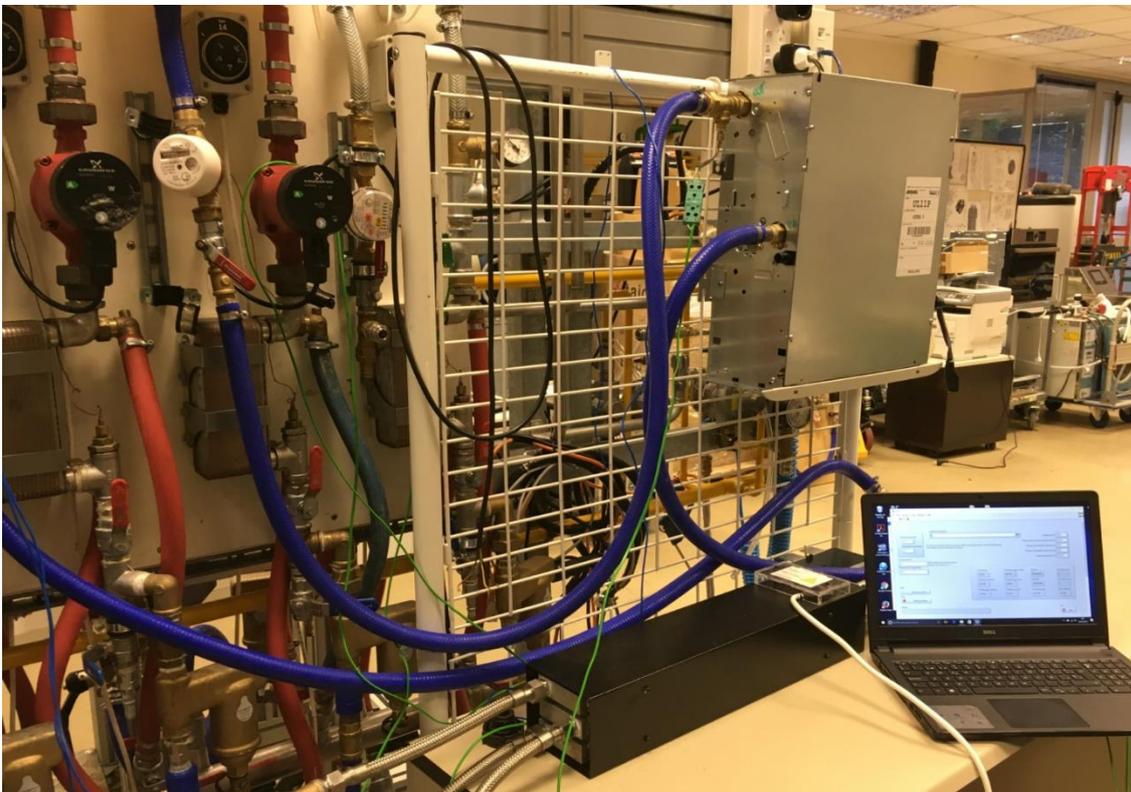


Fig. 232. Banco de pruebas y sistema de medición desarrollado a medida.

4.4.- Resultados y caracterización experimental del VC-TE

Los resultados que se muestran a continuación provienen de dos ensayos diferentes.

El segundo ensayo realizado con el TEG diseñado en el capítulo 3, permite aplicar estas características al modelo disponible para conocer el punto de trabajo exacto del VC-TE; la potencia generada y su eficiencia de trabajo.

El tercer ensayo, en la cámara refrigerada permite conocer en un entorno controlado de temperatura la respuesta del sistema ante diferentes condiciones ambientales.

4.4.1.- Respuesta del VC-TE en cámara refrigerada

Se han realizado pruebas de caracterización del sistema considerando condiciones óptimas de flujo térmico a través de los módulos, con ambos circuitos alimentados con agua, así como en condiciones de funcionamiento real, alimentando el circuito de calentamiento con agua caliente y el de refrigeración con aire impulsado a través de la batería del Fan-Coil.

4.4.1.1.- Pruebas de caracterización agua-agua.

Estas pruebas y resultados son los desarrollados en el capítulo 3, que se resumen brevemente para facilitar la comprensión.

Se caracteriza la potencia suministrada por el sistema calentando agua en el circuito de calentamiento, y haciendo circular agua fría a una temperatura cuasi-constante por el circuito de agua fría. La suma total de los bloques termoelectricos ha generado una potencia eléctrica de más de 30 W manteniendo una diferencia de temperatura de cerca de 35 °C entre la parte fría y caliente, como se aprecia en la gráfica a continuación. Mientras que los 18 W necesarios para la alimentación del Fan-Coil se consiguen con cerca de 27 °C. Como se puede observar en dicha gráfica la potencia eléctrica generada crece exponencialmente con la diferencia de temperatura. Con 15 °C de diferencia de temperatura apenas se consiguen 5 W eléctricos mientras que, si se duplica la diferencia de temperatura, con 30 °C, se quintuplica la potencia generada 25 W.

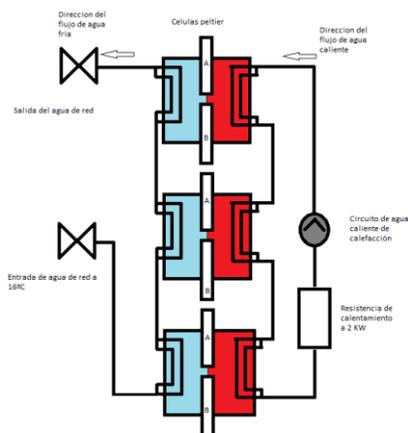


Fig. 233. Esquema de funcionamiento agua-agua.

Utilizando el mismo esquema de conexión de la Fig. 215 y una vez caracterizado el sistema termoelectrico, se han realizado pruebas en el interior de la cámara refrigerada tanto a temperatura ambiente (25 °C) como a temperatura controlada (10 °C).

4.4.1.2.- Pruebas de caracterización agua-agua en exterior.

Utilizando un esquema de conexión como muestra la Fig. 215 y una vez caracterizado el sistema termoeléctrico en condiciones de temperatura estables, se han realizado pruebas a temperatura ambiente (25 °C).

Dado que las condiciones ambientales (temperatura ambiente veraniega) no son compatibles con las condiciones de uso del Fan-Coil, se hace una caracterización del sistema como paso previo a la caracterización en cámara refrigerada. A pesar de que previsiblemente, la temperatura ambiente de 25 °C es irreal (no es muy real calentar una habitación a más de 25 °C, considerando que la temperatura de confort se estima entre 20 y 25 °C) y a pesar también de que penalizará la generación de potencia de los módulos termoeléctricos, esta caracterización proporcionará una primera estimación del rendimiento del sistema y validación del modelo.

Se observa que efectivamente a 25 °C de temperatura ambiente, la potencia eléctrica generada no es suficiente como para poner en marcha el ventilador, con lo que se procede a repetir las pruebas en cámara refrigerada. No obstante, se caracteriza su comportamiento con las mismas impedancias de carga utilizadas en las medidas anteriores.

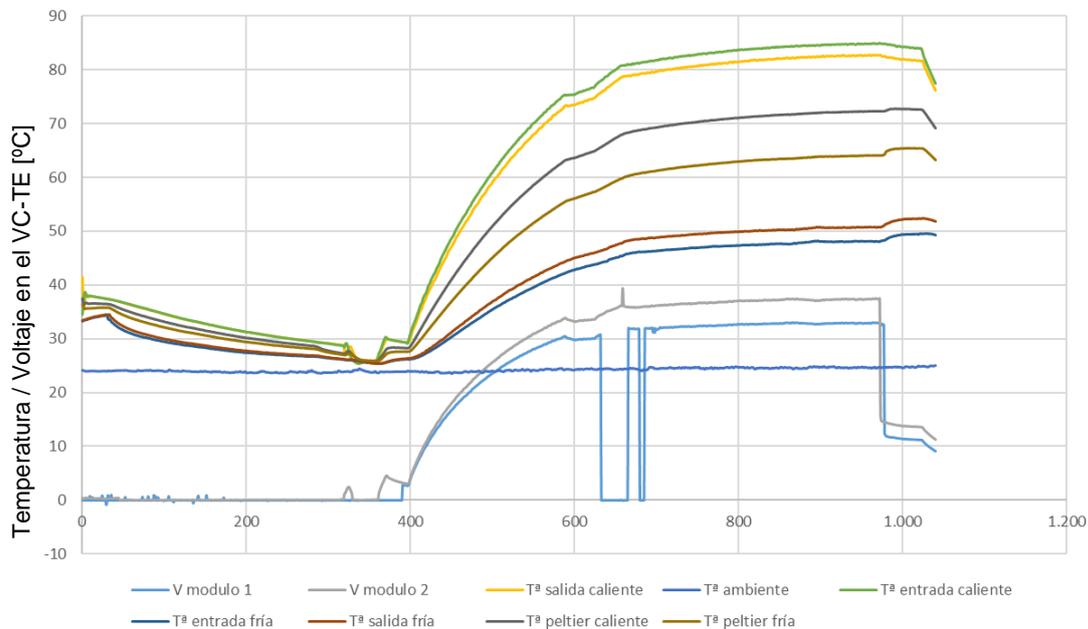


Fig. 234. Curvas de funcionamiento Tª/Voltaje vs tiempo del VC-TE en exterior.

4.4.1.3.- Pruebas de caracterización aire-agua en cámara refrigerada.

En el transcurso de las pruebas en cámara refrigerada, se observa que mediante el ventilador que integra el Fan-Coil es complicado realizar la ventilación, ya que el ventilador AC dispone de un motor síncrono. Éste necesita sincronizarse a la frecuencia de red para iniciar su giro y solo gira a esa velocidad fija que viene marcada por la frecuencia de red y el diseño electrónico del ventilador. A la velocidad mencionada, el ventilador siempre consume la misma potencia por lo que no arrancará hasta disponer de la potencia necesaria, esto es, los 18 W objetivo. Esto representa un problema, ya que el sistema de generación termoeléctrica necesita que la parte fría esté activada para poder generar electricidad. Esta situación implica la necesidad de tomar una acción de contingencia para solventar la necesidad de aire desde los momentos iniciales.

Se reemplaza, por tanto, el ventilador AC, por tres ventiladores axiales, y se realiza una prueba de funcionamiento del sistema en cámara climática.

Se parte de una temperatura ambiente de 10 °C y se alimenta el sistema con un circuito de agua caliente alimentado a 2 kW con una temperatura inicial de unos 85 °C. En el instante inicial la diferencia de temperaturas es lo suficientemente grande como para generar una tensión que ponga en marcha los ventiladores, lo cual tiene a lo largo de la prueba un efecto de retroalimentación que hace que el efecto se prolongue hasta el final de la prueba.

Cerca de 40 minutos después de activar el calentamiento, la temperatura de la cámara climática llega a los 25 °C, y la prueba se da por terminada, desconectando primeramente el calentamiento de agua y posteriormente el flujo de agua del circuito de calefacción. Tras esto, la tensión generada en los módulos termoeléctricos cae hasta que no son capaces de alimentar los ventiladores, como se muestra en la Fig. 235.

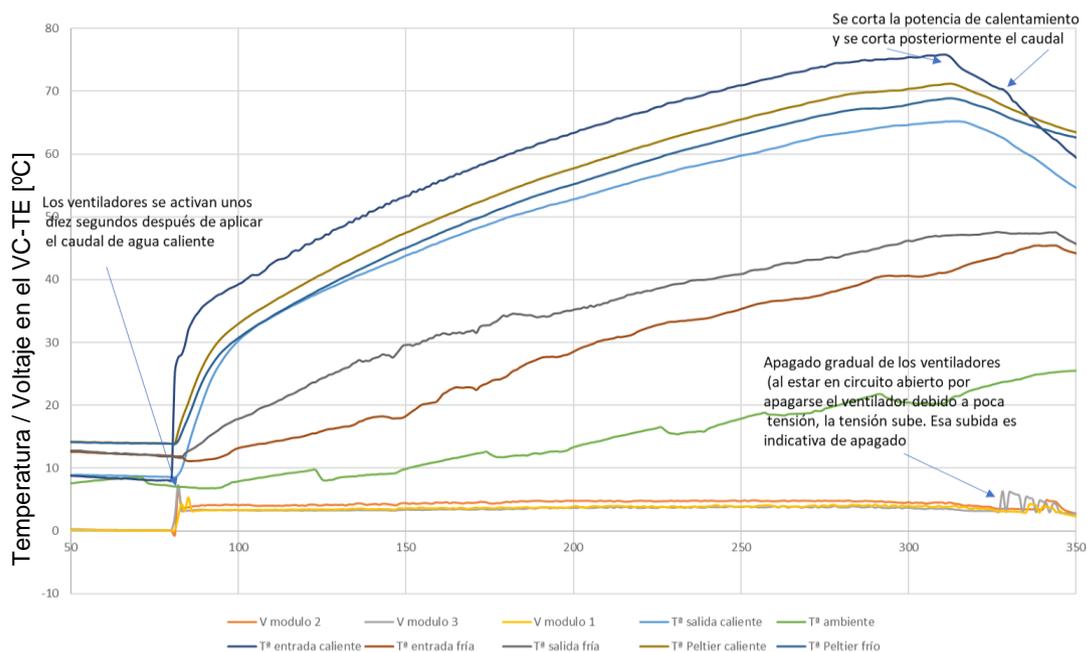


Fig. 235. Curvas de funcionamiento Tª/Voltaje vs tiempo del VC-TE en cámara refrigerada.

4.4.1.4.- Conclusiones

El sistema termoeléctrico es capaz de generar la potencia eléctrica necesaria para el arranque de ventiladores de forma gradual, con una diferencia de temperatura adecuada según la caracterización realizada en las pruebas de agua-agua y la prueba aire-agua. La ventilación puede mantenerse durante todo el ciclo de calentamiento.

Es importante que el flujo de aire se establezca a partir del momento en el que se provoca una diferencia de temperatura, para que este flujo de aire incremente a su vez la diferencia de temperatura, tal y como se ha apreciado en la prueba funcional realizada con los ventiladores axiales.

Se observa que el medio de test empleado tiene una limitación severa en lo referente a potencia de calentamiento. La potencia de calentamiento aplicada al Fan-Coil es de 2 kW, esto hace que el circuito de calentamiento se caliente lentamente, a un ritmo similar al del circuito frío. Aplicando agua a una temperatura constante, es posible incluso mejorar el rendimiento de los módulos TE y, por lo tanto, la ventilación.

4.4.2.- Caracterización del VC-TE.

Sobre la base de los ensayos agua-agua en exterior, se ha realizado en primer lugar un ensayo con carga adaptada, de larga duración, obteniendo los valores de temperatura que se muestran en la Fig. 236.

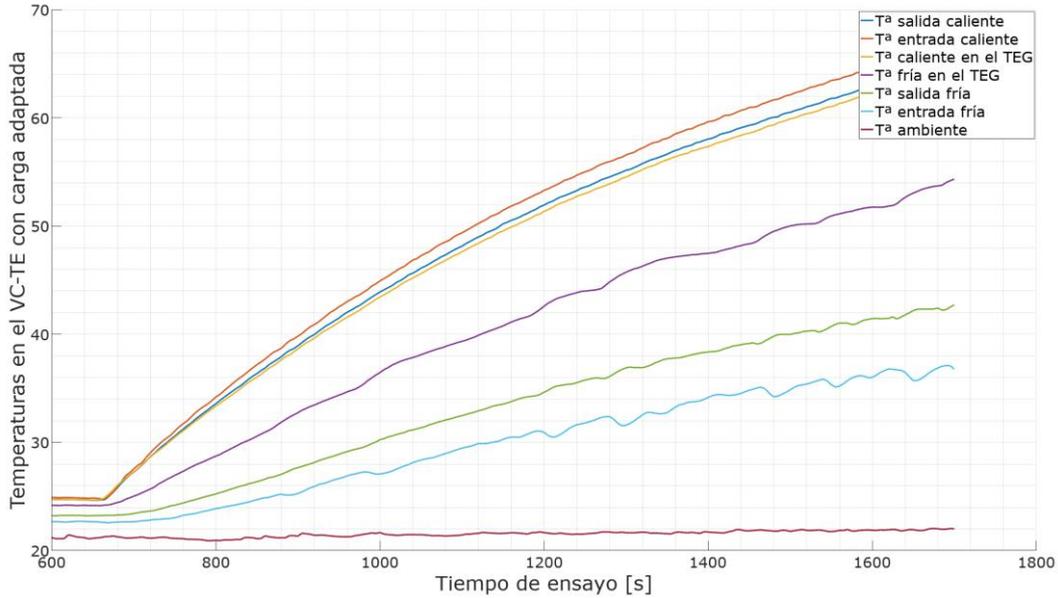


Fig. 236. Temperaturas [°C] en el sistema termoelectrico del VC-TE durante su operativa.

Se observa que en el instante inicial las temperaturas del circuito primario, de calentamiento, y del secundario, de refrigeración, rondan los 25 °C, lo que difiere ligeramente de los 22 °C de la temperatura ambiente. Esto se debe a que los ensayos previos están afectando a la temperatura de partida del agua, al no dejar un tiempo mayor entre ensayos que permita la homogeneización de la temperatura con el ambiente.

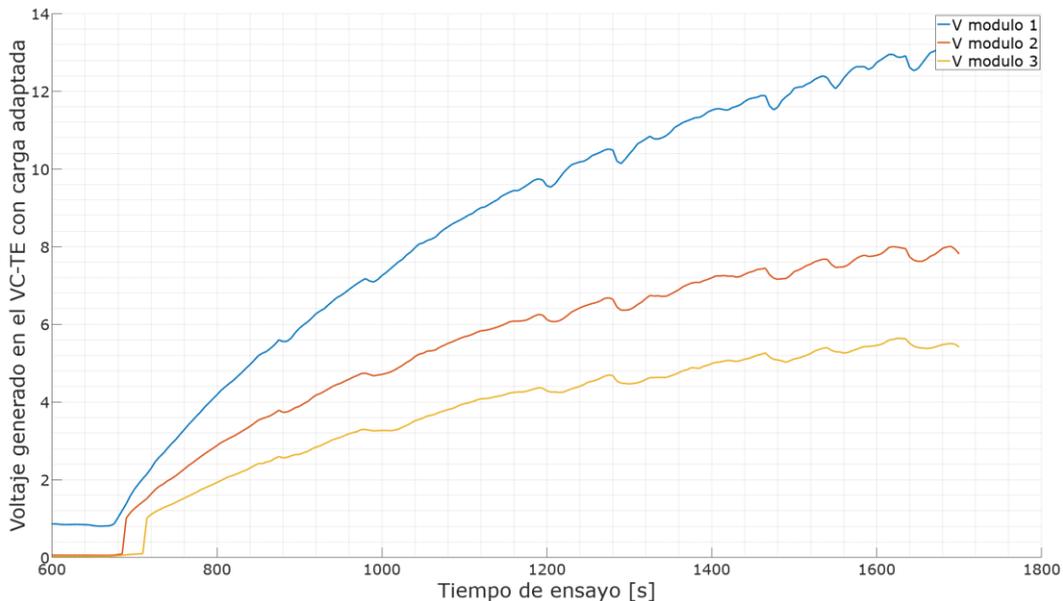


Fig. 237. Voltajes [V] de los bloques del sistema termoelectrico del VC-TE durante su operativa.

Tras activar la resistencia de calentamiento a máxima potencia, se alcanza el estado estacionario con 76 °C en la entrada del agua caliente. Para la aplicación del modelo se utilizan únicamente

los datos hasta alcanzar 70 °C, ya que es una temperatura suficientemente alta para validar el modelo y en este tramo la señal de lectura está lo bastante limpia y no requiere de postprocesado. El comportamiento de todas las señales de temperatura se corresponde con un proceso lógico de calentamiento sin incidencias significativas.

Por el lado de la generación de tensión, se observa en las curvas de la Fig. 237 que el deterioro de los materiales durante los diferentes ensayos ha hecho mella en su comportamiento, alcanzando cada módulo tensiones muy diferentes, tal como se observó en el capítulo 3.

Hay que tener en cuenta que, en esta ocasión, la temperatura del circuito de refrigeración es superior a la temperatura ambiente, por lo que el disipador de agua frío no capta calor del exterior, sino que lo cede. La única aportación térmica al disipador frío es la procedente del disipador caliente, por ello el calor de salida debe ser inferior al de entrada, como bien se puede observar en la Fig. 238. Siendo las pérdidas del sistema la diferencia entre ambos calores menos la potencia eléctrica generada.

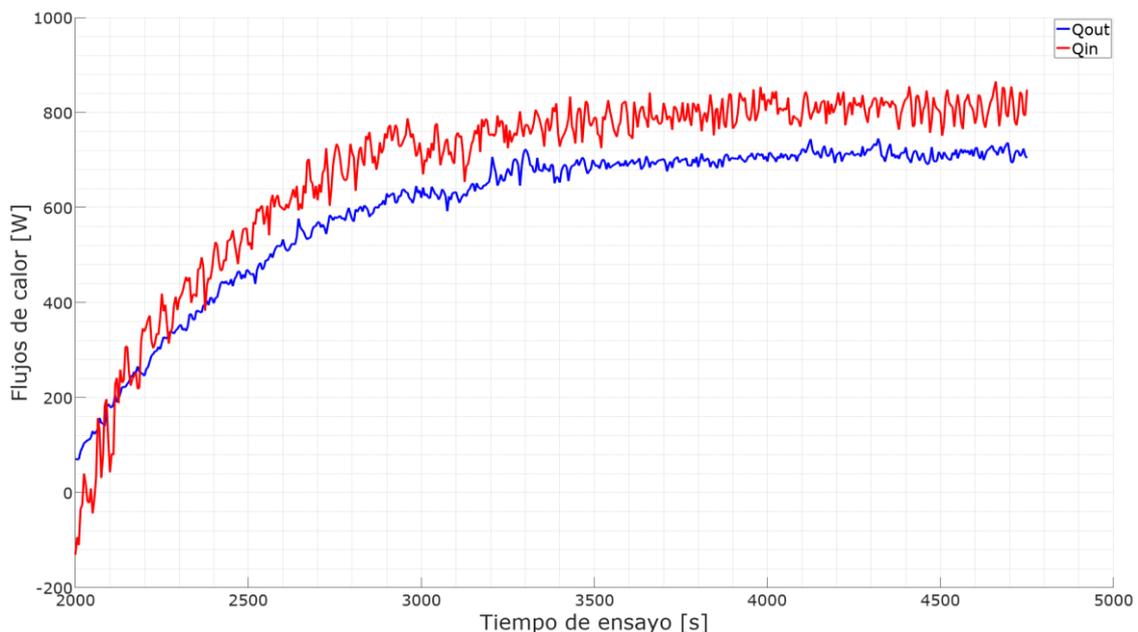


Fig. 238. Flujos térmicos $Q_{IN}(t)$ y $Q_{OUT}(t)$ en el VC-TE.

4.4.2.1.- Potencia eléctrica generada

Se muestra la potencia eléctrica generada con el mismo formato que se presentó en el capítulo 3: dependiente del tiempo (Fig. 239), de la temperatura media en el TEG (Fig. 240) y de la diferencia de temperatura en el TEG (Fig. 241).

Se alcanza una potencia eléctrica generada máxima de 6 W a lo largo de un ensayo de unos 1000 segundos, y con una temperatura media en el TEG que oscila entre los 25 °C iniciales y los casi 60 °C finales.

Durante todo el ensayo, la máxima diferencia de temperatura que se alcanza es de unos 11 °C, muy inferior a los 35 °C que permitiera alcanzar mayores potencias en el capítulo anterior. El principal responsable de esta reducción es la capacidad de evacuación del circuito cerrado de refrigeración, que, al no poder evacuar tanto calor, se eleva en temperatura, alcanzando cerca de 40 °C en su punto más caliente frente a los 15 °C del capítulo anterior.

Se observa que la curva descrita es de carácter exponencial, en concordancia con lo que cabía esperar a nivel teórico.

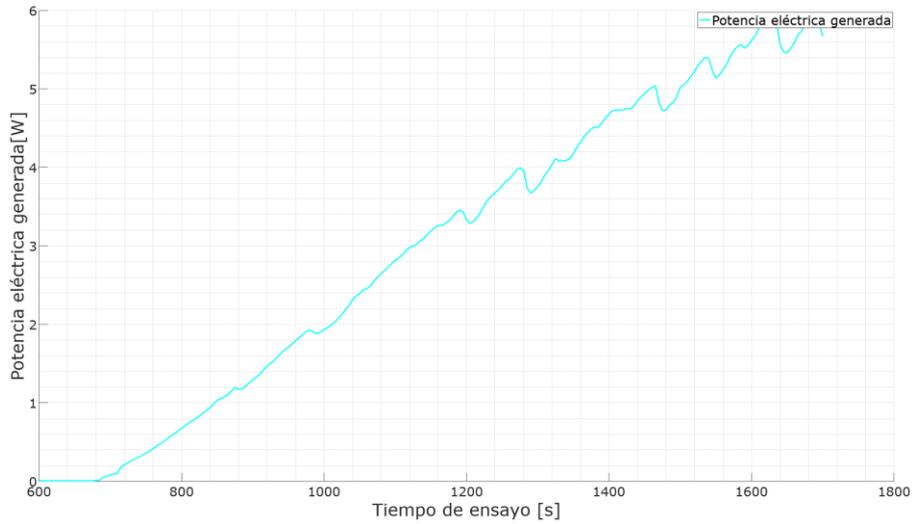


Fig. 239. Evolución de la potencia eléctrica generada en función del tiempo para el VC-TE.

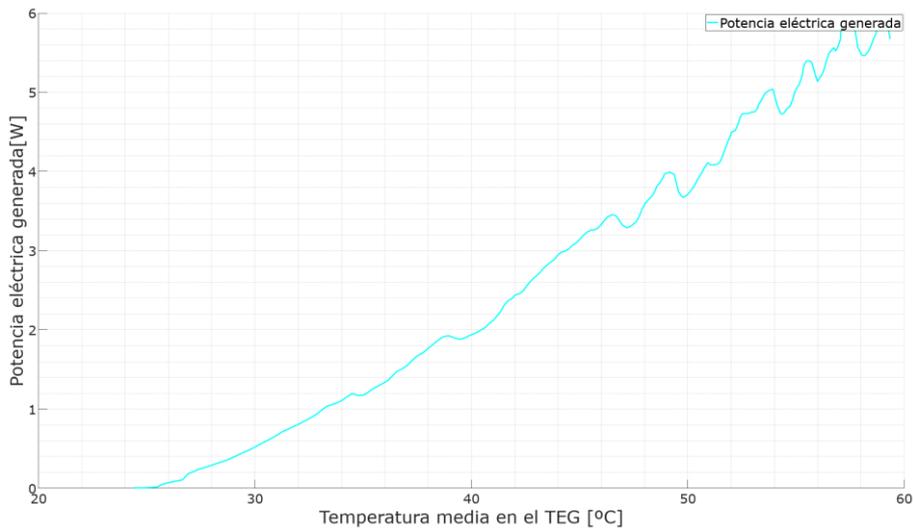


Fig. 240. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la temperatura media en el TEG para el VC-TE.

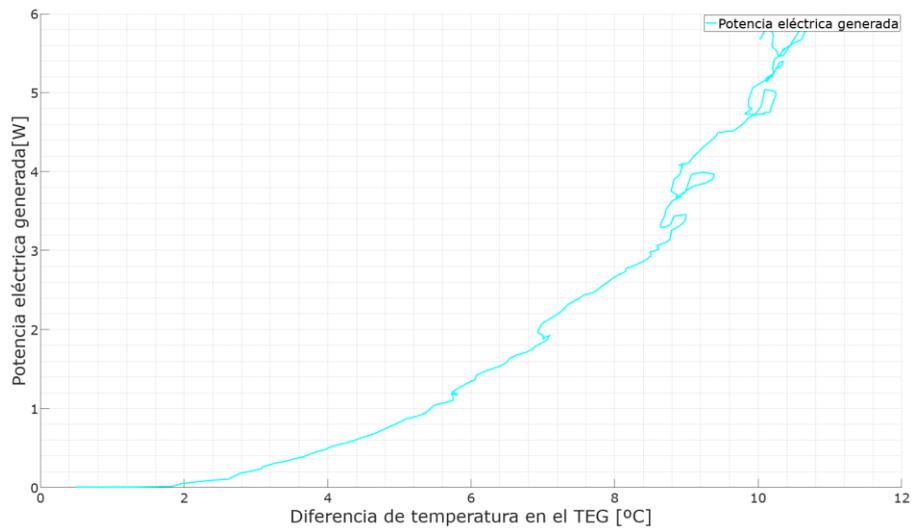


Fig. 241. Evolución de la potencia eléctrica generada en función de la diferencia de temperatura en el TEG para el VC-TE.

4.4.2.2.- Eficiencia de generación termoeléctrica.

La eficiencia obtenida se muestra repitiendo el formato anterior en las Fig. 242, Fig. 243 y Fig. 244.

Se alcanza una eficiencia máxima que ronda el 0,8 % en el punto de máxima diferencia de temperatura y como era de esperar, a mayor diferencia de temperatura, mayor eficiencia.

Aunque a priori la curva que describe la eficiencia es lineal, se trata solo de una visión sesgada de una curva logarítmica, que, por fijarnos en un tramo muy corto da la impresión de tratarse de una recta. Esto sería del todo incoherente, ya que implicaría que en algún punto se superaría la eficacia de Carnot.

Por otro lado, durante los ensayos analizados en el capítulo 3, se alcanzaron eficiencias que rodaron el 2 %, lo que está en coherencia con la mayor diferencia de temperatura disponible en dichos ensayos.

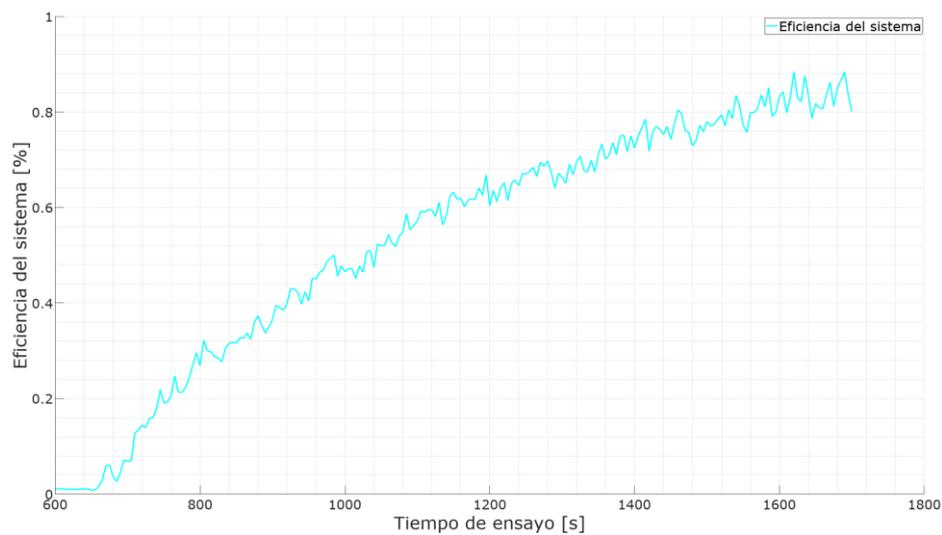


Fig. 242. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función del tiempo para el VC-TE.

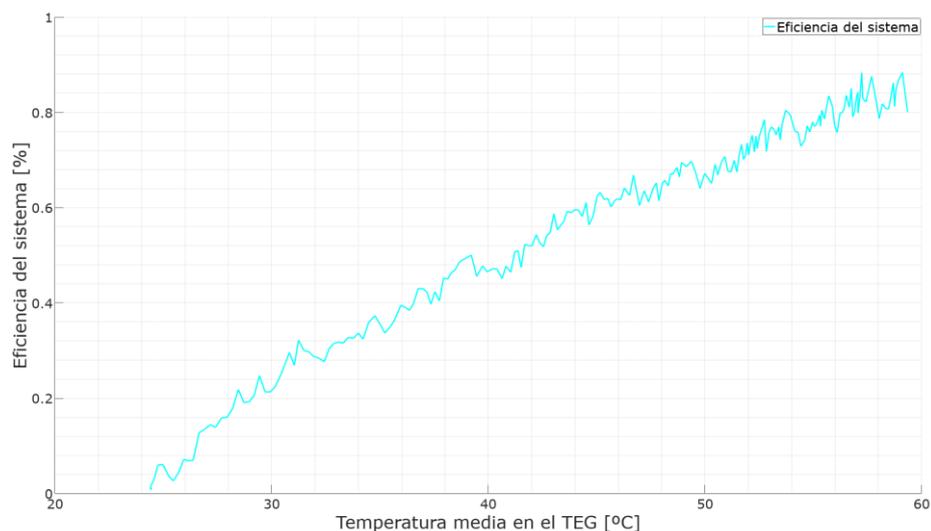


Fig. 243. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la temperatura media en el TEG para el VC-TE.

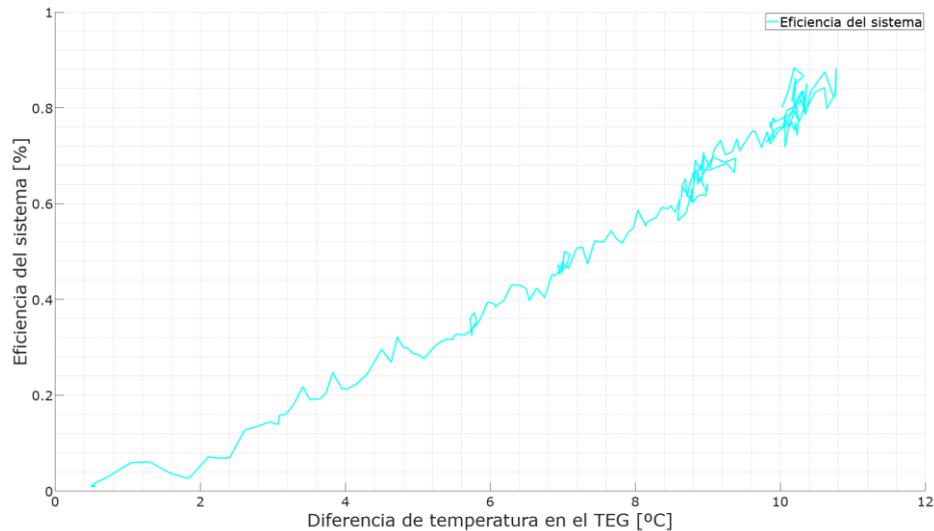


Fig. 244. Evolución de la eficiencia de generación eléctrica en función de la diferencia de temperatura en el TEG para el VC-TE.

4.4.3.- Validación del modelo simplificado.

Para validar el modelo, se calcula la correlación entre la señal real, tanto de potencia como de eficiencia, y la señal del modelo, considerando un error entre ambas que determina lo óptimo que es el modelo en la predicción de la señal real.

Como señal real se utiliza un ajuste polinómico de orden 3 de la curva real y para el cálculo de la señal del modelo se utilizan los parámetros calculados durante la caracterización del modelo en el capítulo 3, junto con algunas medidas no intrusivas como la temperatura del agua fría y caliente, y la tensión generada por el TEG.

- Número de pares termoeléctricos del sistema termoeléctrico. n
- Parámetros termoeléctricos del nuevo material.
 - Coeficiente Seebeck. α
 - Conductancia térmica. K_{TEG}
 - Resistencia eléctrica. R
- Parámetros de los disipadores de agua
 - Áreas de plato frío y caliente. A_{PF}, A_{PC}
 - Coeficientes de transferencia térmica de convección.
 - Plato caliente. h_{PC}
 - Plato frío. h_{PF}
- Medidas no intrusivas
 - Temperatura en el agua caliente. T_{PC}
 - Temperatura en el agua fría. T_{PF}
 - Tensión generada por el TEG para el cálculo de la corriente. I

4.4.3.1.- Respuesta en potencia y eficiencia.

En la Fig. 245 se representan las curvas mencionadas para el caso de la potencia eléctrica generada. Se puede observar una gran similitud entre la estimación del modelo simplificado y la real calculada, mientras que los modelos analíticos ideal y no ideal difieren considerablemente. Hay que tener en consideración, como ya se comentó en el capítulo anterior, que estos modelos

están considerando diferentes parámetros termoeléctricos, por lo que sus valores absolutos no son comparables, pero sí la forma y el orden de magnitud de la curva.

En cambio, el modelo simplificado y el valor real sí son directamente comparables. Se observa que ambas curvas tienen carácter exponencial creciente y sus valores coinciden de manera significativa, sobre todo en las temperaturas más altas. Este efecto pone de manifiesto una ligera diferencia, justificada por la tendencia de la curva, entre las temperaturas más bajas y las más altas. Este efecto probablemente se deba a un mayor ajuste térmico debido al incremento de presión en los módulos termoeléctricos, provocado por la dilatación térmica de los materiales.

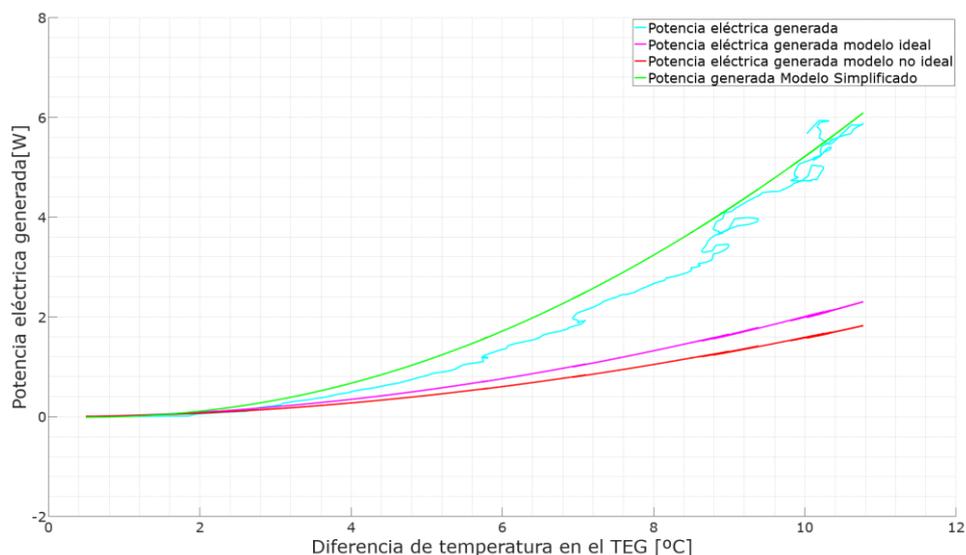


Fig. 245. Curvas de potencia eléctrica generada frente a la diferencia de temperatura en el TEG, para la potencia real calculada, el modelo ideal, el modelo ideal y el simplificado.

Lo mismo podría comentarse de la curva de eficiencia que se muestra en la Fig. 246. Se constata que las gráficas de eficiencia de los modelos simplificado, ideal y no ideal describen la misma forma de curva, de carácter logarítmico. La curva de eficiencia real presenta un carácter más lineal, debido, como se ha comentado, al distanciamiento a baja temperatura.

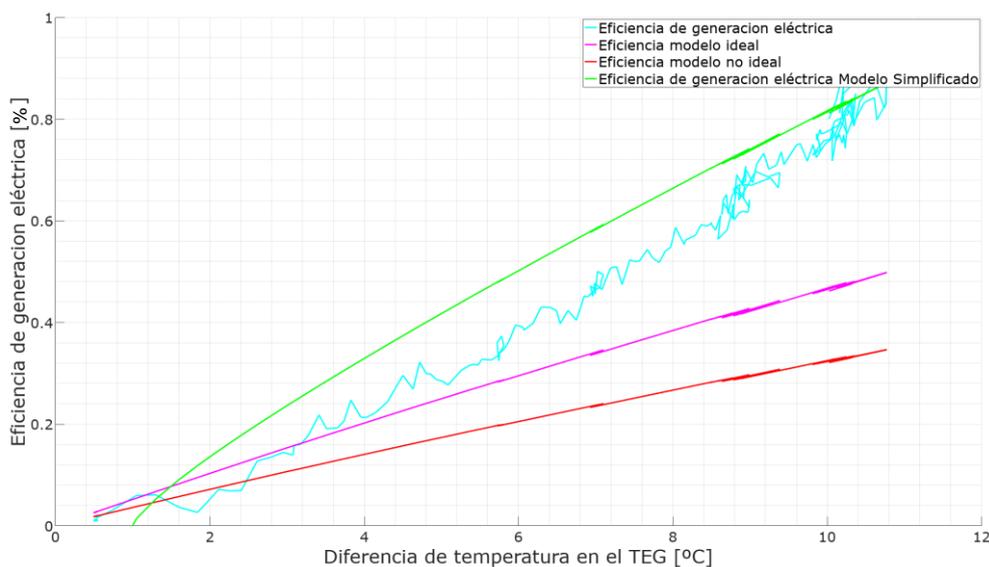


Fig. 246. Curvas de eficiencia de generación eléctrica frente a la diferencia de temperatura en el TEG, para la eficiencia real calculada, el modelo ideal, el no ideal y el simplificado.



En general, podría resumirse diciendo que el modelo representa el comportamiento real del VC-TE, con mayor precisión en las temperaturas altas que en las bajas, pero en ambos casos acertadamente.

4.4.3.2.- Cálculo del error cometido.

Tal como se explicó en el capítulo anterior, se calcula el coeficiente de correlación lineal, obteniendo un 0,99121 para el caso de la potencia eléctrica generada y un 0,97230 para la eficiencia de generación eléctrica, lo que viene a arrojar un coeficiente de determinación (R^2) del 98,251 % y 94,536 % respectivamente.

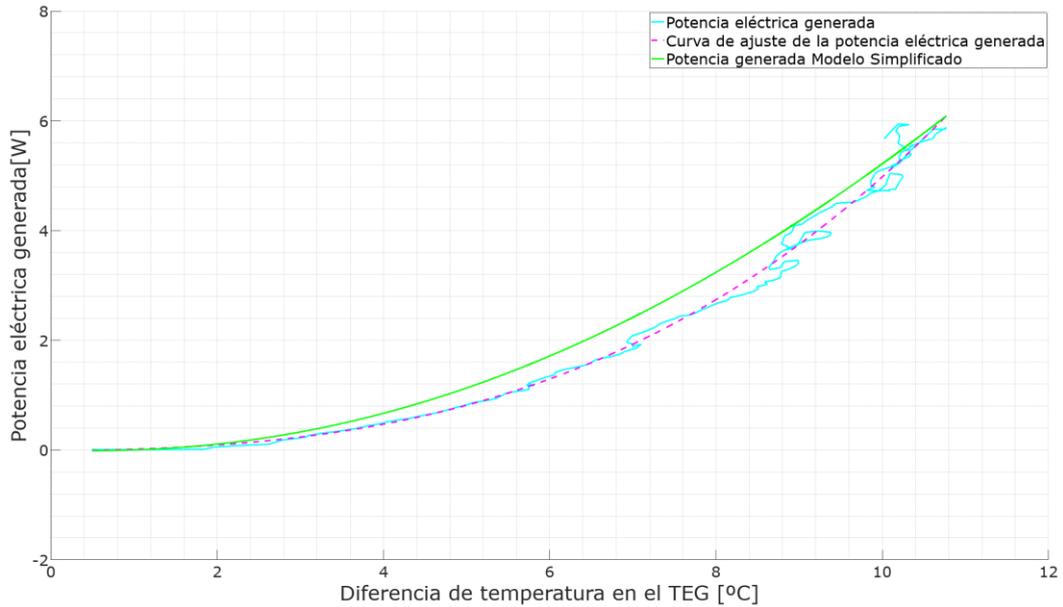


Fig. 247. Curvas del modelo simplificado y del ajuste polinómico de la potencia eléctrica generada real frente a la diferencia de temperatura en el TEG.

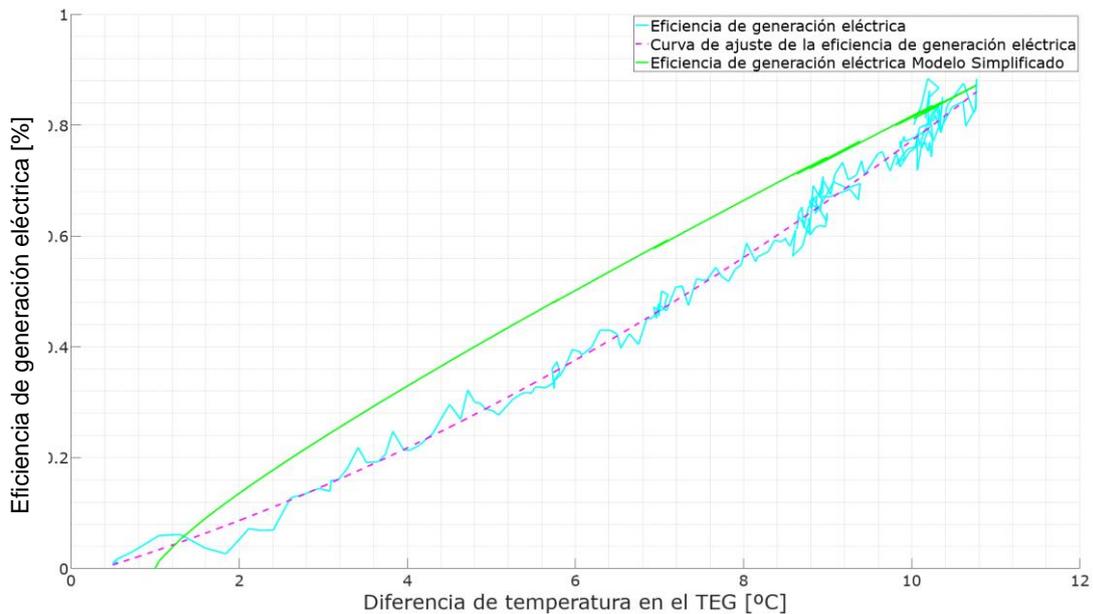


Fig. 248. Curvas del modelo simplificado y del ajuste polinómico de eficiencia de generación eléctrica real frente a la diferencia de temperatura en el TEG.

Se puede considerar que el ajuste es muy bueno, mejor en el caso de la potencia que en el de la eficiencia.

En las Fig. 247 y Fig. 248 se muestran las curvas de ajuste (línea de puntos) de la potencia y eficiencia reales sobre las propias señales (línea azul), y la curva del modelo simplificado (línea verde) contra la que es correlada la curva de ajuste.

4.4.3.3.- Limitaciones del modelo.

Pese a los buenos resultados obtenidos, el modelo creado en este trabajo presenta ciertas limitaciones. Hay que tener en consideración que la validación del modelo simplificado y el cálculo del error cometido se han realizado en condiciones de baja temperatura (inferior a 100 °C) y con baja diferencia de temperatura (inferior a 11 °C). Las mejoras de los parámetros de entrada del modelo, como los coeficientes de transferencia térmica de convección o los parámetros termoeléctricos de otro material, podrían derivar en un incremento de la diferencia de temperatura en el TEG, e incluso otras aplicaciones podrían llevar a trabajar a los materiales a mayores temperaturas. En estas situaciones en modelos no han sido validadas y requerirían nuevas validaciones con los cálculos de los correspondientes errores.

La influencia de la dilatación que ya se ha observado, el deterioro de los materiales, los ciclos de encendido y apagado, y otros aspectos técnicos deberían incluirse para complementar un modelo cercano a la realidad, si bien hay otros aspectos como la variabilidad de las propiedades de los materiales y de los módulos termoeléctricos cuya influencia en la aplicación final debería ser tomada en consideración mediante la aplicación de métodos estadísticos.

4.5.- Evidencia de la mejora de la eficiencia de los ventilosconvectores frente a radiadores convectivos

Tal como se concluyó en el estudio del estado del arte, es necesario determinar cuánto mejora la eficiencia el uso de un ventilosconvector respecto al de un radiador convencional.

El desarrollo de esta tarea, que se ha centrado en el análisis comparativo de los dos sistemas de calefacción equivalentes desde un punto de vista de potencia térmica, mediante simulaciones CFD y ensayos de laboratorio, se ha realizado en colaboración con UPV-EHU.

Para su desarrollo se ha modelizado y acondicionado una habitación en las instalaciones de Centro Stirling, en la que se han instalado la sensórica y los elementos calefactores correspondientes.

4.5.1.- Factores relacionados con la eficiencia de los sistemas de calefacción.

La cuantificación de la eficiencia global de un sistema de calefacción es una tarea compleja. Puede obtenerse la eficiencia de cada uno de los elementos por separado, pero el hecho de que la etapa final (la emisión) esté relacionada con factores subjetivos como el confort térmico, limita en gran medida la definición de una eficiencia del conjunto.

Por lo tanto, para la comparación de la eficiencia se utiliza por lo general un criterio económico, teniendo en cuenta cuál de los dos sistemas es más caro en un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, sabiendo las características climáticas de un edificio concreto, así como las características de su envolvente y sus cargas térmicas, puede determinarse la demanda energética. Conociendo este dato, podría realizarse una rápida evaluación comparando los precios de combustible/kWh y multiplicándolo por la demanda, el rendimiento de los equipos y su tiempo de utilización.



$$\text{Coste}_{\text{sistema}} = \text{Potencia del equipo (kW)} * \text{Horas}_{\text{operación}}(h) * \frac{\text{Coste combustible (€/kWh)}}{\text{Rendimientos}_{\text{equipo}}} \quad (90)$$

Esta ecuación permite determinar cuál de los sistemas resulta más económico, aunque un sistema más económico pueda resultar menos eficiente energéticamente. El problema radica en la cantidad de factores que influyen en el consumo real que puede tener un edificio a lo largo de un año como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Factores que influyen en el consumo real de un edificio.

Clima exterior	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura• Radiación solar• Presión atmosférica
Confort térmico	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura de confort deseada• Estratificación de temperaturas• Velocidades de aire• Corrientes de aire descendentes• Zona donde se desea la temperatura de confort• Tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada
Características de la habitación	<ul style="list-style-type: none">• Tamaño• Ventanas• Aislamiento
Cargas internas	<ul style="list-style-type: none">• Ocupación• Iluminación• Equipos
Termostato	<ul style="list-style-type: none">• Posición<ul style="list-style-type: none">○ Temperatura de consigna○ Tiempo necesario para que la temperatura representativa alcance su posición• Velocidad de respuesta• Utilización del usuario<ul style="list-style-type: none">○ Programación horaria○ Consigna manual
Tipo de radiador	<ul style="list-style-type: none">• Fan-Coil<ul style="list-style-type: none">○ Requiere bomba de calor, si realiza climatización.○ Sistemas caros○ Más rápidos○ Peor confort térmico, por corrientes de aire• Radiador convencional<ul style="list-style-type: none">○ Distribución de calor no uniforme○ Habitualmente funcionando con calderas, no es sostenible○ Económico y simple• Suelo radiante<ul style="list-style-type: none">○ Instalación costosa y aparatosa○ Muy buena distribución de temperaturas○ Baja temperatura de operación, eficiente○ Lenta velocidad de respuesta

Temperatura de operación del radiador

- Baja temperatura
 - Más eficiente
 - Mayor tiempo de calentamiento
- Alta temperatura
 - Más empleado, menor tiempo de calentamiento
 - Mayores pérdidas

Establecer una eficiencia global de un sistema es complicado a la vista de la cantidad de factores que afectan a este término.

Ambos sistemas bajo estudio utilizan el mismo fluido caloportador, y tienen el mismo coste de combustible, por lo que se utilizará el valor de consumo final como parámetro más relevante de cara a establecer una comparativa.

4.5.2.- Modelado 3D y simulación.

La modelización, desarrollada por parte de UPV-EHU, se ha desarrollado en Fluent y ha tenido en cuenta la geometría de la cámara de un radiador y de un Fan-Coil. No se entra a valorar las características de la simulación por no ser objeto de esta tesis, pero si se muestran unos breves apuntes para facilitar la comprensión de los siguientes apartados.

4.5.2.1.- Cámara.

Carece de elementos complejos por lo que se ha representado sin realizar apenas simplificaciones, modelando el grosor de las paredes y considerando la temperatura exterior del laboratorio en el momento de los ensayos. La parte interior del equipo refrigerador y la apertura que hay a la entrada evitan que la sala pueda considerarse simétrica. Además, la instalación del radiador se realizó de manera que no quedó completamente centrado.

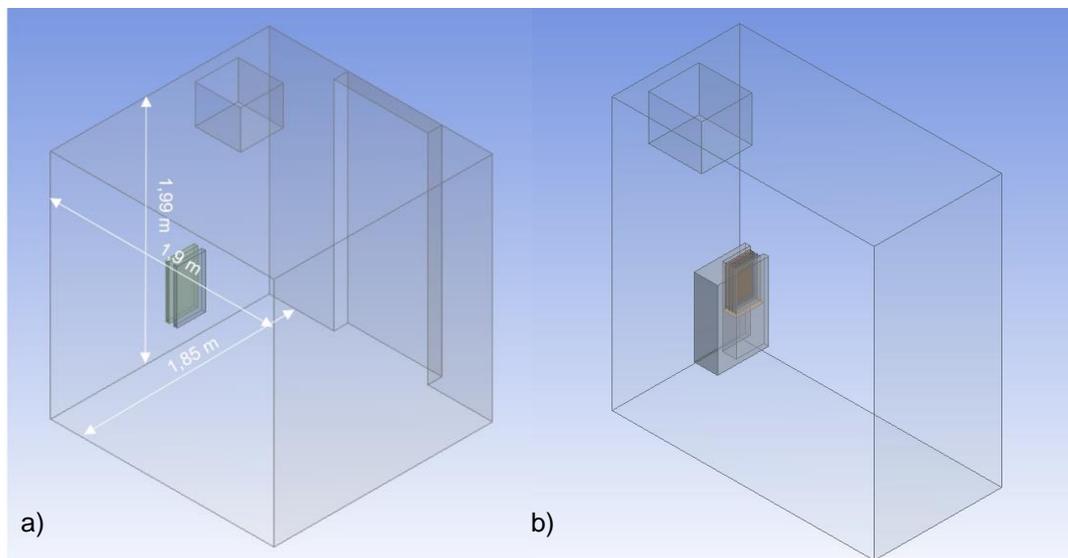


Fig. 249. a) Dimensiones interiores de la cámara de ensayos con radiador desplazado y b) cámara con simetría y Fan-Coil.

Cabe destacar que al contrario que en la simulación de radiador de convección natural, en el caso del Fan-Coil se opta por tratar de hacer la cámara simétrica, para conseguir unos resultados válidos sin problemas de exceso de celdas.

4.5.2.2.- Radiador.

Su modelado no se ha hecho con precisión por la complicada geometría del mismo requeriría un alto coste computacional. La potencia térmica del radiador utilizada en la simulación es igual a la calculada en el radiador disponible: 401,1 W y se ha considerado convección natural

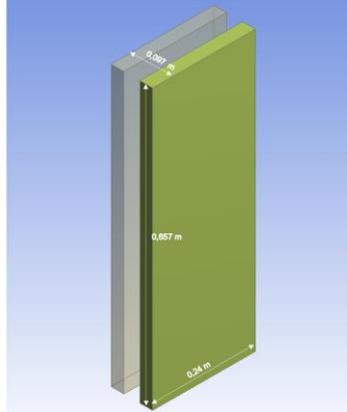


Fig. 250. Modelo del radiador de alta temperatura

4.5.2.3.- FanCoil.

Para las simulaciones, se empleará un modelo geométrico de Fan-Coil simplificado, con un área de impulsión $0,0408 \text{ m}^2$. El movimiento del aire provocado por los ventiladores se reproduce mediante la imposición de una condición de *Fan* en la superficie inferior del volumen, que induce una caída de presión y en el volumen previo a la salida de aire se colocan una serie de placas finas, de $0,04 \text{ m}^2$ de superficie, que harán las veces de intercambiador, por simplificar el modelo.

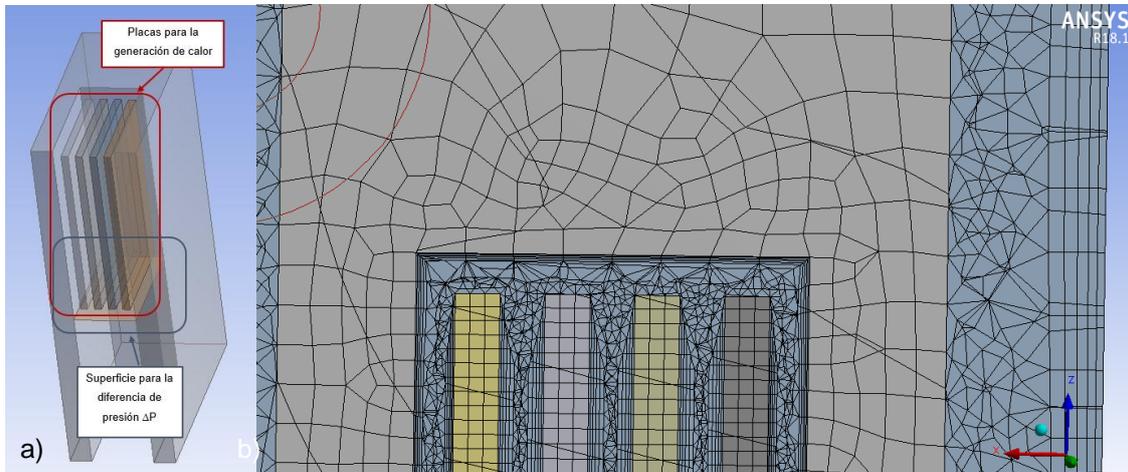


Fig. 251. a) Geometría del modelo empleado en las simulaciones y b) detalle de la malla en la zona de las placas, en las que se aprecia la inflación aplicada.

Con el objetivo de economizar recursos computacionales, se aplica una condición de simetría por el carácter simétrico del problema.

No se dispone de hoja de características técnicas, por lo que el modelado en la simulación se basa en medidas de velocidad y temperatura capturadas en la batería del Fan-Coil. Una vez conocidos los valores de velocidad del aire a la salida de la unidad, se ajusta el valor de caída de presión en la condición *Fan* para que la simulación se corresponda con el ensayo real. Se colocará un termopar en la batería del Fan-Coil para ver cuál es el valor de generación volumétrica que debe fijarse, haciendo que el tiempo de calentamiento de ensayo y simulación se correspondan.

4.5.3.- Procedimiento de ensayo.

Se han realizado ensayos experimentales con capturas de temperatura en puntos específicos de la cámara frigorífica para cada uno de los sistemas de calefacción, para comparar los resultados con los ensayos experimentales.

Se monitorizarán las temperaturas en distintos puntos de la cámara para caracterizarla correctamente en la simulación. En la Fig. 252 se aprecia la ubicación de los termopares, cuyos datos se registrarán cada segundo.

Se han establecido los siguientes criterios de cara los ensayos y su posterior análisis:

- Se considera como temperatura operativa de confort 21 °C.
- Se considera el parámetro de confort de invierno de cara al confort térmico
 - Análisis de la máxima diferencia de temperatura en el gradiente vertical.
 - Temperatura del suelo.

Los termopares A2 (Confort 1), A0 (Confort 2) y A3 (Confort 3) conformarán un perfil vertical que permite observar la estratificación de temperatura y evaluar si el criterio de máxima diferencia vertical de temperatura se cumple. El termopar A1 está colocado en la misma posición que el termostato, a 1,3 m del suelo, para conocer la temperatura que está midiendo el termostato y comprender el funcionamiento de su sistema de control. Finalmente, el termopar A4 está colocado en el radiador, para observar qué temperatura superficial alcanza.



Fig. 252. Distribución de los termopares colocados en el interior de la cámara.

El procedimiento para los ensayos será el siguiente:

1. Conexión del dispositivo de adquisición de datos al PC, y preparación del ensayo en SignalExpress.
2. Enfriamiento de la cámara mediante el equipo de refrigeración, monitorizando las temperaturas hasta alcanzar 15 °C con la cámara vacía.
3. Asignación de la consigna de 21 °C en el termostato de la caldera.
4. Ajuste de la temperatura interior mientras el radiador alcanza su temperatura superficial de operación (60 - 65 °C), manteniéndolo a 15 °C hasta que el radiador esté caliente.

El caso a comparar será aquel en el que la temperatura superficial ya ha alcanzado su valor de operación y la ambiente está a 15 °C. De esta forma la transferencia de calor es mayor y pueden obtenerse conclusiones más rápidamente. Se toma un intervalo de 5 minutos (300 s) para la comparativa entre simulación y ensayos.



4.5.4.- Comparativa de simulación vs ensayo.

4.5.4.1.- Radiador.

A continuación, se muestra los resultados de los ensayos y las simulaciones en los diferentes puntos de confort.

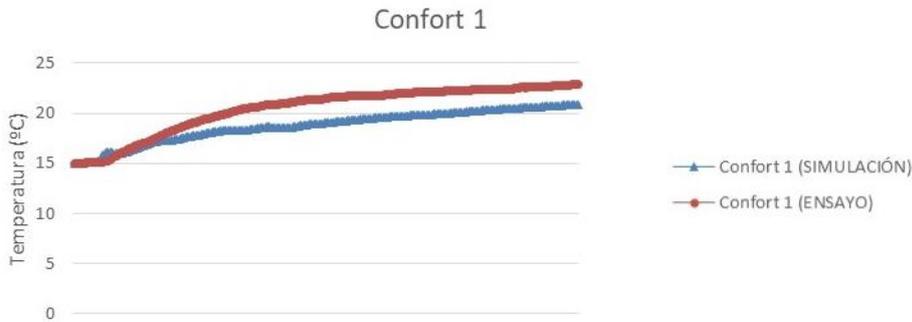


Fig. 253. Evolución de temperaturas para el punto *Confort 1*



Fig. 254. Evolución de temperaturas para el punto *Confort 2*

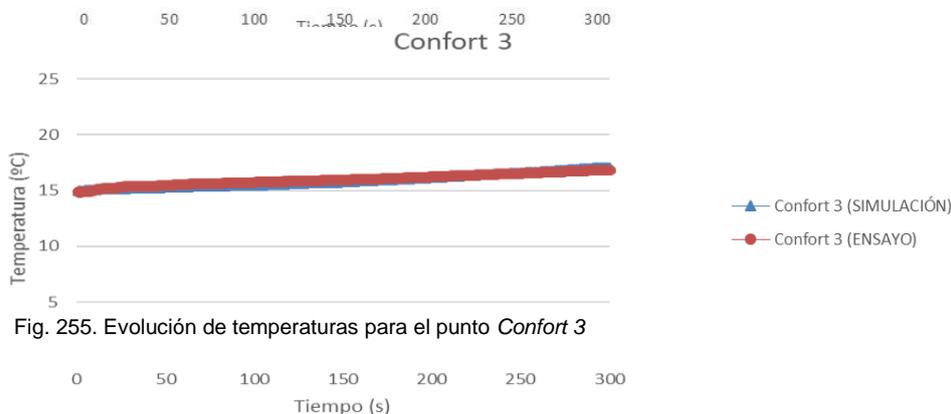


Fig. 255. Evolución de temperaturas para el punto *Confort 3*

Como se puede observar, la correspondencia entre los ensayos y las simulaciones es buena. La mayor diferencia se produce en el punto de mayor altura (*Confort 1*), probablemente debido a las simplificaciones de los modelos empleados en la simulación. La diferencia va disminuyendo al acercarse al suelo.

Para poder cuantificar el error cometido entre ensayos y simulaciones de forma numérica se empleará el método NRMSD (Normalized Root Mean Square Deviation), que normaliza el valor de la desviación estándar entre los valores medidos y calculados con respecto al rango (distancia del máximo al mínimo) de datos a analizar.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_1 - y_2)^2}{n}} \quad (91)$$

$$NRMSD = \frac{RMSD}{y_{max} - y_{min}} \quad (92)$$

Tabla 41. Índices RMSD obtenidos en la validación del modelo del radiador

Punto de medida	RMSD	NRMSD
Confort 1	1,88	0,24
Confort 2	0,87	0,16
Confort 3	0,16	0,07

El mayor valor de NRMSD se da obviamente en el punto *Confort 1*.

En la Fig. 256 puede observarse el tipo de calentamiento que provoca el radiador. El aire caliente asciende desde el radiador y va acercándose a la pared, para después hacer lo mismo con el techo. De esta forma van creándose capas de temperatura que van descendiendo con cierta homogeneidad. También se observa como en los instantes iniciales el aire de la habitación se calienta por radiación, ya que como puede observarse en $t = 100$ s y $t = 150$ s, el suelo se calienta antes de que llegue la capa de aire.

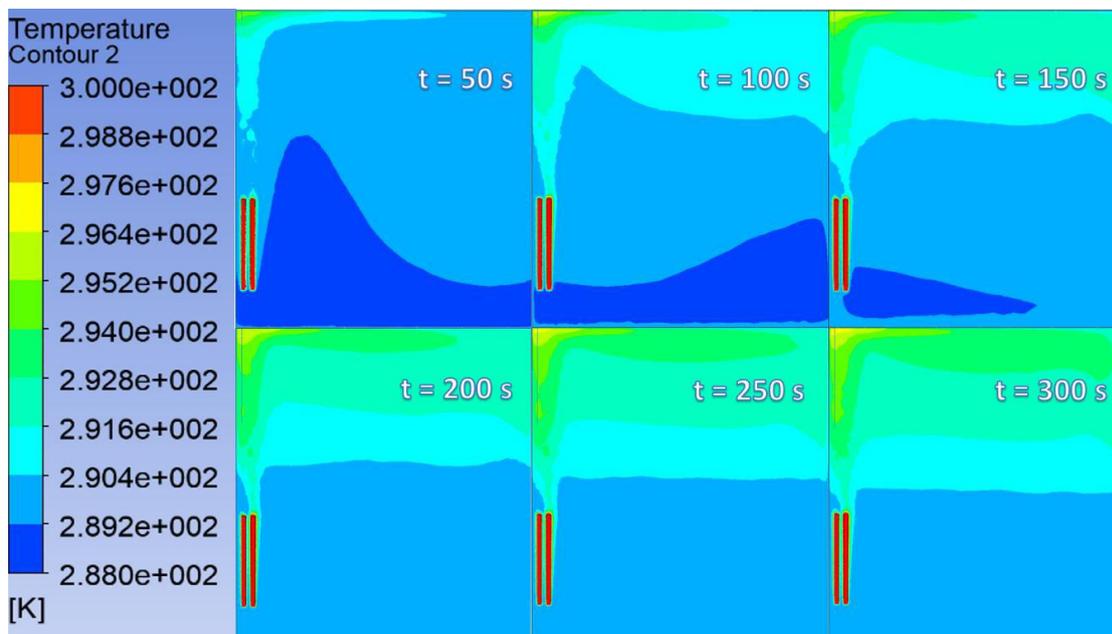


Fig. 256. Evolución de la temperatura interior de la habitación para el radiador.

4.5.4.2.- Fan-Coil.

Los ensayos para el caso de los Fan-Coils se realizarán de forma análoga a los del radiador, con una caldera alimentando el dispositivo, a la misma potencia. Se monitorizará la temperatura superficial de la batería, además de los puntos de control del confort establecidos en las pruebas anteriores. La velocidad de salida de aire de 1,57 m/s – 1,58 m/s.

En este caso se empleará un funcionamiento desde 15 °C, tanto en la batería como en la cámara y con el ventilador encendido. Los resultados de la validación se muestran a continuación.

Al igual que sucede con el radiador, a mayor altura mayores son las diferencias entre la simulación y los ensayos. Aun así, los resultados se consideran suficientemente buenos para dar el modelo por validado, según los índices NRMSD calculados que se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Índices RMSD obtenidos de la validación del modelo de Fan-Coil con el ensayo.

Punto de medida	RMSD	NRMSD
Confort 1	3,27	0,11
Confort 2	2,86	0,18
Confort 3	0,79	0,03

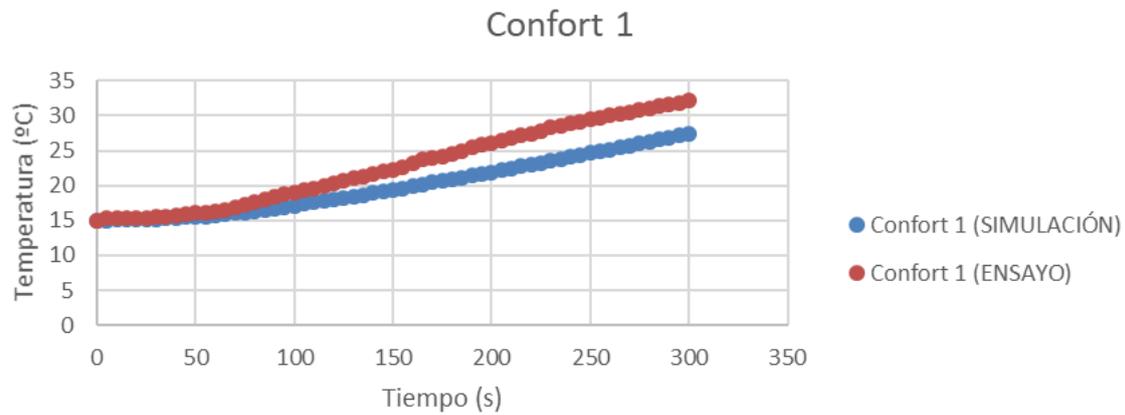


Fig. 257. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto *Confort 1*.

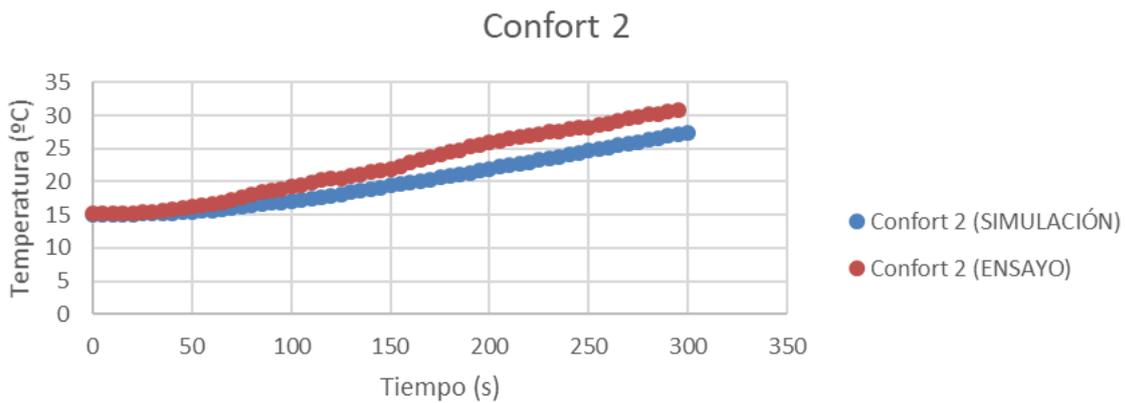


Fig. 258. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto *Confort 2*.

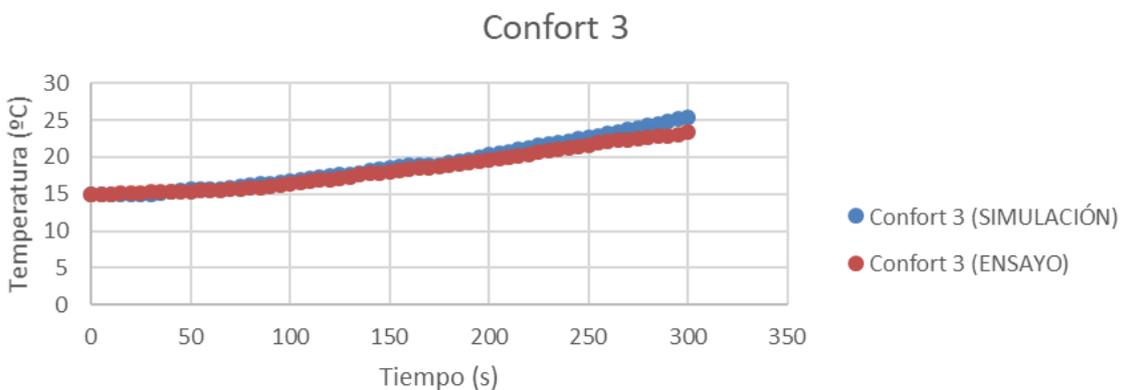


Fig. 259. Evolución de temperaturas con Fan-Coil para el punto *Confort 3*.

En cuanto a la forma de calentar del Fan-Coil, se observa mayor rapidez en la entrega de calor, tal como se puede apreciar en la Fig. 260.

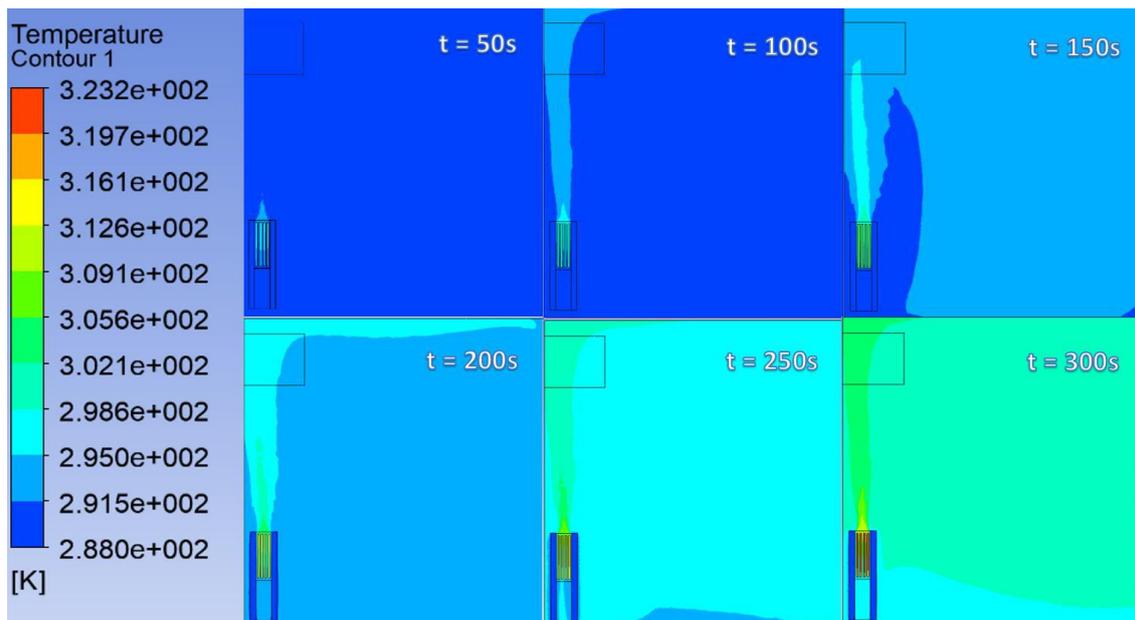


Fig. 260. Evolución de la temperatura interior de la habitación para el Fan-Coil.

4.5.5.- Metodología de cálculo de los consumos.

Para lograr identificar la mejora de eficiencia entre los dos sistemas, se emplearán las curvas de temperatura del emisor de calor (radiador o batería en el Fan-Coil), en las que se pueden apreciar los tramos en los que la caldera está operativa y en los que está apagada. Se realizarán simulaciones de una operación normal de los dispositivos para las temperaturas exteriores de -5 °C, 5 °C y 15 °C, consiguiendo así obtener la duración de cada uno de los ciclos de apagado y encendido de la calefacción según las condiciones exteriores. Entre las condiciones exteriores se encuentra también la convección exterior, calculada mediante un método para cerramientos [132]. La regulación se realiza de forma manual, interrumpiendo la simulación para introducir los cambios pertinentes. Se emplea una temperatura de confort de 21 °C, según las recomendaciones de confort térmico y eficiencia energética del IDAE.

Se realizan 3 simulaciones siguiendo la estrategia de control comentada.

Una vez realizados 5 ciclos de “estacionario”, se extrae la evolución de temperaturas de la superficie del radiador, para observar las tendencias de duración de cada ciclo, así como las de proporción de cada etapa dentro del mismo. A continuación, se muestra el resultado de la simulación con 5 °C de temperatura exterior, en el que se pueden apreciar las diferentes fases del calentamiento y la regulación.

Los ciclos se componen de las siguientes etapas para el radiador:

- **Transitorio:** hasta que la temperatura de la habitación alcanza la de consigna del termostato.
 1. **Calentamiento inicial (Caldera ON):** Es el primer calentamiento, que dura hasta que la temperatura superficial del radiador es la de trabajo, unos 60 °C en este caso.
 2. **Temperatura constante hasta alcanzar la consigna del termostato (Caldera ON/OFF):** Una vez alcanzada la temperatura de trabajo, el radiador la mantendrá mediante modulación ondulante, apagándose y encendiéndose periódicamente hasta que la temperatura de consigna alcance el valor del termostato.
- Ciclos del “estacionario”.

3. **Caída de temperatura (Caldera OFF):** Cuando la temperatura de consigna es alcanzada, el termostato ordena a la caldera detener su funcionamiento hasta superar el valor de su histéresis ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en este caso).
4. **Calentamiento (Caldera ON):** Al superarse el valor de histéresis, la caldera vuelve a ponerse en marcha para alcanzar de nuevo la temperatura operativa.
5. **Temperatura constante (Caldera ON/OFF):** Se mantiene de nuevo la temperatura constante hasta alcanzar la temperatura de consigna.

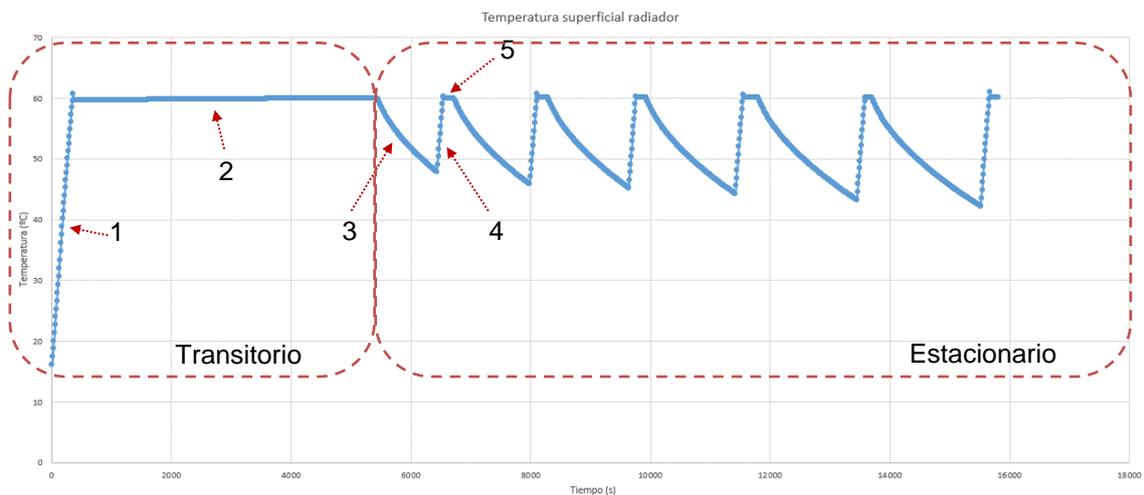


Fig. 261. Perfil de temperatura superficial del radiador ($T_{\text{ext}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La duración del intervalo de tiempo que comprende cada ciclo del estacionario no es constante, aumenta con cada repetición del ciclo, ya que a medida que se va entregando calor a la cámara el tiempo que el radiador permanecerá apagado aumenta. Como se ha comentado, una vez comenzada la fase de los ciclos existen tres subetapas en el mismo: etapa de caída, etapa de subida y etapa de temperatura constante. Sin embargo, estas subetapas no tienen la misma duración a lo largo de todo el proceso de calentamiento, sino que su proporción dentro de la duración del intervalo va variando. En la Fig. 262 se aprecia cómo a medida que van pasando los ciclos, la duración de la etapa de temperatura constante disminuye, mientras que la de la etapa de caída aumenta su duración cada vez. También puede apreciarse cómo la duración del intervalo de cada ciclo completo va aumentando.

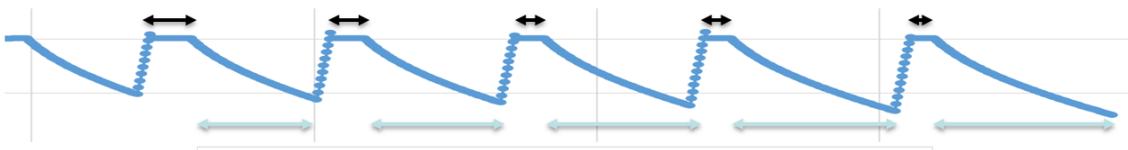


Fig. 262. Variación de la duración de las subetapas

Puede obtenerse una ecuación que describa el comportamiento de cada subetapa del estacionario en función del ciclo en el que se encuentra el calentamiento:

- Duración de cada ciclo completo.
- Porcentaje de la etapa de caída de temperatura dentro del ciclo.
- Porcentaje de la etapa de subida de temperatura dentro del ciclo.

El porcentaje de la etapa de temperatura constante se obtendrá de restar al 100% del intervalo las proporciones de caída y subida. En la Tabla 43 se aprecian las duraciones y las proporciones de las etapas, así como la duración del ciclo completo.

Tabla 43. Tendencias de los ciclos de calentamiento y enfriamiento en segundos.

nº Ciclo	Duración ciclo completo	Duración caída	Duración subida	Duración cte	suma	% Caída	% Subida	% cte	suma
1	1280	980	100	200	1280	77%	7,81%	16%	100%
2	1570	1270	120	180	1570	81%	7,64%	11%	100%
3	1640	1350	120	170	1640	82%	7,32%	10%	100%
4	1850	1470	130	160	1780	83%	7%	10%	100%
5	1920	1630	140	150	1920	85%	7,29%	8%	100%
6	2080	1790	150	140	2080	86%	7,21%	7%	100%

En la Fig. 263, Fig. 264 y Fig. 265 se muestra la tendencia en la duración de las subetapas de los ciclos de calentamiento, así como la ecuación que describe la línea de tendencia que permite extrapolar la duración de los mismos a un número de ciclos mucho mayor. Si bien, parece que la tendencia que describe una curva es de carácter logarítmico, se disponen de muy pocos ensayos para asegurarlo con rotundidad, por lo que esta aproximación puede considerarse una posible fuente de errores en los resultados que será necesario subsanar en el futuro con ensayos de más duración. Tampoco se han identificado referencias en artículos que aborden esta temática para confirmar la tendencia de la curva.

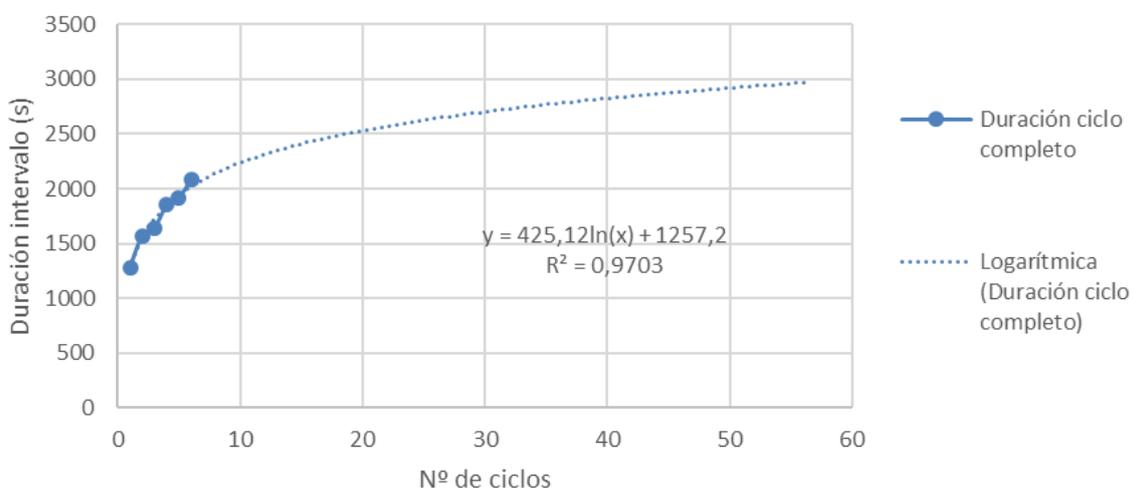


Fig. 263. Gráfica y ecuación de la tendencia de duración del ciclo completo.

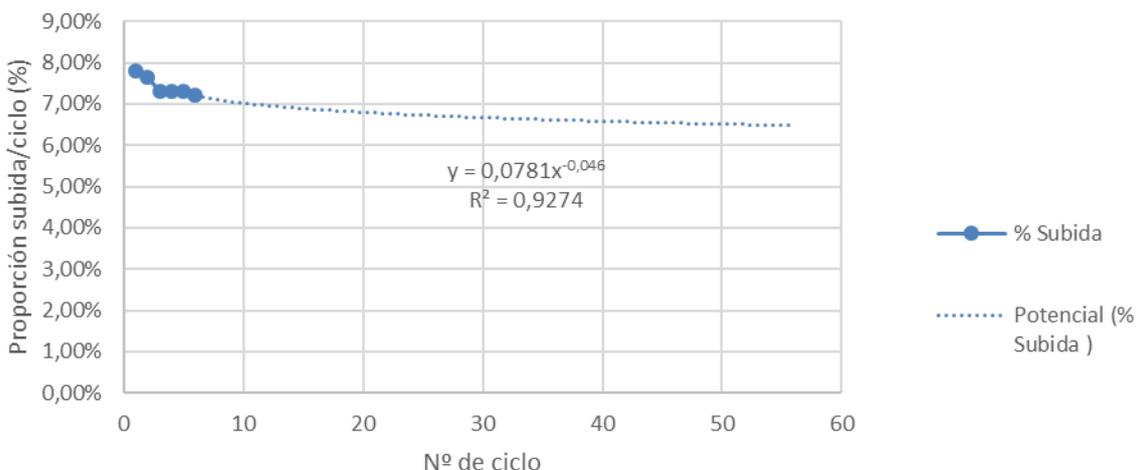


Fig. 264. Gráfica y ecuación de la tendencia del porcentaje de la etapa de subida.

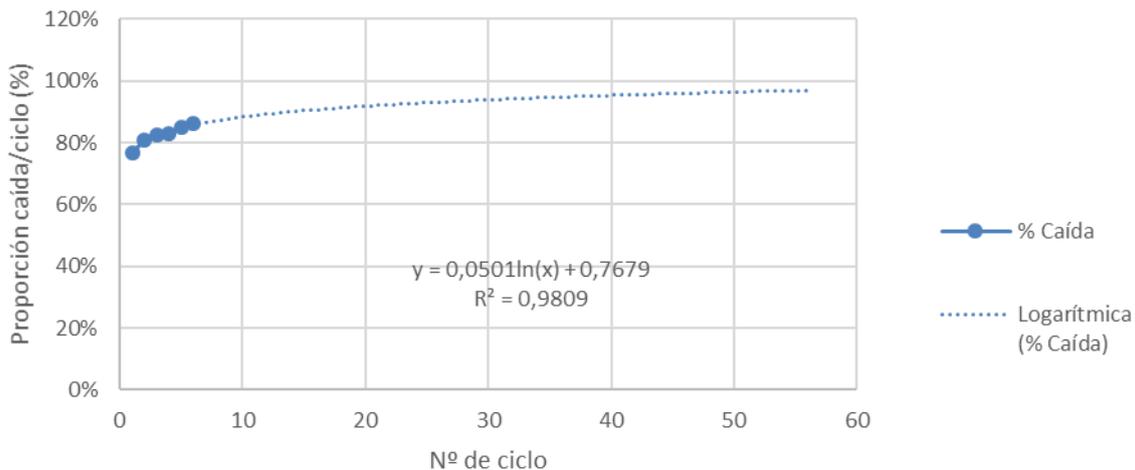


Fig. 265. Gráfica y ecuación de la tendencia del porcentaje de la etapa de caída.

Este procedimiento se ha repetido para las temperaturas exteriores de -5 °C y 15 °C. De esta forma se han conseguido caracterizar las tendencias mencionadas en función del número de ciclos, con las ecuaciones que se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44. Ecuaciones de caracterización de los parámetros en el caso del radiador.

Text (°C)	Parámetro	Ecuación
-5	Duración ciclo completo	$y = 166,71 \cdot \ln(x) + 1128,4$
	% Caída	$y = 0,0845 \cdot \ln(x) + 0,6593$
	% Subida	$y = 0,0779 \cdot x^{-0,017}$
5	Duración ciclo completo	$y = 425,12 \cdot \ln(x) + 1257,2$
	% Caída	$y = 0,050 \cdot \ln(x) + 0,7679$
	% Subida	$y = 0,0781 \cdot x^{-0,046}$
15	Duración ciclo completo	$y = 1222,7 \cdot \ln(x) + 854,2$
	% Caída	$y = 0,0808 \cdot \ln(x) + 0,7853$
	% Subida	$y = 0,0852 \cdot x^{-0,204}$

La estimación del consumo diario se realiza partiendo de las ecuaciones de tendencia indicadas en la Tabla 44 y con los datos horarios de la temperatura exterior de las zonas de interés.

De cara a mostrar el funcionamiento de las relaciones obtenidas se emplearán los datos de temperatura exterior horarios de 3 ciudades del país vasco: Vitoria, Bilbao y San Sebastián, y Valencia del mediterráneo. Se ha escogido el día 7 de enero de 2017 para realizar la comparativa, ya que las temperaturas de las tres ciudades se encuentran dentro del rango en el que son válidas las ecuaciones, entre -5 °C y 15 °C.

Tabla 45. Temperaturas diarias en ciudades de interés del día 7 de enero de 2017 [133].

CLIMA	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
Valencia	9	8	7	6	5	5	3	3	2	3	6	9	11	12	14	14	13	12	11	9	7	7	6	5	
Bilbao	2	2	2	2	1	2	2	1	0	-1	1	3	6	8	10	10	10	9	7	5	3	2	3	4	
Donostia-San Sebastian	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3
Vitoria-Gasteiz	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	7	10	10	11	11	11	9	8	5	4	4	2	2	

Tabla 46. Temperatura media, máxima y mínima en ciudades de interés del día 5 de enero de 2017.

CLIMA	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	ΔTmax (°C)
Valencia	7,8	14	2	12
Bilbao	3,9	10	-1	11
Donostia-San Sebastian	3,2	5	2	3
Vitoria-Gasteiz	5,0	11	2	9

Como puede observarse, San Sebastián mantiene una temperatura relativamente constante a lo largo del día, y en Vitoria es el día más caluroso, aunque tiene un periodo bastante frío entre las 0:00 AM y las 9:00 AM. Todas las ciudades tienen temperaturas en el rango de validez aplicable de -5 °C a 15 °C

En función de las temperaturas exteriores y su evolución a lo largo del día y con las ecuaciones que describen la duración de las subetapas de los ciclos, se calcula el consumo para algunas zonas identificadas.

De cara a determinar el consumo, se utilizan las curvas de temperatura superficial del radiador. Cuando la pendiente de la curva sea positiva, se considerará que la caldera está encendida, y por lo tanto todos los tramos de pendiente positiva se considerarán tiempo de consumo. Si la pendiente es nula, la caldera estará trabajando con modulación ondulante para mantener la temperatura constante, por lo que se considerará que la caldera está encendida durante la mitad de la duración de esta subetapa. Finalmente, todos los intervalos de pendiente negativa indicarán que el radiador se está enfriando, por lo que la caldera se considerará apagada y sin consumo. La suma del tiempo total de la subetapa de subida y de la mitad del tiempo de la subetapa de temperatura constante marca el tiempo total de uso de caldera. Conociendo la potencia de la caldera (35 kW), el cálculo del consumo energético diario es inmediato.

En el caso del Fan-Coil los ciclos son diferentes, principalmente debido a la agilización del calentamiento gracias a la adición de la ventilación forzada. Por lo tanto, la regulación se aplicará únicamente en el calentamiento, estando continuamente el ventilador activado. Tampoco se alcanzarán temperaturas en su superficie tan altas como 60 °C, por lo que el enfoque de regulación será diferente: se establecerá una temperatura mínima operativa de 22 °C en la batería

Aunque la tipología del ciclo sea ligeramente diferente, el proceso de análisis de las curvas para -5 °C, 5 °C y 15 °C será análogo al empleado en el caso del radiador. La principal diferencia reside en la duración de los ciclos, que es ostensiblemente menor al ser más instantánea la entrega de calor, por lo que el número de ciclos aumenta considerablemente.

El caso de la regulación de temperatura del Fan-Coil es diferente. Por un lado, la temperatura a mantener es inferior, y por lo tanto el consumo de la caldera también lo será. Por otro, el hecho de estar sometido a la convección forzada no permite una regulación modulante.

Por otro lado, hay que sumar al consumo total la potencia consumida por el ventilador.

4.5.6.- Cálculo del consumo energético.

Como puede observarse en la Tabla 47, los consumos para el caso del radiador han resultado coherentes con los perfiles de temperatura introducidos. Los consumos obtenidos no son comparables con los de un hogar convencional, ya que las pruebas se han realizado para una estancia de las dimensiones de la cámara de pruebas, por lo que los resultados no son contrastables en términos absolutos.

Tabla 47. Resultados del análisis de consumo para el caso del radiador.

Ciudad	Consumo energético (kWh)
Valencia	74,49
Bilbao	91,52
Donostia-San Sebastian	92,69
Vitoria-Gasteiz	90,72

En cuanto al confort térmico, se ha monitorizado la diferencia de temperatura entre los puntos *Confort 2* y *Confort 3* para observar la máxima diferencia de gradiente térmico vertical. En la Fig. 266 se aprecia la evolución de la misma para el caso de 5 °C, así como sus valores máximos.

La limitación de 2 °C para el confort térmico se cumple en prácticamente todo el proceso, siendo superada por poco en el tramo principal de calentamiento a temperatura constante. Esto es debido a la menor homogeneización de la temperatura en los instantes iniciales del calentamiento.

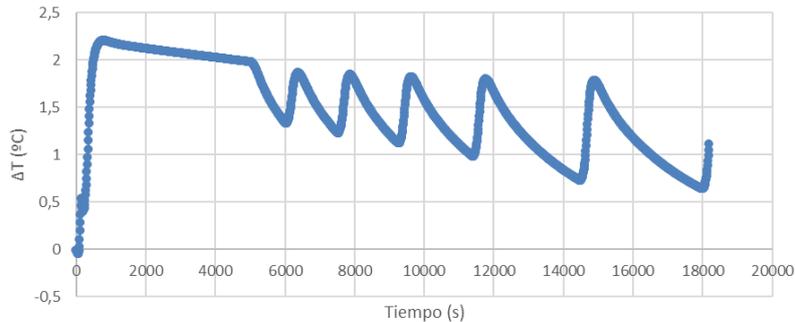


Fig. 266. Evolución de la máxima diferencia de gradiente vertical en el caso del radiador ($T_{ext} = 5^\circ C$).

Con la metodología aplicada al cálculo del consumo del Fan-Coil se obtienen unos datos incongruentes para el caso San Sebastian, mientras que para los de Valencia, Vitoria y Bilbao está en consonancia con lo esperable. Se identifican como posibles causas en la desviación de los datos de San Sebastian:

- La corta duración de los ciclos del Fan-Coil hace que las relaciones entre las etapas sean más sensibles a desviaciones y errores.
- Resulta complicado realizar con precisión la regulación manual empleada en las simulaciones de $-5^\circ C$, $5^\circ C$ y $15^\circ C$, lo que puede suponer una fuente de errores significación, más cuando la duración del ciclo es corta.

Tabla 48. Consumos para el caso del Fan-Coil

Ciudad	Consumo energético (kWh)
Valencia	44,7
Bilbao	73,34
Donostia – San Sebastian	-
Vitoria - Gasteiz	77,09

Finalmente, el criterio de gradiente vertical máximo para el confort térmico no se cumple holgadamente como en el caso del radiador. La máxima diferencia supera los 2 °C en todos los ciclos de calentamiento, alcanzando valores superiores a los 3 °C.

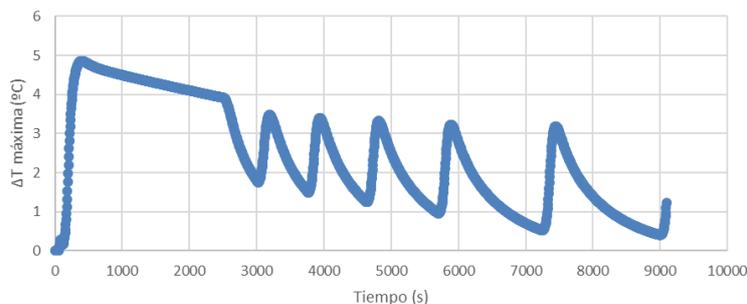


Fig. 267. Evolución de la máxima diferencia de gradiente vertical en el caso del Fan-Coil

4.5.7.- Estimación de la mejora de la eficiencia

En los casos de Bilbao y Vitoria obtienen unos ahorros cercanos al 20%, mientras que Valencia alcanza el 40%

Aunque el modelo del Fan-Coil parece haber fallado en el cálculo del consumo para el caso de San Sebastián, en el resto de los casos los resultados son razonables. En la Tabla 49 se muestra el resumen de los consumos del radiador y del Fan-Coil y la mejora estimada en el ahorro.

Tabla 49. Mejora estimada en el ahorro de Fan-Coil vs radiador.

Caso	Consumo radiador (kWh)	Consumo Fan-Coil (kWh)	Ahorro Fan-Coil (%)
Valencia	74,49	44,7	39,49
Bilbao	91,52	73,34	20,86
Donostia – San Sebastián	92,69	-	-
Vitoria - Gasteiz	90,72	77,09	15,02

Como se ha comentado tras analizar los resultados para el Fan-Coil, la metodología aplicada para el cálculo del consumo o la aplicación práctica de la toma de datos ha provocado cierta distorsión que conviene ser revisada en futuras acciones. La regulación de temperatura de -5, 5 y 15°C se ha realizado manualmente, restando precisión al modelo.

El modelo del radiador parece ser más preciso ya que los valores de consumo se corresponden con las temperaturas medias de cada ciudad, siendo la de mayor temperatura media (Valencia) la que menor consumo requiere, y la que menor temperatura media tiene la que mayor consumo requiere (San Sebastián)

El ahorro resulta dependiente de la temperatura ambiente y, en unos casos, superior al considerado por los fabricantes de Fan-Coils, que estimaban cerca de un 32 % de ahorro con respecto a un radiador. Se podría concluir que el dato aportado por los fabricantes tiene coherencia con los resultados obtenidos.

4.6.- Conclusiones.

En el capítulo 4 se ha descrito el modo de trabajo de un ventilconvector termoeléctrico (VC-TE) integrando en un ventilconvector convencional todo el desarrollo termoeléctrico del capítulo 3. Se ha desarrollado un VC-TE completo y tomado mediciones reales del mismo en las que basar la validación experimental del modelo analítico unidimensional simplificado desarrollado.

- El VC-TE no alcanza el nivel de la potencia eléctrica generada establecido en las especificaciones, debido a la poca capacidad de disipación de calor del plato frío.
- A pesar de ello, el modelo analítico unidimensional simplificado es capaz de predecir con un error muy bajo la potencia de generación eléctrica y la eficiencia de trabajo, por lo que se dispone de un modelo, con ciertas limitaciones, útil como herramienta de cálculo para el desarrollo de aplicaciones de recuperación del calor residual para la generación de energía eléctrica.
- El VC-TE apenas genera 6 W, frente a los 18 W objetivo. Es necesario evaluar la incidencia de la variación de los parámetros de entrada al modelo en aras de aumentar la diferencia de temperatura en el TEG, ya que la tendencia de crecimiento de la potencia generada con respecto a la diferencia de temperatura es de carácter exponencial.
- Es necesario conocer los requisitos de componentes asociados a una solución que cumpla el objetivo de potencia y el coste asociado a este dispositivo, para poder evaluar su potencial impacto.



Por otra parte, se ha desarrollado una metodología para buscar la evidencia de la mejora de los ventilosconvectores frente a los radiadores convencionales. Con esta metodología se ha realizado el cálculo de los consumos de ambos elementos para los entornos climáticos de interés, resultando en una herramienta muy útil para disponer de una primera estimación de la mejora de eficiencia, aunque con limitaciones que deben ser mejoradas para incrementar la fiabilidad y precisión.

- El ventilosconvector estudiado ofrece un ahorro del 20% del consumo frente a un radiador convencional, en el País Vasco para el día 7 de enero de 2017, lo que resulta directamente extrapolable a la mejora de la eficiencia.
- El valor de eficiencia obtenido está sujeto a errores cometidos por las limitaciones de la metodología aplicada. Por ello, no puede considerarse el valor obtenido como valor absoluto al no haberse estimado el error cometido en la metodología aplicada. Quedando esta labor pendiente para futuros desarrollos. No obstante, sí constituye una evidencia de la mejora de la eficiencia de los ventilosconvectores frente a los radiadores.
- La información aportada por los fabricantes de Fan-Coils relativa a la mejora de eficiencia del 32% está en consonancia con los resultados obtenidos.
- Por otro lado, aunque la respuesta del VC es más rápida que la del radiador, la estratificación también es mayor, pudiendo generar disconfort.

CAPÍTULO 5 IMPACTO ECONÓMICO DEL VENTILOCONVECTOR TERMOELÉCTRICO EN LA CLIMATIZACIÓN DEL ENTORNO DOMÉSTICO Y DEL PAÍS VASCO.



5.1.- Introducción.

En el capítulo 5 se aborda el estudio de los costes asociados al VC-TE, tanto desde el punto de vista del prototipo como de una fase de industrialización orientada a la fabricación masiva, evaluando el *payback* de la solución frente a sus alternativas competidoras en diferentes escenarios.

5.2.- Costes estimados asociados al VC-TE.

En este apartado se realiza un análisis de los costes del dispositivo Fan-Coil con generador. Para ello, primeramente, se realiza un estudio de los precios que tienen en el mercado estos Fan-Coils, y en base a ello, se calcula el coste de fabricación del mismo.

Posteriormente, se calculan los costes reales del prototipo generador que se ha incluido en el Fan-Coil, para así tener el coste total del Fan-Coil con prototipo generador.

Finalmente se realiza una estimación de los costes para una producción seriada (Fan-Coil con generador), estimando también la inversión necesaria en utillajes.

5.2.1.- Costes asociados al Fan-coil comercial.

Se realiza una búsqueda de precios de mercado de Fan-Coils similares al empleado en este proyecto, para tener un abanico más amplio y no limitar el análisis al dispositivo de partida (usado en la tesis). Se observa que los precios oscilan entre 150 € y 350 €. Esta variación es muy habitual y depende de muchos factores como es su calidad, cantidad fabricada, procedencia (empresa productora), demanda, oferta, circunstancias del mercado, etc. Para partir de un dato razonable, se toma un valor medio de unos 250 €, y se le descuentan los márgenes de la fábrica, distribución, comercial, garantías, etc. Estos márgenes son muy variados dependiendo del tipo de negocio, pero se puede estimar que los precios del mercado duplican o triplican los costes de fabricación. En general, cuanto menos valor tiene el producto, el margen aumenta y cuanto mayor es el precio del producto, el margen disminuye.

Para este caso en concreto, se ha considerado que el precio de mercado es 2,5 veces el precio de fabricación, por lo tanto, se parte de la base de que el coste de fabricación del Fan-Coil es de 100 €.

Para tener una visión más detallada del coste del Fan-Coil comercial, se realiza un pequeño listado de materiales (BOM) donde se observa cómo se distribuye el coste de éste.

Tabla 50. Listado de materiales y costes (BOM) de un Fan-Coil comercial.

FAN-COIL COMERCIAL					
Posición	Descripción	Material	Cantidad	Coste	Total
1	Estructura chasis soporte	Acero tratado y con recubrimient	1	33,00 €	33,00 €
2	Intercambiador	Aluminio + cobre	1	18,00 €	18,00 €
3	Ventilador	Componente comercial	1	12,00 €	12,00 €
4	Sistema de control electrónico	Componentes electrónicos	1	17,00 €	17,00 €
5	Tornillería, racores, fijadores, espuma...	Acero/latón/PA	1	5,00 €	5,00 €
6	Mano de obra (montaje y manipulación)		0,5	30,00 €	15,00 €
				TOTAL	100,00 €

Este desglose de materiales es una estimación de cómo podría ser la asignación de costes en la producción del Fan-Coil en una fábrica. Las posiciones del 1 al 5 corresponden a materiales que la fábrica compra a proveedores suyos y que luego montará internamente, realizando los controles de calidad establecidos para asegurar el funcionamiento.



Cuando se realizan estos estudios de los costes, se deben tener en cuenta las inversiones que afectan al producto en concreto. Se habla de inversiones para troqueles, moldes, utillajes de montaje, utillajes de control y verificación, etc.

Para este caso en concreto, no se han tenido en cuenta estas inversiones y se estima que estén ya amortizadas.

5.2.2.- Costes del VC-TE prototipo.

En el segundo estudio, se han valorizado los costes del dispositivo Fan-Coil con el generador de electricidad que dará energía al ventilador del Fan-Coil.

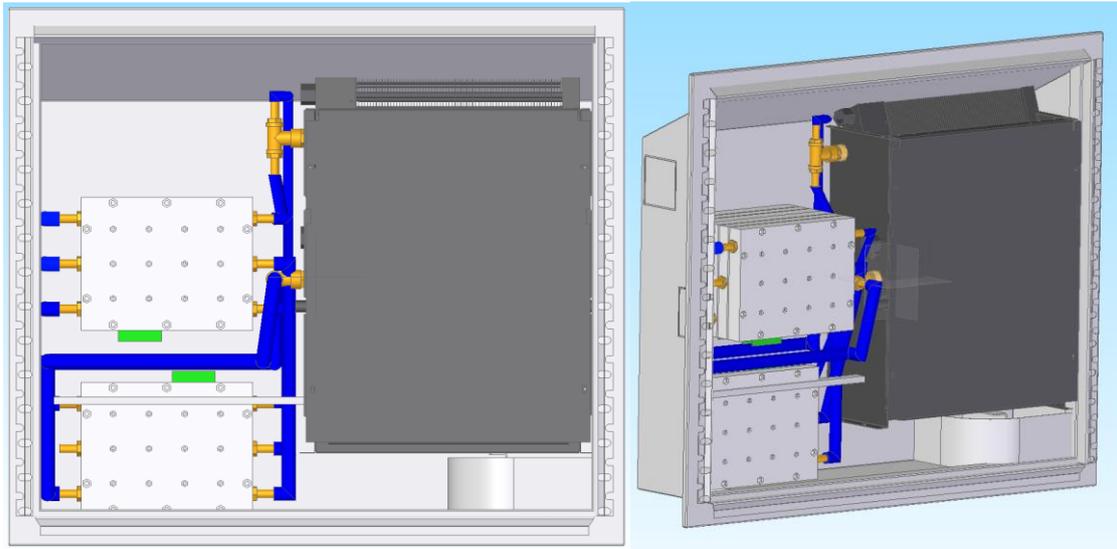


Fig. 268. Diseño inicial del sistema generador realizado mediante CAD.



Fig. 269. Prototipo final montado y probado en laboratorio.

Este precio no resulta representativo ni determinante para la toma de decisión de su lanzamiento al mercado, debido a que gran parte de las piezas se han fabricado de modo totalmente diferente al definitivo en una hipotética fabricación en serie.

Tabla 51. Listado de materiales y costes (BOM) de un VC-TE prototipo.

FAN-COIL CON GENERADOR ELÉCTRICO PROTOTIPO					
Posición	Descripción	Material	Cantidad	Coste	Total
1	Fan-Coil comercial		1	100,00 €	100,00 €
2	Módulo termoeléctrico de 40x40x3,7 mm	Componente comercial	72	7,80 €	561,60 €
3	PCB soportes termoelementos	FR4	6	5,00 €	30,00 €
4	Conectores PCB	Componente comercial	12	0,50 €	6,00 €
5	Sistema de control electrónico AC/DC	Electrónica comercial	1	100,00 €	100,00 €
6	Tapa aluminio de distribución	Aluminio	12	5,70 €	68,40 €
7	Tapa circuito frío superior modulo generador	Poliamida en impresión 3	3	125,00 €	375,00 €
8	Tapa circuito frío inferior modulo generador	Poliamida en impresión 3	3	125,00 €	375,00 €
9	Tapa circuito caliente central modulo generador	Poliamida en impresión 3	3	95,00 €	285,00 €
10	Set de tornillería	Acero zincado	1	5,00 €	5,00 €
11	Set de racores	Bronce	1	20,00 €	20,00 €
12	Set de tubos flexibles	Silicona	1	50,00 €	50,00 €
13	Purgador	Pieza Comercial	2	1,50 €	3,00 €
14	Mano de obra (montaje y manipulación)		8	30,00 €	240,00 €
				TOTAL	2.219,00 €

Como se puede observar en la Tabla 51, el coste total estimado más los márgenes comerciales no tendría ningún sentido en el mercado, pero sí para la realización de un número limitado de unidades y poder realizar pruebas controladas en un laboratorio. Estas pruebas llevan a la detección de fallos de funcionamiento en el sistema, así como la implementación de alguna mejora. Estas modificaciones son relativamente asequibles en comparación con modificaciones realizadas en la propia producción.

En la Tabla 51 se pueden observar, también, las grandes diferencias de precio entre las piezas propias y específicas del sistema, como las impresas en 3D, en comparación con piezas comerciales. Esto es normal por su exclusividad, y en los costes de fabricación se observará que estos precios bajarán sustancialmente.

5.2.3.- Costes del VC-TE comercial.

En este apartado, se realiza el estudio con lo que sería una estimación del coste en fabricación seriada y cuyo precio final de mercado debe ser competitivo.

Como se ha indicado con anterioridad, los costes de piezas específicas del VC-TE ven reducido su coste considerablemente a costa de la inversión de los utillajes.

Esta reducción de coste tiene una contrapartida, y es que la modificación de cualquiera de estas piezas se hace complicada y en ocasiones muy costosa, pues se han de retocar utillajes ya contruidos.

Una de las ventajas de la realización de los moldes de inyección es que se puede seleccionar el material más adecuado para cumplir con los requisitos de funcionamiento. En las pruebas realizadas con el prototipo se observa que la poliamida no es el material más adecuado para esta aplicación por estar en contacto con el agua. La poliamida es bastante sensible a la absorción de la humedad.

Por tanto, de cara a una vida prolongada del producto y para la fabricación seriada se debería hacer un estudio de los diferentes materiales disponibles en el mercado y su selección final. A priori, se pueden barajar materiales como el POM, ABS, PP, etc. En el caso que nos ocupa se ha seleccionado a priori el ABS por sus características técnicas y precio competitivo.

Aprovechando la fabricación de los moldes, se pueden sustituir los racores utilizados en el prototipo, integrándolos por diseño en las tapas del circuito. Esto supone una reducción importante en el coste de materiales y sobre todo en el montaje del sistema generador. El tiempo utilizado para roscar los racores desaparece y desde el punto de vista de la calidad, se asegura la estanqueidad de la unión.

Otro punto importante a la hora de realizar la fabricación en grandes cantidades reside en que el coste de los materiales comerciales se ve también muy reducido. Se puede hablar de reducciones de entre el 10 % y 60 %, dependiendo de las cantidades a comprar.

Observando la lista de materiales, se aprecia que los módulos termoeléctricos son un punto importante para obtener un precio competitivo. El precio indicado es bastante competitivo y realista, debido a la gran oferta de este componente en el mercado, tal como se explicó en el estudio del estado del arte.

Tabla 52. Listado de materiales y costes (BOM) de un VC-TE comercial.

FAN-COIL CON GENERADOR ELÉCTRICO						Utillajes		
Posición	Descripción	Material	Cantidad	Coste	Total	Descripción	Coste	
1	Fan-Coil Comercial		1	100,00 €	100,00 €			
2	Módulo termoeléctrico de 40x40x3,7	Componente comercial	72	1,50 €	108,00 €			
3	PCB soportes termoelementos	FR4	6	0,50 €	3,00 €	Fotolito impresión	100,00 €	
4	Conectores PCB	Componente comercial	12	0,25 €	3,00 €			
5	Sistema de control electrónico AC/DC	Electrónica comercial	1	15,00 €	15,00 €	Utillajes de montaje	500,00 €	
6	Tapa aluminio de distribución	Aluminio	12	0,50 €	6,00 €	Troquel progresivo	40.000,00 €	
7	Tapa circuito frío superior modulo generador	ABS	3	0,75 €	2,25 €	Molde de inyección	35.000,00 €	
8	Tapa circuito frío inferior modulo generador	ABS	3	0,75 €	2,25 €	Molde de inyección	35.000,00 €	
9	Tapa circuito caliente central módulo generador	ABS	3	0,65 €	1,95 €	Molde de inyección	33.000,00 €	
10	Set de tornillería	Acero zincado	1	0,40 €	0,40 €	-		
11	Set de tubos flexibles	Silicona	1	10,00 €	10,00 €			
12	Purgador	Pieza comercial	2	0,50 €	1,00 €			
13	Mano de obra (montaje y manipulación)		0,6	30,00 €	18,00 €			
					TOTAL	270,85 €	INVERSIÓN	143.600,00 €

La estimación del coste del nuevo aparato es considerablemente más elevada que la unidad de la que partíamos, pero nos ofrece otras ventajas sobre el anterior. La compensación de no tener que hacer obras para la instalación de una conexión eléctrica cercana al Fan-Coil hará que este dispositivo sea competitivo y tenga éxito en el mercado.

Respecto de la inversión, y a la hora de realizar el cálculo, los departamentos financieros lo tienen en cuenta de diferentes formas. Una de ellas es repercutir el coste del utillaje en el precio de la pieza en un tiempo estimado de vida útil del utillaje y en base a un número estimado de unidades de fabricación en ese período. En otras ocasiones esta inversión se considera dentro de las inversiones globales de la empresa y la repercusión en el precio de la pieza puede llegar a ser algo menor. Lo que está claro es que de una manera u otra el precio de la pieza se verá incrementado en un pequeño porcentaje dependiendo de manera muy importante de la cantidad de unidades vendidas y del tiempo de amortización considerado.

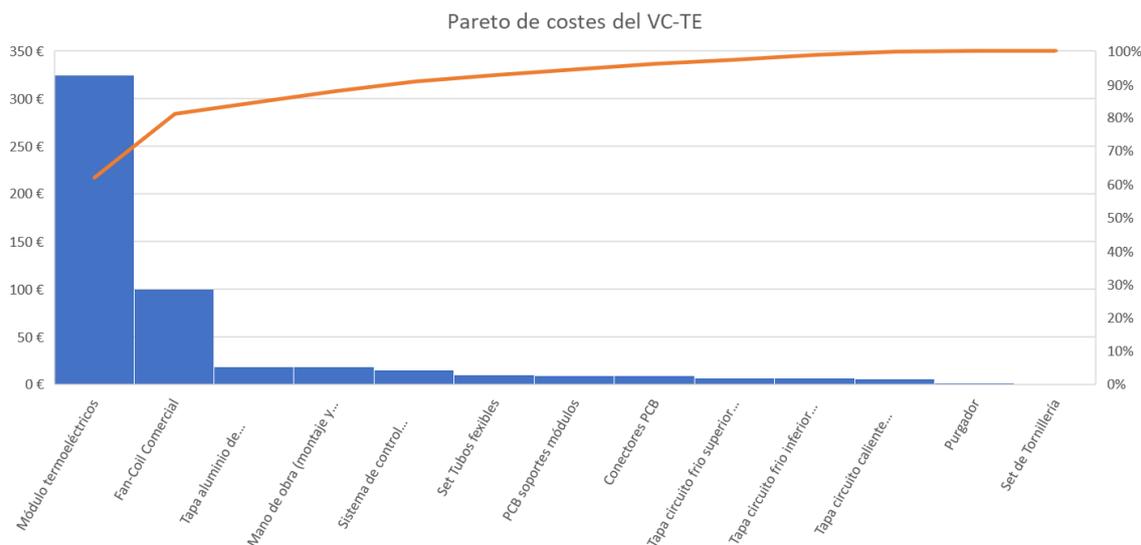


Fig. 270. Pareto de costes del VC-TE.

La estimación del incremento del coste se eleva desde los 100 € del Fan-Coil hasta los 270 € del VC-TE. Resultando el Fan-Coil un 60 % más barato que el VC-TE.

Teniendo en cuenta que con el TEG diseñado solo se han alcanzado 6 W, se considera oportuno una estimación del coste que incorpore el número necesario de módulos hasta alcanzar los 18 W. Para ello, en vez de 72 módulos, serían necesarios 216, lo que elevaría el coste del producto hasta los 523,75 €, considerando que el alojamiento de estos módulos requiere del alojamiento físico necesario.

Según se puede apreciar en el Pareto de la Fig. 270, los módulos termoeléctricos suponen el mayor coste añadido al Fan-Coil de todos los materiales empleados, por lo que su reducción debería ser el punto al que se dedicarán los mayores esfuerzos.

El primer punto de trabajo a futuro debería centrarse en la optimización de los disipadores para mejorar su coeficiente de transferencia térmica de convección, de esta manera se incrementaría la diferencia de temperatura entre las caras de los módulos, y como se ha explicado con anterioridad, esto afecta de forma exponencial a la potencia eléctrica generada, por lo que ayudaría en la reducción del número de módulos necesarios, y por tanto, en la reducción del coste.

Otro punto de trabajo a evaluar consiste en emplear alguna estrategia de redensificación termoeléctrica que ayude a generar más potencia eléctrica por unidad de área. De esta manera, al reducir el tamaño se pueden reducir los costes. Esta estrategia se analiza con detalle en el capítulo 6.

5.3.- Análisis del mercado y potencial de impacto en el País Vasco.

La UE se ha comprometido a reducir gases de efecto invernadero (GEI) a un 80-95% por debajo de los niveles de 1990 para el año 2050 [134], llegando al objetivo de descarbonización incluido en la Hoja de Ruta de la Energía 2050 [135], al tiempo que garantiza la seguridad del suministro de energía y la competitividad. Una acción clave para la consecución de este objetivo es el de actuar sobre los edificios y calefacción. En la Unión Europea el 40 % del consumo total de energía [2] se consume en los edificios, de la que el 80 % se consume en calefacción [136], entre el calentamiento del agua y el espacio. Igualmente, el 36 % de las emisiones de gases de efecto

invernadero provienen directamente de la energía de los edificios (20 % residenciales, 18% comerciales) [137].

Esta realidad traducida a un ciudadano medio de la UE significa que, el 6,4% de su ingreso disponible se dedica a la energía relacionada con el hogar, de los cuales dos tercios de esos gastos corresponden a la calefacción [138]. Debido a los consumos energéticos elevados el 10% de la población de la UE no fue capaz de mantener sus hogares adecuadamente calefactados debido al aumento de precios de la energía.

Una de las principales razones de tan alto consumo de energía en la calefacción es la presencia de las calderas de gas. A pesar de que no son energéticamente eficientes ($CP < 1$), están instaladas en el 45% de las casas de la UE [139], causando altos costes de operación y mantenimiento.

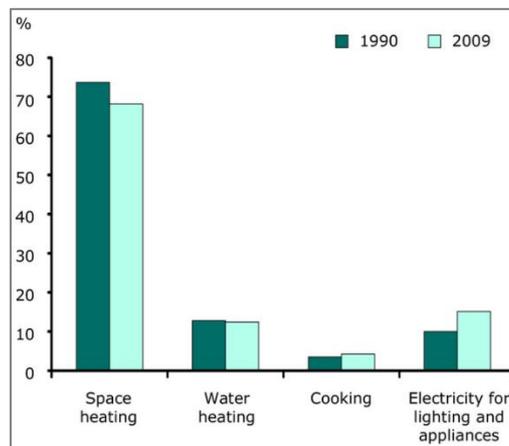


Fig. 271. Distribución del consumo de energía en el hogar [140].

En este sentido, existe una clara oportunidad comercial para las tecnologías de calefacción más eficientes energéticamente para penetrar en el mercado de la calefacción doméstica, tanto en nuevos edificios como en el reequipamiento de las calderas de gas antiguas, en especial teniendo en cuenta que:

- Las calderas de gas tienen una vida media de 15 años, y hay alrededor de 10 millones de calderas residenciales en las casas de la UE con más de 20 años [139].
- Además, teniendo en cuenta las tasas actuales de construcción, demolición y renovación en toda Europa, la ciudad de 2050 está ya más de un 70% construida.
- Por otra parte, las nuevas directivas de la UE empujan estrategias de rehabilitación y mantenimiento en los nuevos edificios que no son capaces de obtener los impactos solicitados.

En la UE 25, existe una tasa de rehabilitación anual total de casi 4,9 millones de unidades basadas en combustibles fósiles [139]. Según la AIE (Agencia Internacional de la Energía), mediante la sustitución de los quemadores de petróleo / gas por bombas de calor, debería ser posible ahorrar 15 de 90 millones de toneladas de CO₂ al año en Europa.

El dispositivo desarrollado y evaluado en la presente tesis está dirigido al mercado de sistemas de calefacción. Este mercado ha tenido una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 21,5 % para el periodo 2007-2010 en todo el mundo y 15,9 % en Europa, llegando a más de 120.000 unidades vendidas en 2012 [139].

En Euskadi, un 55 % de los hogares utiliza gas canalizado para su abastecimiento de calefacción [141], por lo que teniendo en cuenta que el número de viviendas de la Comunidad Autónoma en

2016 (cuando se inició la presente tesis) fue de 1.040.592 [142], el número de hogares que podrían reemplazar sus emisores actuales por el ventilador diseñado sería de 555.825. Se considera que el dispositivo es aplicable en todos estos hogares, ya que disponen de una caldera y únicamente habría que sustituir el radiador tradicional por la nueva unidad (valdría para obra nueva, rehabilitación o sustitución directa). Según el EVE, cada familia vasca de media tiene un gasto energético anual medio de más de 1.000€ en la vivienda [143], de los cuales 686 corresponde al consumo eléctrico y cerca de 300€ a calefacción (lo que equivale a un 2,4% de la renta familiar).

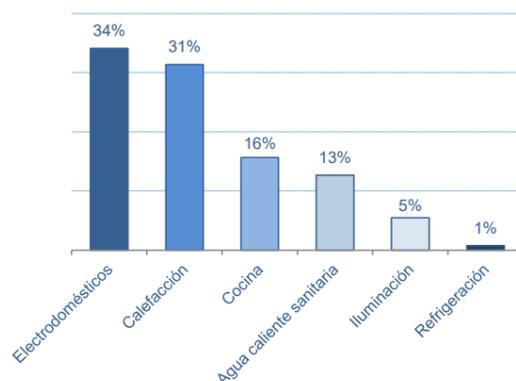


Fig. 272. Distribución de la factura energética de la vivienda en Euskadi [143].

Con estos datos se estima que el ahorro tanto global como por familia podría alcanzar los 90 € en Euskadi, para una mejora de eficiencia del 30% (según se identifica en el estado del arte).

Tabla 53. Estimación del ahorro anual global y por vivienda en Euskadi.

Potencial ahorro en Euskadi (datos de 2015)

Ahorro anual global	50.024.304 euros
Ahorro anual por vivienda	90 euros

Como puede observarse en la Tabla 53, el potencial de ahorro es importante, y lo sería aún más de considerar su alcance a nivel estatal.

De cara a acometer la rehabilitación de una vivienda que cuenta ya con un sistema de calefacción de radiadores, la alternativa entre Fan-Coil o VC-TE podría estar condicionada por el payback de la actuación. Teniendo en cuenta que con ambos sistemas se alcanzaría el 30 % de eficiencia, en ambos casos se obtendría un ahorro de 90 € mensuales, aunque la inversión inicial variaría. Para el caso del Fan-Coil se consideran 6 equipos de 100 € (aunque habría que considerar el PVP y no el coste), además de los gastos de la obra necesarios que podrían ascender a 649 € si se consideran las partidas indicadas en la Tabla 54, referentes a la instalación de los enchufes en una obra de rehabilitación. Con estas consideraciones se calcula un payback de 14 años frente a los 38 años de payback de los VC-TE.

Tabla 54. Presupuesto de instalación de enchufes en obra de rehabilitación.

Código	Ud	Concepto	Cantidad	Precio	Importe
06		ELECTRICIDAD			
		LINEAS GENERALES			
06.01	UD	CIRCUITO FUERZA 3X4 MM2 Suministro e instalación de. Circuito "FUERZA", hasta una distancia máxima de 30 metros, realizado con tubo PVC corrugado negro flexible de D=20mm y 3 conductores de cobre unipolares aislados para una tensión nominal de 220 V y sección 1,5 mm ² ., en sistema monofásico, (activo, neutro y protección), incluido p.p. de cajas de registro y regletas de conexión. Incluso accesorio, pequeño material, mano de obra de instalación y pruebas.	1,00	258,68	258,68
		CUADROS ELECTRICOS			
06.04	UD	MAGNETOTERMICO DE 10A (PIA) Suministro e instalación de 1 PIA de corte omnipolar de 10 A (I+N) ubicado en el cuadro de distribución. para circuito: C6 Fan-Coil; Así como puentes de cableado, totalmente conexonado y rotulado. Incluso accesorio, pequeño material, mano de obra de instalación y pruebas.	1,00	97,70	97,70
06.09	UD	BASE DE ENCHUFE SCHUKO NIESSEN ZENIT Suministro e instalación de base de enchufe tipo schuko NIESSEN ZENNIT en blanco con marco respectivo. Incluso accesorio, pequeño material, mano de obra de instalación y pruebas.	6,00	48,77	292,62
TOTAL					649,00 €

Para el caso de una obra nueva el enfoque es ligeramente diferente, debido a que los gastos de albañilería y electricidad quedan camuflados en una obra mayor, considerando exclusivamente para la comparativa, en ambos casos, el coste de los equipos.

El payback para el caso del Fan-Coil sería de 6,6 años, mientras que para el VC-TE alcanzaría los 34 años.

Cabe señalar que los precios de gas natural son variables y que su tendencia es ascendente. Como se puede observar en la Fig. 273 los precios en Euskadi se incrementaron más de un 40% entre 2003 y 2011. Si se produjera una subida similar en los próximos años, el VC-TE se vería beneficiado reduciendo su payback en un porcentaje similar y pasando de 34 a 20,4 años.

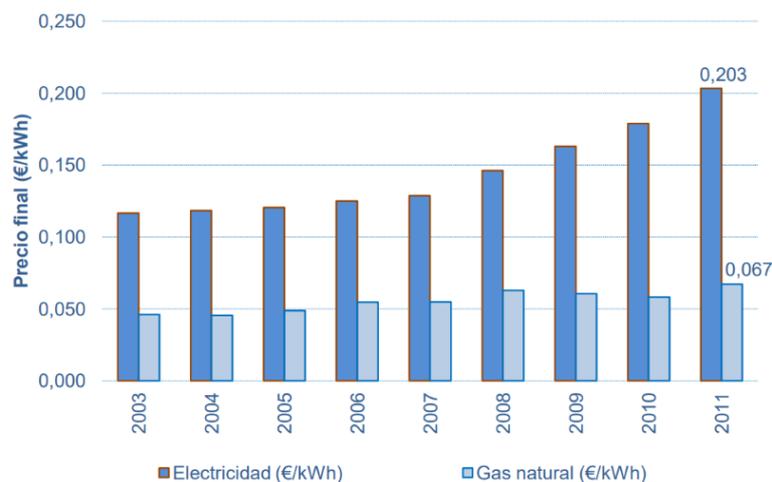


Fig. 273. Evolución de los costes medios de gas y electricidad en el sector doméstico vasco [143].

Cabe señalar que el Fan-Coil tiene un coste asociado al consumo eléctrico del motor del ventilador de 18W. Teniendo en cuenta que durante el invierno se encendió la calefacción una media 3,55 hora en el País Vasco [144], se estima que el Fan-Coil tiene un consumo 34,5 kWh (para 6 Fan-Coils) y supone un coste de cerca de 5 € considerando un precio de la electricidad de 0,1394 €/kWh en 2019.

CARACTERÍSTICAS VIVIENDA (2006)				
	Álava/Araba	Gipuzkoa	Bizkaia	CAPV
Antigüedad	32 años	38 años	39 años	37 años
Tamaño del hogar	2,65 p/hogar	2,63 p/hogar	2,63 p/hogar	2,64 p/hogar
Superficie hogar	92 m ²	87 m ²	85 m ²	87 m ²
Índice de confort	77	73	71	72

Fig. 274. Características de la vivienda en Euskadi [143].

Según el EVE, el tamaño medio de vivienda en Euskadi está entre 85 y 92 m² (ver Fig. 274), motivo por el que se usan 6 unidades de VC-TE para el análisis. Pero hay que considerar que Euskadi es un mercado pequeño y no tiene por qué ser el más adecuado para este producto. Por ejemplo, en Australia, Dinamarca, Francia el tamaño medio de la vivienda casi duplica al del país vasco [145], por lo que el número de unidades demandas por vivienda sería superior y el ahorro conseguido también. Del mismo modo, la tarifa residencial de gas natural puede llegar a duplicarse en países como Japón, Brasil, Uruguay, [146], provocando un mayor ahorro y una reducción del payback.

Desde el punto de vista medioambiental cabe señalar, que el VC-TE ahorra la emisión de 9,66 Kg CO₂eq por hogar y año a la atmosfera, Utilizando para el cálculo de las emisiones el factor de emisión más actualizado publicado por DEFRA (0.28 kg CO₂/kWh) [147], lo que podría suponer cerca de 19 GWh y 5.370,20 Tm CO₂eq /año para el conjunto de Euskadi, más que el Fan-Coil, considerando en el análisis únicamente el ahorro eléctrico.

INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO EN EL SECTOR RESIDENCIAL (2011)				
	Álava/Araba	Gipuzkoa	Bizkaia	CAPV
Gas natural (GWh)	616	931	1.168	2.715
Electricidad (GWh)	390	949	1.522	2.861
Factura energía (€/viv. pral.)	1.090	1.066	950	1.008
Consumo medio (tep/viv. pral.)	0,85	0,73	0,62	0,69

Fig. 275. Consumo energético en el sector residencial en Euskadi [143].

Pero, frente al radiador, el impacto sería mucho mayor, ya que se tendría en cuenta, también, el ahorro debido a la mejora de eficiencia térmica. De cara a estima el impacto medioambiental, no se utilizan los datos de consumo energético asociados al gas natural en el sector residencial mostrados en la Fig. 275, ya que no es posible determinar el origen del este consumo y no todo ello es calefacción por lo que se utilizará una estimación de 2 kW por VC-TE, en el rango del consumo energético de las resistencias eléctricas empleadas en los ensayos de laboratorio. Esto supondría un ahorro por hogar de 1.150 kWh por año y cerca de 640 GWh para el conjunto de Euskadi. Lo que tendría una equivalencia en emisiones, según el factor de emisión (0,203 kg CO₂eq/kWh) considerado en el año 2018 para equipos de combustión de gas natural por el Ministerio para la Transformación Ecológica (MITECO) [148] de 130.000 Tm CO₂eq/año para el conjunto de Euskadi, y cerca de 0,23 Tm CO₂eq por hogar y año.

Se puede considerar que un árbol adulto retiene 0,5 Tm. CO₂/año [149], por lo que se concluye que la instalación equipo de estas características podrían suponer un impacto para el conjunto del País Vasco equivalentes a 260.000 árboles adultos.



5.4.- Conclusiones

La inversión inicial que es necesario realizar es sin duda uno de los mayores obstáculos en cuanto al éxito comercial de estos sistemas se refiere. Las mejoras tecnológicas junto con posibles subvenciones por su sostenibilidad podrían fomentar el éxito de estas instalaciones en nuevas viviendas y rehabilitación, siendo en rehabilitación donde gozan de mayores oportunidades.

El coste de los módulos termoeléctricos es el principal obstáculo para reducir el payback y mitigar la barrera de entrada al mercado que supone el desembolso inicial, por ello la estrategia de reducción de costes en esta partida de gasto resultan vitales para el éxito de este producto a nivel de mercado.

Resulta significativo el ahorro económico potencial en País Vasco puede ascender a cerca de 50 M€ anuales, con un impacto medioambiental potencial equivalente a 260.000 árboles.

CAPÍTULO 6 ESTUDIO DE APLICACIÓN DE NUEVA GEOMETRÍA UNILEG EN \square y NUEVO MATERIAL COMO ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE COSTES.



6.1.- Introducción.

El capítulo 6 está estructurado en cuatro apartados principales. En primer lugar, se presenta una novedosa estructura de pellet termoeléctrico con forma de Π , que ha sido beneficiaria de una **patente europea** como resultado de la presente tesis. Se explica el detalle de funcionamiento de esta estructura y los planteamientos teóricos del modelo numérico implícito que se explicó en el capítulo 3, necesario para su evaluación.

En segundo lugar, se introduce un nuevo material de generación de electricidad que se ha desarrollado y optimizado en el marco de la presente tesis, evaluando su potencia de generación con la estructura en Π , para lo que se han desarrollado los prototipos necesarios.

En tercer y último lugar, se evalúa a nivel conceptual el potencial de un sistema VC-TE con las estructuras Unileg de disco en Π , orientado a la reducción de costes del sistema en desarrollo, para los dos materiales de trabajo; el Bi_2Te_3 y el $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$.

Previamente, se han desarrollado simulaciones para validar el funcionamiento de la nueva estructura en Π , empleando en ANSYS las funciones definidas por usuario programadas en C. El resumen de esta actividad se recoge en el Anexo C. Se trató de un primer paso que sirvió para contrastar impresiones y proceder con la protección, también puso de manifiesto la necesidad de emplear una herramienta más rápida y amigable para el desarrollo del modelo que finalmente se implementó en Matlab.

6.2.- Nueva estructura Unileg en Π de dado termoeléctrico

Los generadores termoeléctricos tipo Unileg han demostrado ser una buena opción para aplicaciones de altas temperaturas de trabajo. Esto se debe a que, al estar compuesto por un solo material termoeléctrico, no existen diferentes coeficientes de expansión térmica, lo que confiere a la estructura una buena resistencia mecánica y una mayor vida útil frente a los ciclos térmicos. Estas estructuras suelen estar formadas por un pellet termoeléctrico y un conductor eléctrico metálico que une los extremos caliente y frío de los pellets consecutivos. La novedosa estructura de Unileg concebida en el marco de esta investigación está diseñada para abordar uno de los principales problemas de los dispositivos tradicionales, que es la estabilidad física y química de la soldadura entre el pellet y el conductor en el lado caliente.

Además del material clásico empleado en capítulos anteriores, en este capítulo se desarrolla un nuevo material sobre el que se evalúa su aplicabilidad. El material para el que se ha propuesto esta estructura es un óxido de semiconductor tipo P $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, debido a su estabilidad química a altas temperaturas y a su buena mecanizabilidad.

Este último requisito está relacionado con la principal innovación de la estructura, que es un corte parcial que divide el pellet longitudinalmente, dejando dos patas unidas por la sección sin cortar y formando una sección similar a la letra Π . La banda conductora metálica que se utiliza habitualmente en la fabricación de generadores termoeléctricos Unileg es sustituida por un revestimiento del material conductor, en este caso plata, en una de las patas resultantes del corte. Como consecuencia de la aplicación de estas operaciones, una de las patas está prácticamente en cortocircuito y actúa como conductor eléctrico de estructuras Unileg, eliminando la necesidad de soldadura en el extremo caliente del pellet.

6.2.1.- Descripción de la nueva estructura Unileg en □

Los generadores termoeléctricos suelen estar compuestos por material semiconductor termoeléctrico en forma de pellets y tiras de material conductor de naturaleza metálica que conectan los pellets y los sustratos de material cerámico o metálico, donde se encuentran las fuentes de calor y frío del sistema. Estos pellets están conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. La estructura más común es la formada por semiconductores de tipo N y P situados alternativamente, como el que se puede ver en la Fig. 276 a).



Fig. 276. Estructuras TE más habituales empleadas en la construcción de módulos TE a) con semiconductores N y P, y b) Usando solo un tipo.

Otra estructura es la llamada Unileg. En esta composición sólo se utiliza uno de los materiales semiconductores. Esto suele hacerse debido a la falta de un material semiconductor de propiedades similares a las del otro tipo, o también por evitar tensiones derivadas de los diferentes coeficientes de expansión térmica, algo habitual en los módulos de alta temperatura donde los gradientes térmicos pueden provocar el fallo del dispositivo, cuando se producen ciclos térmicos. Como se ve en la Fig. 276. b), la banda metálica plegada en Z suele unir los extremos caliente y frío de los pellets del mismo material en la caja de Unileg [150]. Esta parte es significativamente más complicada desde el punto de vista geométrico que el equivalente al módulo convencional, y también representa un reto a la hora de fabricar el módulo con repetibilidad, precisión y lo más cerca posible del ideal [151]. Los módulos construidos sin utilizar ningún proceso de fabricación especial pueden alcanzar valores de factor de fabricación (MF), según la definición de Lemonnier et al. [152], mostrada en la ecuación (93) de alrededor del 60% [153]. La simplificación de módulos Unileg es objeto de numerosas patentes [154] [155], donde se pueden encontrar formas exóticas de conectores y mecanismos que facilitan el proceso de montaje.

$$MF = R_{ideal}/R_{interna} \quad (93)$$

La eficiencia de conversión de estos dispositivos está representada por la figura de mérito ZT, que relaciona parámetros térmicos como la conductividad térmica y la temperatura, y parámetros eléctricos como la resistividad y el coeficiente de Seebeck.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \quad (94)$$

Durante años, los esfuerzos de investigación se han centrado en conseguir valores ZT que permitan aplicaciones prácticas de generación de energía, del orden de $ZT \approx 1.5$, actuando sobre la mejora del factor de potencia $\alpha^2 \sigma$ ya sea mejorando el valor del coeficiente Seebeck, aumentando la conductividad eléctrica o reduciendo la conductividad térmica de los materiales. Sin embargo, existen pocos estudios o invenciones que intenten mejorar la eficiencia global de los módulos termoeléctricos mediante modificaciones geométricas en la configuración clásica [156].

La viabilidad de los módulos termoeléctricos como fuente de energía eléctrica depende del equilibrio entre eficiencia, coste y ecología. En este trabajo se ha desarrollado una estructura modular básica que pretende reducir el coste de todo el montaje utilizando un material semiconductor de óxido del tipo P, $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, que también tiene la ventaja de cumplir con la normativa RoHS, convirtiéndolo en un material seguro. Debido al uso de un solo material termoeléctrico, la estructura será considerada del tipo Unileg. Este material ha sido elegido por su buena mecanizabilidad y estabilidad física y química a altas temperaturas [157].

El requisito de mecanizabilidad está relacionado con la principal innovación de la estructura, un corte que divide el pellet termoeléctrico en dos segmentos unidos por una sección superior no afectada por dicho corte, formando una sección que se asemeja a la letra griega Π . La banda metálica utilizada en los ensamblajes del Unileg es sustituida por un revestimiento de material metálico, preferiblemente plata, debido a su alto punto de fusión y conductividad eléctrica, en uno de los segmentos resultantes del corte. De esta forma, se pretende conseguir un efecto similar al de un cortocircuito eléctrico, debido a la alta conductividad eléctrica del recubrimiento metálico, similar al que se produce con la banda metálica que se utiliza habitualmente. La Fig. 277 muestra una comparación entre un dispositivo de Unileg convencional y un dispositivo con la nueva estructura propuesta.

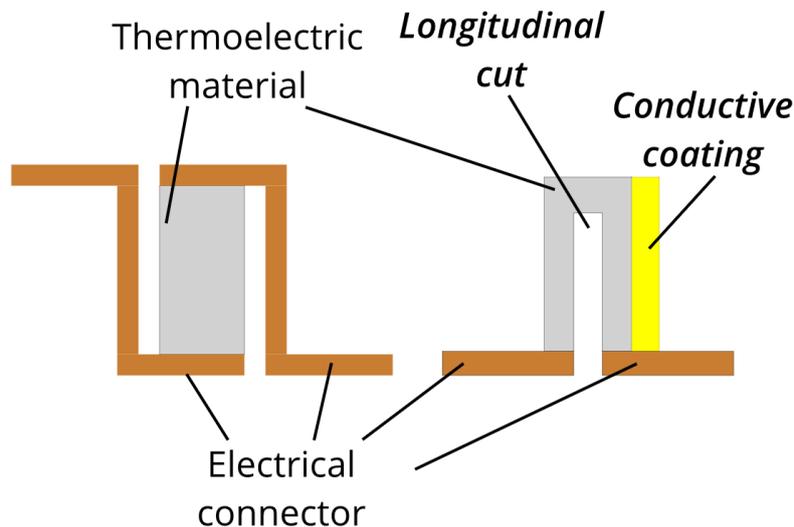


Fig. 277. Descripción general de la solución de Unileg más utilizada en la actualidad (izquierda) y de la nueva estructura en Π propuesta (derecha).

Este desarrollo implica el mismo número de soldaduras, dos, para cada unidad termoeléctrica básica. Sin embargo, esta configuración tiene una ventaja clara sobre el Unileg convencional, debido a que ambas soldaduras a realizar pueden colocarse en el lado designado como foco frío del sistema, utilizando pastas de soldadura de menor temperatura de fusión, procesos de fabricación a temperaturas más bajas y evitando la difusión de materiales que se produce en el foco caliente a altas temperaturas [158] [84]. La formación del compuesto intermetálico entre el material termoeléctrico y la soldadura es desfavorable debido a su débil resistencia mecánica y alta resistencia al contacto [159]. Se mejora la vida útil del módulo termoeléctrico, ya que al estar compuesto por un solo material termoeléctrico no se producen esfuerzos de dilatación, especialmente en dispositivos sometidos a altas temperaturas y grandes gradientes térmicos, que podrían fracturar el módulo.

En este trabajo, se analiza el comportamiento termoeléctrico teórico esperado de la nueva estructura con una sola pastilla, para ver cómo las características especiales de esta invención afectan en el rendimiento del material.

6.2.1.1.- Justificación teórica del funcionamiento.

En este apartado, se detalla el proceso de diseño seguido para obtener las dimensiones ideales del prototipo básico. Este estudio servirá para determinar la influencia de cada uno de los factores geométricos en el rendimiento de la estructura termoelectrica básica.

El concepto del que parte la nueva estructura propuesta es el de la metalización y corte de un dado de material termoelectrico, para la generación de una diferencia de potencial entre las dos partes resultantes. Esto se ilustra mediante la Fig. 278, extraída de la patente que se ha solicitado en el marco de esta misma tesis y cuyo estado de solicitud se detalla más adelante.

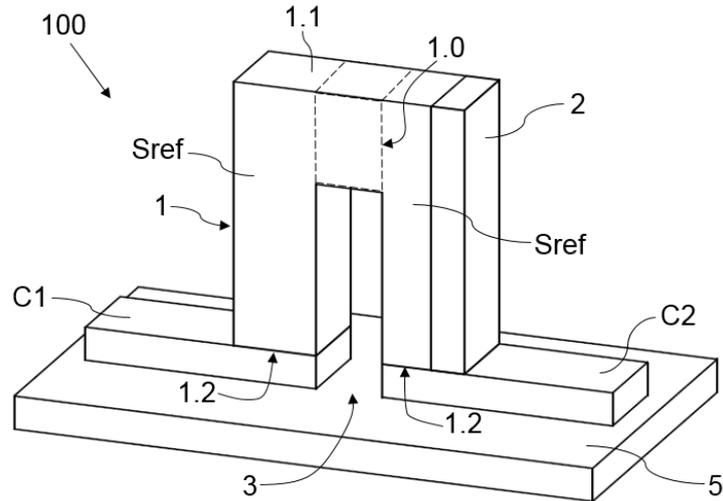


Fig. 278. Esquema básico de la estructura en Π propuesta en este trabajo.

Sobre un dado de material termoelectrico (1), se realiza un corte (3) que da como lugar a dos segmentos de referencia (Sref). Estos dos segmentos están unidos por un tercer segmento (1.0), el cual los conecta eléctrica y térmicamente. Al exponer a una diferencia de temperatura las superficies (1.1) y (1.2), se genera una diferencia de potencial en los segmentos de referencia, con sentido dependiente del tipo de material semiconductor y de la posición del foco caliente y del frío. Como la diferencia de potencial que se genera es la misma, no se podría realizar un aprovechamiento energético mediante la termoelectricidad. Para ello, se incluye la metalización (2). Ésta se realiza solamente en uno de los segmentos de referencia, creando un cortocircuito en dicha pata, la cual ya no actúa como un termoelectrico, sino como un simple conductor. De este modo, entre los dos extremos (1.2) unidos a los conductores eléctricos (C1) y (C2) se genera una diferencia de potencial, tal que la corriente eléctrica puede fluir a través de toda la estructura.

6.2.2.- Aplicación del modelo numérico unidimensional a la nueva estructura en Π mediante Matlab.

Para comprender el comportamiento teórico de esta estructura en particular, se ha desarrollado un solucionador de diferencias finitas a medida utilizando el paquete básico de MATLAB, basado en el modelo numérico implícito explicado en el capítulo 3, que ya ha sido validado con anterioridad en una publicación en revista científica indexada [160].

Las ecuaciones de la física involucradas en este problema, la ecuación (95) y la (96), se resuelven iterativamente para cada paso temporal. No se tiene en cuenta el término transitorio de la ecuación de campo eléctrico.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = \rho_{el} J^2 + TJ\nabla\alpha \quad (95)$$

$$\nabla V = -\alpha\nabla T - \rho_{el} J \quad (96)$$

El primer término a la derecha de la ecuación (95) es la contribución volumétrica del efecto Joule a la generación de calor, y el segundo está relacionado con los efectos Peltier y Thompson. El campo eléctrico, en la ecuación (96), se rige por la diferencia de tensión causada por el efecto Seebeck y la caída de tensión causada por la resistividad del material. Para el análisis numérico es útil manejarlos por separado.

En los cálculos realizados en este trabajo se ha utilizado como material termoeléctrico un semiconductor de Bi_2Te_3 de tipo P, por ser compatible con el material empleado en la presente tesis y porque las propiedades de dependencia térmica del $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ con un proceso de fabricación mejorado [161] no estaban disponibles en el momento de iniciar este análisis. Las conductividades térmica y eléctrica y los coeficientes de Seebeck del Bi_2Te_3 se ajustan para que dependan de la temperatura, de acuerdo con los polinomios cuyos coeficientes se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55. Propiedades termoeléctricas del Bi_2Te_3 empleadas en el análisis numérico [160].

Property	Polynomial Coefficients $P = a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T^1 + a_0$				
	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
Thermal conductivity, κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	-2.002×10^{-11}	-5.033×10^{-8}	4.010×10^{-5}	-1.638×10^{-3}	1.485×10^0
Electrical conductivity, σ ($\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$)	7.040×10^{-15}	-4.566×10^{-12}	8.468×10^{-10}	1.709×10^{-8}	7.744×10^{-6}
Seebeck coefficient, S (V K^{-1})	-1.318×10^{-15}	8.444×10^{-13}	-1.742×10^{-9}	1.262×10^{-7}	2.161×10^{-4}

El material conductor es una capa de plata de 35 μm de espesor, con todas las propiedades térmicas y eléctricas constantes. Se fija a un prisma de base cuadrada de 2,5 mm de lado, con un elemento termoeléctrico de 10 mm de altura. El corte es centrado y de 0,5 mm de ancho, con una profundidad de 8,5 mm. Para el cálculo de un solo pellet, se ha calculado un pellet del mismo tamaño, en este caso sin el recubrimiento ni el corte. Hay que tener en consideración que en este cálculo no se tendrán en cuenta las bandas metálicas. Se ha utilizado un cálculo simple para estimar su funcionamiento [162], ya que la geometría simple no requiere un análisis de diferencias finitas.

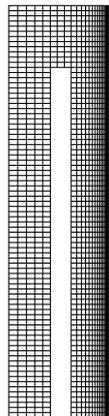


Fig. 279. Malla computacional de la nueva estructura termoeléctrica. Observe la agrupación de células cerca de la capa conductora.

En la Fig. 279 se representa el dominio computacional, con una malla de espaciado variable para capturar adecuadamente los efectos y gradientes cerca de la capa de plata. Esta capa maciza de plata está modelada sin resistencia térmica ni eléctrica de contacto.

La Fig. 280 muestra las condiciones térmicas y eléctricas límite del análisis, con una temperatura fija de 85 °C en el lado caliente y un flujo de calor uniforme en el lado frío, y la referencia eléctrica ajustada en el lado no cortocircuitado. La potencia térmica disipada en el extremo frío es de 50 mW. Por su parte, las condiciones eléctricas de contorno se fijan poniendo en la pata sin metalizar la referencia de tensión 0 V y en la otra pata la entrada de corriente por el circuito resultante. Para todos los casos, la resistencia eléctrica de carga es igual a la resistencia eléctrica interna de cada estructura.

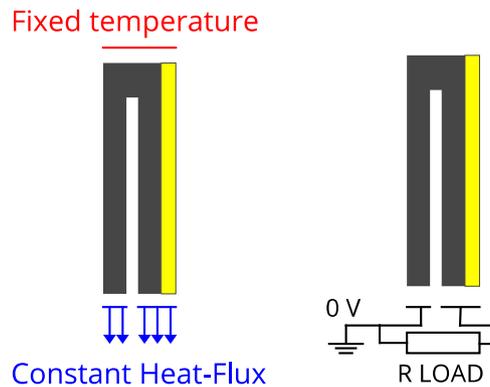


Fig. 280. Condiciones de contorno térmico y eléctrico aplicadas en el cálculo por diferencias finitas.

Cabe señalar que el rectángulo amarillo adjunto a Π en la Fig. 280 es el recubrimiento conductor, y éste no está a escala.

6.2.2.1.- Análisis paramétrico de la estructura en Π .

Existen una serie de parámetros asociados a la estructura en Π cuya modificación puede hacer variar las resistencias internas, tensiones generadas y paso de energía térmica, de tal modo que la eficiencia de conversión de energía térmica en energía eléctrica varíe. Para este estudio paramétrico, los elementos geométricos que variarán serán:

- Espesor del metalizado.
- Posición del corte en el eje transversal.
- Profundidad del corte en el eje longitudinal.

Estos parámetros se modificarán sobre una estructura en Π de base cuadrada de 2.5 mm de lado y una altura de 10 mm. El grosor del corte será para todos los casos de 0.5 mm. En la Tabla 56, se ven los valores porcentuales y absolutos que toman los valores en los cálculos del análisis.

Tabla 56. Variables geométricas a variar en el estudio paramétrico.

Parámetro	Rango porcentual [%]	Valor [mm]
Espesor del metalizado	1.40, 2.80, 5.60	$35 \cdot 10^{-3}$, $70 \cdot 10^{-3}$, $140 \cdot 10^{-3}$
Posición del corte en el eje transversal	33.33, 50.00, 66.67	0.83, 1.25, 1.67
Profundidad del corte en el eje longitudinal	50, 75, 85	5.0, 7.5, 8.5

La combinatoria de estos tres factores junto con los tres estados posibles de cada factor dan un total de 27 casos posibles, que son los que forman parte de este estudio paramétrico. En la Fig. 281 se pueden apreciar las variables geométricas que constituyen los parámetros de este estudio.

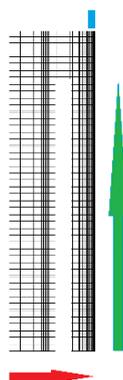


Fig. 281. Direcciones de los parámetros a modificar, en rojo posición del corte transversal, en verde profundidad del corte longitudinal y en azul espesor de la capa de metalización

Para cada estructura, de las 27 que conforman este análisis se ha realizado un cálculo en el cual se han monitorizado las siguientes variables:

- Resistencia interna. $R_{\text{Matched Load}} [\Omega]$
- Tensión a circuito abierto. $V_{\text{OC}} [V]$
- Tensión en bornes de la carga. $V_{\text{RL}} [V]$
- Intensidad circulante. $I_{\text{RL}} [A]$
- Potencia aprovechada en la carga. $P_{\text{RL}} [W]$
- Eficiencia del sistema. $\eta @ R_{\text{ML}} [-]$

6.2.2.2.- Influencia de los parámetros monitorizados

Los resultados completos del cálculo por diferencias finitas para los 27 casos de estudio y con las variables monitorizadas comentadas se pueden ver en la Tabla 57.

Tabla 57. Resultados completos del estudio paramétrico.

Número de ensayo	% d_{corte}	% $e_{\text{metalizado}}$	% h_{corte}	$R_{\text{Matched Load}} [\Omega]$	$V_{\text{OC}} [V]$	$V_{\text{RL}} [V]$	$I_{\text{RL}} [A]$	$P_{\text{RL}} [W]$	$\eta @ R_{\text{ML}} [-]$
1	33.33%	1.40%	50.00%	4.57E-02	4.30E-03	2.10E-03	4.70E-02	1.01E-04	0.202%
2	33.33%	1.40%	75.00%	6.72E-02	6.20E-03	3.10E-03	4.62E-02	1.43E-04	0.286%
3	33.33%	1.40%	85.00%	7.66E-02	6.90E-03	3.45E-03	4.50E-02	1.55E-04	0.310%
4	33.33%	2.80%	50.00%	4.41E-02	4.30E-03	2.10E-03	4.82E-02	1.03E-04	0.205%
5	33.33%	2.80%	75.00%	6.45E-02	6.10E-03	3.10E-03	4.75E-02	1.46E-04	0.290%
6	33.33%	2.80%	85.00%	7.36E-02	6.80E-03	3.40E-03	4.62E-02	1.57E-04	0.313%
7	33.33%	5.60%	50.00%	4.26E-02	4.20E-03	2.10E-03	4.94E-02	1.04E-04	0.207%
8	33.33%	5.60%	75.00%	6.20E-02	6.10E-03	3.00E-03	4.88E-02	1.48E-04	0.294%
9	33.33%	5.60%	85.00%	7.06E-02	6.70E-03	3.30E-03	4.73E-02	1.58E-04	0.315%
10	50.00%	1.40%	50.00%	2.90E-02	2.20E-03	1.10E-03	3.78E-02	4.15E-05	0.083%
11	50.00%	1.40%	75.00%	4.19E-02	3.10E-03	1.50E-03	3.70E-02	5.73E-05	0.115%
12	50.00%	1.40%	85.00%	4.81E-02	3.40E-03	1.70E-03	3.58E-02	6.16E-05	0.123%
13	50.00%	2.80%	50.00%	2.69E-02	2.10E-03	1.10E-03	3.97E-02	4.25E-05	0.085%
14	50.00%	2.80%	75.00%	3.87E-02	3.00E-03	1.50E-03	3.91E-02	5.93E-05	0.118%
15	50.00%	2.80%	85.00%	4.45E-02	3.40E-03	1.70E-03	3.78E-02	6.35E-05	0.127%
16	50.00%	5.60%	50.00%	2.53E-02	2.80E-03	1.40E-03	5.44E-02	7.49E-05	0.149%
17	50.00%	5.60%	75.00%	3.63E-02	3.90E-03	2.00E-03	5.40E-02	1.06E-04	0.211%

18	50.00%	5.60%	85.00%	4.17E-02	4.40E-03	2.20E-03	5.23E-02	1.14E-04	0.228%
19	66.67%	1.40%	50.00%	2.22E-02	1.50E-03	7.73E-04	3.48E-02	2.69E-05	0.054%
20	66.67%	1.40%	75.00%	3.17E-02	2.10E-03	1.10E-03	3.38E-02	3.61E-05	0.072%
21	66.67%	1.40%	85.00%	3.65E-02	2.40E-03	1.20E-03	3.24E-02	3.84E-05	0.077%
22	66.67%	2.80%	50.00%	1.96E-02	2.00E-03	1.00E-03	5.19E-02	5.28E-05	0.106%
23	66.67%	2.80%	75.00%	2.79E-02	2.90E-03	1.40E-03	5.13E-02	7.33E-05	0.146%
24	66.67%	2.80%	85.00%	3.22E-02	3.20E-03	1.60E-03	4.94E-02	7.85E-05	0.157%
25	66.67%	5.60%	50.00%	1.77E-02	3.10E-03	1.60E-03	8.78E-02	1.37E-04	0.272%
26	66.67%	5.60%	75.00%	2.52E-02	4.40E-03	2.20E-03	8.77E-02	1.94E-04	0.386%
27	66.67%	5.60%	85.00%	2.91E-02	4.90E-03	2.50E-03	8.50E-02	2.10E-04	0.419%

Comenzando por el primer parámetro, la resistencia interna, se observa cómo aquellas geometrías con el corte desplazado hacia el lado opuesto a la metalización presentan una mayor resistencia interna. Dentro de cada posición del corte, aquellas con un corte de mayor profundidad presentan una mayor resistencia interna. En cuanto a la metalización ocurre lo contrario, a menor espesor de metalización, mayor resistencia interna.

En cuanto a las tensiones, las geometrías que mayor tensión generan entre bornes son las que tienen el corte desplazado hacia el lado opuesto a la metalización que presentan, además, cuentan con una mayor resistencia interna. Dentro de cada grupo, aquellas con un porcentaje de metalización mayor parecen ser las que generan tensiones más bajas. Por último, a mayor altura de corte, mayor es la tensión generada entre bornes.

La potencia e intensidad desarrolladas en cada caso son fruto de la combinación de resistencia de carga y tensión en circuito abierto de cada estructura. Finalmente, conociendo la potencia eléctrica aprovechada se puede calcular la eficiencia del sistema de aprovechamiento termoeléctrico, que se define como:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{out} + P_{el}} \quad (97)$$

Donde P_{out} es la potencia establecida como condición de contorno, para este estudio, 50 mW.

Los resultados del análisis de la eficiencia se muestran en la Fig. 282.

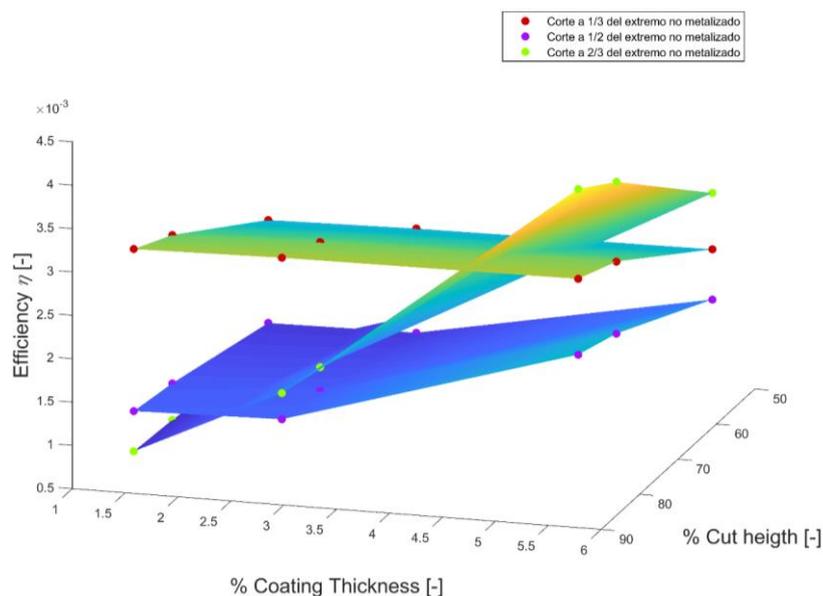


Fig. 282. Eficiencia en función de los tres parámetros de análisis.

Se puede ver que en el caso del corte cerca del extremo no metalizado, la variación del espesor del metalizado tiene poca influencia, así como el porcentaje de altura. Pese a incrementar la eficiencia en valores altos, no supone un gran cambio con respecto a los valores bajos porcentualmente. No ocurre lo mismo en los otros dos casos, donde la variación de parámetros tiende a dispersar los valores de eficiencia, más conforme el corte se acerca al extremo metalizado. Del mismo modo, en valores más elevados de eficiencia, la altura del corte ha tenido un peso mayor.

Los valores máximos de eficiencia se dan en el corte cercano a la metalización cuando la metalización es de mayor espesor, sin embargo, esto no es así conforme se reduce el espesor de la metalización, hasta llegar al punto que, en el caso de menor espesor de metalización, la estructura más eficiente es aquella con el corte cercano al extremo no metalizado.

6.2.2.3.- Análisis de resultados.

Es interesante ver los resultados de la Fig. 282, donde la eficiencia de las distintas estructuras tiene un orden muy distinto según las características que compartan los distintos diseños. Además, es interesante ver cómo los planos de distintas posiciones del corte se intersecan. Esto se debe a que la posición del corte determina en qué medida afecta el espesor de la metalización a la tensión y corrientes generadas.

Aproximar el corte a la metalización hace que la influencia de esta tenga mayor peso. Esto tiene lógica, ya que porcentualmente dentro de esa pata, su aporte es mayor. Es interesante ver cómo para valores donde tiene poco espesor de metalización, la eficiencia es la menor de entre todos los casos. La mayor eficiencia se da cuando la estructura es prácticamente igual a la configuración actual del Unileg clásico que se pretende eliminar.

Es interesante ver también cómo en la estructura donde el corte se hace alejado de la pata metalizada, prácticamente la superficie de eficiencia es uniforme.

Por su parte, el aumento de la altura del corte aumenta la eficiencia en todos los casos, sin embargo, es curioso ver cómo no tiene una influencia demasiado grande. Donde sí tiene influencia esta modificación es en la tensión generada, como parece lógico, al aumentarse el diferencial de temperatura interno.

6.2.2.4.- Conclusiones.

- Se ha realizado un análisis factorial completo de la estructura en Π novedosa.
- Se ha analizado la influencia de tres factores con tres niveles para cada uno en la eficiencia de la estructura.
- Se ve una influencia variable del espesor de metalización en función de la posición del corte.
- La altura del corte puede determinar la tensión generada por cada elemento del módulo, pudiendo realizar módulos de distinta tensión de salida con los mismos datos de partida y mismas metalizaciones.

6.2.3.- Estudio de la estructura en \square con modelo numérico unidimensional

La eficiencia de cálculo (cada cálculo de estado estacionario se ha calculado en menos de 5 segundos) ha permitido realizar cálculos con un conjunto de resistencias que van de 0 a 1,6 Ω , actuando como una carga lineal para la nueva estructura termoeléctrica.

En la Fig. 283 se muestra la salida gráfica de uno de estos cálculos. El campo térmico parece haber sido ligeramente influenciado por la mayor conductividad térmica del recubrimiento conductor, al alcanzar temperaturas más altas en la pata derecha, alrededor de 8 $^{\circ}\text{C}$. En el campo de tensión, debido al flujo de corriente, se puede ver claramente que la caída de tensión en el lado derecho es menor que en el otro lado. De esta manera, se confirma que la nueva estructura funciona casi como un cortocircuito, tal y como se había previsto en la fase de concepto. En cuanto a la contribución del efecto Seebeck, como consecuencia de la distribución térmica, la pata derecha tiene una diferencia de potencial menor en comparación con la izquierda en sus extremos. Esto provoca la creación de un potencial neto en los terminales de la estructura. Cabe destacar que el gradiente de tensión debido al efecto Seebeck también es menor en el tramo cortocircuitado. El campo de tensión resultante muestra una diferencia de potencial en la base del elemento termoeléctrico que corresponde a la tensión aplicada a la resistencia de carga. Este valor es ligeramente superior a 1 mV.

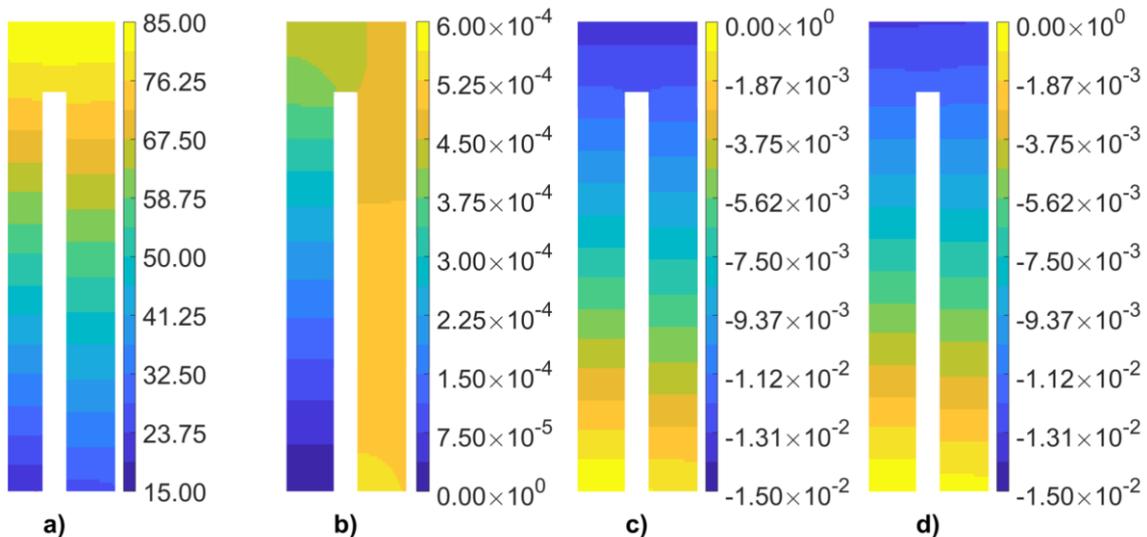


Fig. 283. Resultados del modelo numérico relativos a (a) distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) caída de tensión óhmica (V), (c) tensión de Seebeck (V), y (d) tensión resultante (V) para la resistencia de carga $R_{\text{LOAD}} = 50 \text{ m}\Omega$, con T^{a} fija del lado caliente $T_{\text{HOT}} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, y potencia térmica disipada $Q_{\text{COLD}} = 50 \text{ mW}$. Observe la diferencia en la escala de voltaje entre b) y c), d).

Los resultados de las nuevas estructuras termoeléctricas han sido comparados con los de un solo pellet y esta comparación cuantitativa se muestra en la Fig. 284. Como se puede ver, los perfiles resultantes siguen la misma tendencia para ambos casos. Sin embargo, la eficiencia de esta estructura parece estar varias veces más lejos de los valores alcanzados por un solo pellet. Hay que tener en cuenta que no se ha considerado la degradación del rendimiento causada por las tiras conductoras plegadas en Z. De todos modos, la eficiencia de un sistema Unileg convencional puede alcanzar valores tan altos como el 2,3 % [163], alrededor del 3,5 % en los cálculos, muy por encima del 0,013 % alcanzado por la nueva estructura.

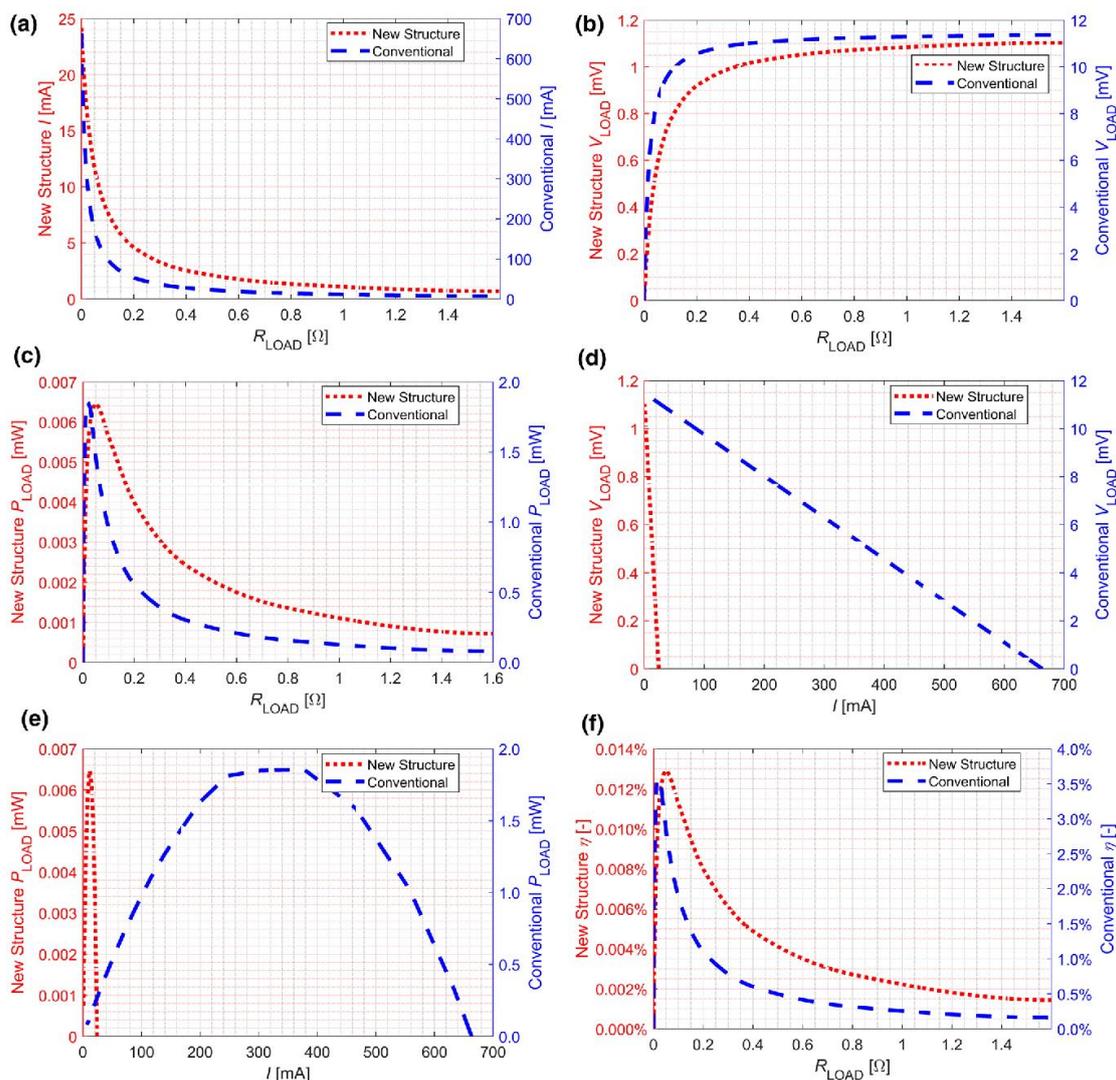


Fig. 284. Comparación de los cálculos de la nueva estructura termoeléctrica y de un solo pellet: (a) corriente eléctrica a través de la carga; (b) potencial eléctrico en la carga; (c) energía eléctrica desarrollada en la carga, con carga de resistencia eléctrica variable; (d) potencial eléctrico en la carga; (e) energía eléctrica desarrollada en la carga, con corriente eléctrica variable a través del circuito; y (f) eficiencia de conversión térmica a eléctrica con carga de resistencia eléctrica variable.

Otra característica interesante que se puede observar en los gráficos es que la resistencia interna de la pata es casi tres veces mayor que la del pellet simple, ya que el valor de pico de la energía eléctrica disipada en la resistencia tiene un desplazamiento con respecto a los valores más altos de la resistencia.

La tensión aplicada a la carga es aproximadamente diez veces menor para la nueva estructura, lo que, en combinación con la mayor resistencia interna, da como resultado una corriente mucho menor, 25 mA en condiciones de trabajo, frente a los 700 mA que se pueden conseguir con el granulado simple.

6.2.4.- Análisis de los resultados.

Como era de esperar, la potencia que se puede desarrollar con esta estructura es inferior a la que se puede conseguir con un solo granulado. La eficiencia de la recuperación de energía se ha reducido en dos órdenes de magnitud. Como muestra la Fig. 283, las contribuciones de la temperatura, la caída de tensión y el efecto Seebeck se analizan por separado a continuación.



En cuanto a la distribución de la temperatura, este campo está fuertemente influenciado por la geometría del corte y la presencia de la metalización. En este análisis el corte se hizo centrado, resultando en dos patas de la misma sección transversal. La metalización es de 35 μm de espesor, por lo que es una sección muy baja respecto a las patas, de 1 mm cada una. A pesar de esta gran diferencia, la mayor conductividad térmica de la plata provoca una disimetría en el campo de temperatura del material termoeléctrico. En caso de reducir la sección de la pata metalizada, ya sea desplazando o aumentando el grosor del corte y desplazándolo, el dispositivo tendería a comportarse como un Unileg convencional. También debe tenerse en cuenta que, si se considera la resistencia de contacto térmico, la distribución térmica podría verse afectada. Se sabe que una de las fuentes de ineficiencias de un Unileg convencional es el alto flujo térmico que pasa a través de la banda metálica. Por lo tanto, se espera que la diferencia térmica de las patas aumente. Las condiciones de contorno impuestas en el cálculo también son responsables de las temperaturas resultantes. Para simplificar el análisis, se ha aplicado la condición límite de Neumann en todas aquellas partes del conjunto que entran en contacto con el lado frío, prescribiendo la cantidad de calor que pasa a través de la estructura (W/m^2). Se cree que emplear una condición de límite Cauchy con una temperatura exterior y un coeficiente de transferencia de calor podría variar aún más el campo térmico de la estructura. De esta manera, se parecería más a un sistema real, por ejemplo, un disipador de calor con aletas que actúa como un lado frío. De la misma manera, un cambio de condición de contorno en el lado caliente podría hacer que el flujo térmico varíe. Se espera que estos cambios produzcan un aumento en la temperatura del lado metalizado de la pata. La elección de estas condiciones límite, a pesar de no ser ideales, se han elegido porque se considera que es la mejor manera de representar los sistemas de generación de energía en la vida real. Estos cambios podrían tener un efecto directo en la distribución del Seebeck a lo largo de la estructura.

La distribución de Seebeck no parece muy afectada por la presencia de un material con un coeficiente Seebeck asignado de valor cero. El valor de los extremos de las patas varía en proporción a la variación del campo de temperatura. El campo eléctrico de cada pata es opuesto, y es la diferencia entre ellos la que crea una diferencia neta de potencial. Cualquier aumento en el voltaje resultante aumentará la eficiencia de la estructura propuesta. El análisis de dependencia de la malla realizado en este trabajo ha demostrado que la fuerza electromotriz resultante es sensible a la densidad de la malla en el área metalizada. Es también este parámetro el que, junto con la resistencia de carga y la resistencia interna, sirve para determinar la corriente que fluye a través de los terminales de la estructura. Por lo tanto, es de particular importancia realizar una agrupación de células computacionales en la metalización y en el área donde entra en contacto con el material termoeléctrico.

Por último, en cuanto a la caída de tensión debida al flujo de corriente, se puede decir que, en comparación con la baja tensión generada por el efecto Seebeck, su efecto sobre la potencia total generada no es tan grave. Sin embargo, la división de la pata en dos mitades hace que la resistencia interna aumente, ya que la sección eléctrica a través de la cual debe fluir la corriente disminuye. De esta manera, la caída de tensión es mayor que en un solo pellet de mayor sección. La metalización prácticamente cumple con la teoría de causar un cortocircuito eléctrico. Gracias a este efecto, se evita una caída de tensión aún mayor, ya que la longitud a recorrer por el fluido eléctrico aumentaría en ausencia de esta capa. Al igual que en la sección térmica, tener en cuenta la resistencia de contacto de la capa de plata podría tener implicaciones de rendimiento, ya que la resistencia al flujo de corriente aumentaría. Por lo tanto, también debería ser objeto de estudios futuros para encontrar la proporción óptima entre las secciones de patas para maximizar la recuperación de energía. De todos modos, es posible que la optimización de este parámetro sea un tema particular de cada aplicación.

A la hora de pensar en el desarrollo de nuevos materiales y módulos, generalmente se da prioridad a las mejoras de eficiencia, pero hay aplicaciones, principalmente de grado industrial, donde se priorizan otras características como la robustez y el coste, quedando la eficiencia relegada a un segundo plano, siempre que el dispositivo TEG genere la energía necesaria para la aplicación.

Aunque el nivel de uso energético de la estructura analizada en las condiciones propuestas es claramente insuficiente para cualquier aplicación práctica, el hecho de que funcione según la fase conceptual permite visualizar ciertas ventajas de este diseño sobre los diseños convencionales. En este sentido, el diseño propuesto incorpora una serie de características que pueden ser discutidas, con el objetivo de permitir mejoras en costes y robustez, ya que los cálculos indican que la nueva estructura teóricamente permite la aparición de una diferencia neta de potencial entre las patas de la estructura.

El uso de un solo material permite que las distorsiones geométricas debidas a los efectos de la expansión no supongan una tensión térmica tan alta como la que se produce en los módulos termoeléctricos convencionales, donde dos materiales diferentes sufren contracciones y dilataciones de diferente magnitud al ser sometidos a ciclos térmicos, lo que provoca el fallo y la destrucción del módulo. La ausencia de soldadura en el lado caliente es uno de los factores que influyen en la mejora esperada de la robustez, ya que la presencia de soldadura significa una resistencia al contacto que se deteriora tanto con la exposición continua a altas temperaturas [164] como con el estrés debido a los ciclos térmicos y al desajuste de los coeficientes de expansión térmica de los distintos componentes y materiales del módulo [165]. Si bien esto requerirá una validación experimental en pasos futuros.

La principal barrera para la producción de módulos termoeléctricos económicos de alta temperatura no radica en el material, sino en los costes del sistema, los intercambiadores de calor y las placas de cerámica [84]. El costo de los módulos de generación de alta temperatura es generalmente demasiado alto para aplicaciones comerciales, siendo posible su aplicación en nichos específicos menos condicionados por restricciones de precio. Aparte de los materiales TE utilizados, la mayoría de los módulos TE se montan manualmente, lo que requiere, además, materiales y herramientas de soldadura específicos para soportar las altas temperaturas de montaje y funcionamiento. El mecanizado del Bi_2Te_3 puede ser un problema de difícil solución, ya que, si bien en la actualidad el material experimenta procesos de mecanizado para la fabricación de pellets, se produce un gran defectivo, y para estructuras más complejas que un pellet, como la que se pretende en el presente apartado, puede suponer un verdadero inconveniente. El potencial del material objetivo, $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, para ser mecanizado con métodos conocidos y estandarizados en la industria como el fresado, taladrado o aserrado que se explican más adelante, pero se avanza que es interesante y que la estructura propuesta puede adoptar formas más complejas: desde prismáticas hasta coronas circulares. Además, se pueden obtener múltiples estructuras termoeléctricas interconectadas a partir de un solo bloque de material, como puede verse en la Fig. 285. Esto tendría un doble efecto beneficioso en el módulo. Sería más reproducible gracias a la menor variabilidad en las características de los elementos, ya que todas las estructuras forman parte del mismo bloque de material termoeléctrico, y, además, el módulo ahorraría un gran número de soldaduras e interconexiones, que son fuente de errores de fabricación e ineficiencias en el funcionamiento.

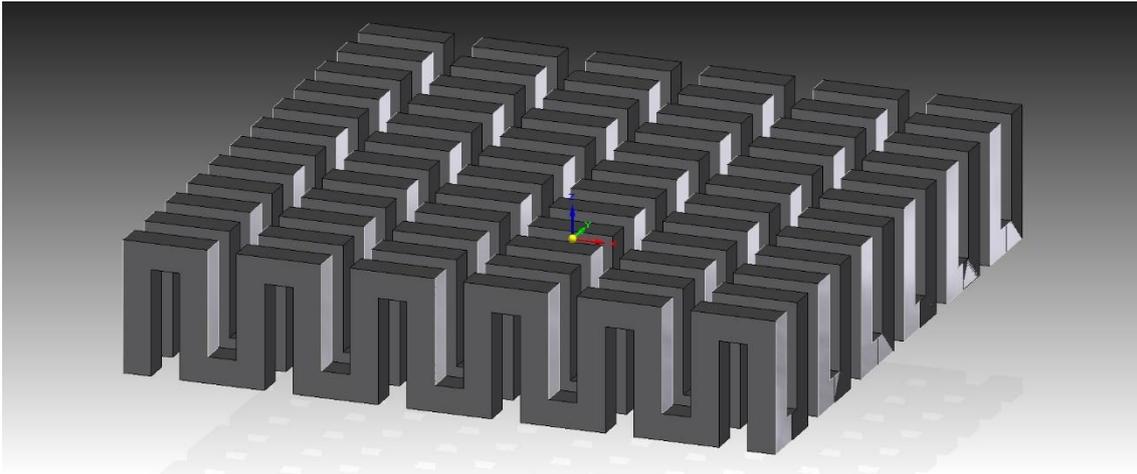


Fig. 285. Representación de módulo termoelectrico hecho de un solo bloque de material termoelectrico mecanizado. Las caras más claras representan las patas recubiertas de plata.

Si las estructuras se fabrican y sueldan individualmente para formar un módulo, sólo se necesita la mitad de la soldadura en comparación con un módulo convencional, y menos que un módulo Unileg convencional. La ventaja respecto a este último radica en que todas las juntas podrían realizarse en el lado frío del módulo, por lo que se pueden emplear pastas de soldadura a menor coste y de menor temperatura de fusión, y materiales de soldadura comerciales para el lado frío, permitiendo temperaturas de soldadura superiores a 250 °C, así como hornos de *reflow* convencionales muy utilizados en la industria electrónica. Asimismo, las herramientas necesarias trabajan en el mismo rango de temperatura, lo que permite aprovechar los procesos de ensamblaje electrónico automático convencional, maduro y probado para la fabricación de módulos de alta temperatura de forma automática. Esta forma de fabricación permitirá cubrir nichos de aplicación con un mayor volumen de mercado que las soluciones actuales.

Obviamente, en cualquier comparación del rendimiento de un dispositivo o módulo termoelectrico real contra el material puro o el comportamiento ideal, el dispositivo real siempre empeorará la respuesta. Esto se debe a la aparición de resistencias de contacto eléctricas en todos los procesos de montaje.

Lemonnier y otros [152] definen el factor de fabricación (MF) que representa la calidad de fabricación del dispositivo según la ecuación (93). En un módulo real aparecen las resistencias de contacto ($R_{contacto}$) entre el material termoelectrico y el metal, y la resistencia interna del módulo (R_{Int}) viene dada por la relación $R_{Int} = R_{Ideal} + R_{contacto}$. Cuanto menor sea la resistencia de contacto, mayor será la potencia eléctrica generada, y la potencia generada será máxima $P_{Max} = \frac{1}{4} E_o R_{int}$, cuando haya carga adaptada $R_L = R_{Int}$.

En una comparación realizada por Lemonier et al [152], se analizan los MF de los módulos de óxido previamente publicados. Los resultados para un módulo de tipo N-P y un módulo de tipo Unileg dan un MF de 0,15.

Basado en los resultados teóricos, sí se puede obtener una medida de lo que implica la reducción de la resistencia interna de la nueva arquitectura propuesta respecto al ideal. En la Fig. 284 se puede ver el valor máximo de la potencia generada para la nueva estructura y la convencional. Usando estos valores de resistencia de carga y asignando los valores de $R_{ideal} = R_{convencional} = 17,31 \text{ m}\Omega$ y $R_{int} = R_{estructura \Pi} = 47,29 \text{ m}\Omega$, da un valor de $MF = 0,36$.

Aunque este valor es ligeramente superior a los obtenidos para un módulo Unileg como el realizado por Lemonier et al., dista mucho de ser el ideal, aunque hay que tener en cuenta las características de coste y robustez que se pueden conseguir para evaluar la validez de la nueva estructura en determinadas aplicaciones.

Por otro lado, el módulo de Lemonier et al. [152] fue sometido a cinco ciclos de 10 horas con una diferencia de temperatura de 360 K y una temperatura caliente de 760 K, por lo que entre los próximos pasos se prevé evaluar el deterioro de la MF de la nueva estructura con ciclos térmicos y operación continua a alta temperatura.

6.2.5.- Patente Europea.

Se ha realizado una solicitud de concesión de patente europea que tiene como número de aplicación EP18382462. A este dispositivo visible en la Fig. 286 se le ha dado el nombre de "Módulo termoeléctrico". Este módulo termoeléctrico está orientado a la transformación de energía mediante el uso del efecto termoeléctrico. Mediante los cortes y metalizaciones visibles en el componente, se consigue crear entre los denominados segmentos de referencia una zona neutra, tal que, en caso de existir una diferencia de potencial, solo una de las secciones, llamadas "patas", dados o *pellets* a lo largo de toda la tesis, genere tensión y por consiguiente el módulo genere una tensión neta.

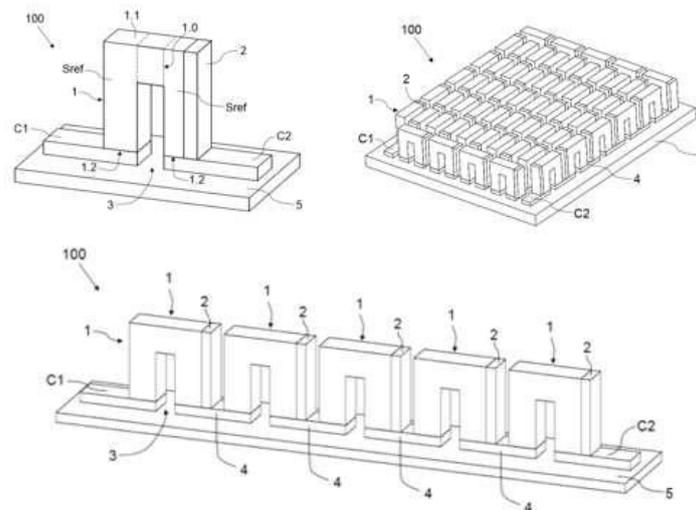


Fig. 286. Imágenes de módulos termoeléctricos con las estructuras en □ de la patente EP18382462.

Esta patente, aporta una gran sencillez frente a otras soluciones constructivas, la metalización del módulo termoeléctrico y la realización de cortes, pudiendo crear grandes módulos teóricamente de un modo sencillo.

Dentro de la exposición detallada de la invención, se muestran las tres topologías principales que se espera lograr con esta invención. La primera de estas topologías es propiamente la estructura en □. Esta es la unidad básica que conforma el resto de las variantes, como son la circular y la estructura en □ con cortes perpendiculares.

Por parte del evaluador no se ha encontrado ninguna estructura Unileg como la propuesta en esta tesis. A la fecha de entrega de esta tesis, el evaluador ha concedido algunas reivindicaciones que pueden derivar en dos patentes de menor alcance si se aceptan. No obstante, se han realizado las pertinentes alegaciones, por entender que existe la posibilidad, para que se acepten la totalidad de las reivindicaciones y la protección sea más amplia como se esperaba en un inicio.

El examinador no pone objeciones a las características de las reivindicaciones 8 a 10 y 12, por lo que, a priori, parece que aceptaría una patente limitada a las características de alguna de estas reivindicaciones.

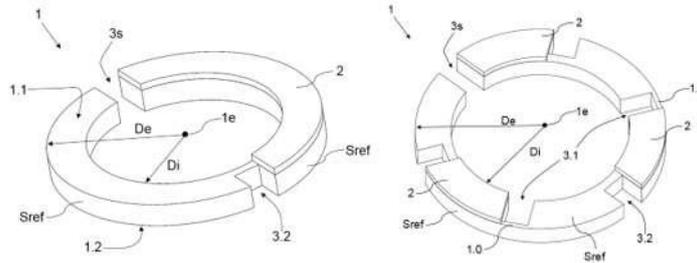


Fig. 287. Imágenes de módulos termoeléctricos circulares con cortes de la patente EP18382462.

6.3.- Potencial de aplicación del nuevo material óxido $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$.

Tal como se pudo ver en el estado del arte sobre materiales óxidos desarrollado en el capítulo 2, los óxidos resultan un material de especial interés para aplicaciones industriales y de línea blanca donde priman otros aspectos como la robustez, el coste, la mecanizabilidad y el cumplimiento de la normativa RoHS, más allá del interés por la eficiencia. Por este motivo, y con idea de encontrar una alternativa no solo al proyecto objeto de esta tesis, sino a otros futuros que puedan llegar, se ha acometido también el desarrollo de un material óxido novedoso con las propiedades que se detallan a lo largo de este apartado.

Con el objetivo de poder medir las características termoeléctricas del material, se han fabricado unas muestras que permitan, mediante los procedimientos adecuados, ser medidas y cuantificar las variables que influyen en su generación termoeléctrica.

Como en el resto de máquinas térmicas, la eficiencia máxima ideal tiene por límite la de un ciclo de Carnot, por lo que la eficiencia de un elemento termoeléctrico se puede ver como la de un ciclo de Carnot multiplicado por un factor de eficiencia termoeléctrico que es función de ZT.

$$\eta_{\text{Carnot}} = (T_h - T_c)/T_h \quad (98)$$

Desafortunadamente, α, ρ, κ suelen estar fuertemente interrelacionados, por lo que aumentar el valor de ZT es muy complicado, a pesar de los grandes esfuerzos realizados por la comunidad científica internacional, especialmente en los últimos 20 años. Como ha quedado anteriormente clarificado, las temperaturas de trabajo pueden ser adecuadamente utilizadas (altas temperaturas del foco caliente), siempre que los materiales utilizados lo permitan, para dar lugar a altas eficiencias de conversión. De esta forma, la aparente pérdida de eficiencia debida al bajo valor de ZT puede ser, al menos, compensada con un aumento de la diferencia de temperatura aplicable a los materiales, como se puede observar en la Fig. 288.

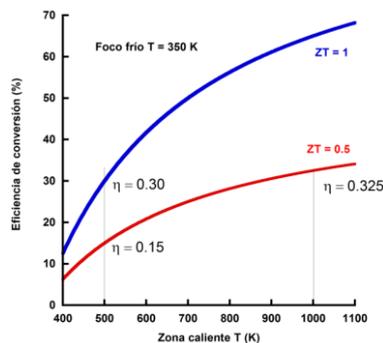


Fig. 288. Eficiencia máxima de generación de un material TE en función del valor de ZT y la temperatura del foco caliente, manteniendo el foco frío a temperatura constante de 350 K.

De esta manera, incluso con materiales con $ZT < 1$, es posible tener una eficiencia de conversión mayor que en materiales que trabajen a menores temperaturas. Estos resultados, claramente apuntan a una posibilidad real de aplicación de materiales termoeléctricos cerámicos ya que, aunque sus valores de ZT están aun relativamente lejos de los valores de ZT de los materiales intermetálicos, estos últimos no pueden trabajar a temperaturas tan elevadas.

Los estudios realizados sobre el $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ han permitido determinar su estructura cristalina, similar a la encontrada en los materiales termoeléctricos basados en el óxido de cobalto [166]. Debido a que resulta ser una estructura en capas, con gran anisotropía cristalográfica, que se ve reflejada en la anisotropía de las propiedades termoeléctricas, el alineamiento de los granos en estos materiales es uno de los retos más importantes de cara a producir materiales con prestaciones termoeléctricas mejoradas. Para su realización, se han estudiado numerosas técnicas, como *spark plasma sintering* (SPS) [167], *laser floating zone melting* (LFZ) [168], *templated grain growth* (TGG) [169], o *hot uniaxial pressing* [170]. Sin embargo, el coste de producción en los dos primeros métodos debido a los sistemas requeridos, y en el tercero debido al tiempo de procesado necesario, los hacen inviables para su aplicación industrial. El *hot uniaxial pressing*, en cambio, es una técnica bien conocida y utilizada en numerosos procesos en la industria cerámica, lo que la hace adecuada para una producción masiva de material.

Por otro lado, para mejorar las prestaciones termoeléctricas, estas cerámicas se dopan, a fin de modificar la concentración y movilidad de portadores [171]; la aplicación de técnicas de *hot uniaxial pressing*, por su lado, logra materiales de alta densidad, y, por lo tanto, de menor resistividad eléctrica. Este último proceso es imprescindible cuando se buscan materiales con la fase $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ y alta densidad, ya que un proceso de sinterizado clásico no es adecuado para obtener estas características, por lo que han de utilizarse procesos en varias etapas [172], lo que encarece el proceso de fabricación.

En el proceso de *hot uniaxial pressing*, los precursores se suelen conformar en frío, tras una descomposición de los carbonatos metálicos, por prensado uniaxial, obteniéndose las preformas en verde con geometrías sencillas. Estas preformas son entonces sinterizadas bajo presión uniaxial dando lugar a la fase $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ con densidades próximas a la teórica. Este conformado, además, es ya utilizado en diferentes procesos de fabricación en la industria cerámica. De todo ello se deduce que el proceso es sencillo, relativamente rápido, y que fácilmente podría escalarse a la producción industrial una vez se optimizara el proceso (temperaturas y tiempos) para estos materiales.

En este apartado se muestra la preparación de materiales cerámicos termoeléctricos masivos intrínsecamente nanoestructurados, con una gran orientación de grano y propiedades termoeléctricas mejoradas. Se realizará combinando métodos de síntesis y técnicas escalables de consolidación y texturado en colaboración con la Universidad de Zaragoza (Unizar). Además, estos materiales serán estudiados extensivamente desde el punto de vista termomecánico en colaboración con la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea (EPS-MU), y ensamblados en módulos para generación eléctrica a elevadas temperaturas. Finalmente, se evaluarán la eficiencia de conversión y las características mecánicas, así como aspectos de durabilidad (tanto en uso continuado como en ciclos térmicos) de estos módulos.



6.3.1.- Propiedades del nuevo material.

6.3.1.1.- Proceso y propiedades de partida.

El proceso actual de preparación de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ prensado en caliente consta de 10 pasos principales como se muestra a continuación:

1. Pesado y mezcla de óxido de cobalto, carbonato de calcio y carbonato de estroncio en las proporciones adecuadas. Se parte de los siguientes polvos comerciales, en las cantidades que se indican para cada preparación (unos 25 g del producto final).
 - CaCO_3 : 16.3244 g
 - SrCO_3 : 0.5752 g
 - CoO : 16.6845 g
2. Estas cantidades se pesan y se introducen en un recipiente de un molino de bolas de ágata donde se realiza la molienda durante 30 minutos a 300 rpm y en medio acuoso. Además de los polvos, se introducen también unas 20 bolas de ágata de 10 mm de diámetro, se añade agua y se cierra el recipiente con una tapa de ágata asegurando la estanqueidad con una junta. El recipiente cerrado se introduce en el sistema de molido.



Fig. 289. Elementos del molino de bolas de ágata

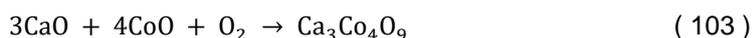
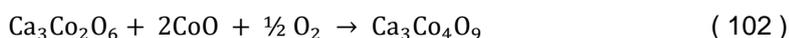
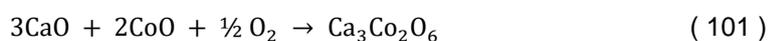
3. Secado de la suspensión bajo radiación infrarroja. Se retira la suspensión, se seca y se introduce en el horno a 750 °C durante 12 h para descomponer los carbonatos de Ca y Sr.
4. Una vez frío, se muele de forma manual en un mortero de ágata para deshacer los aglomerados. En este proceso se observa una pérdida de peso de un $20.44 \pm 0.05 \%$, que es menor a la máxima posible, debido a las reacciones:





Fig. 290. Mortero manual de ágata

5. Se realiza un segundo tratamiento térmico a 800 °C durante 12 h de mantenimiento en crisol de alúmina para terminar la descomposición de los carbonatos. En este tiempo, se observa que el peso (que debería disminuir al perder CO₂), aumenta en 1.11 ± 0.04 % (la pérdida total en los dos procesos es del 19.51 ± 0.03 %). Esto es debido a que hay una pérdida de CO₂ (que disminuye el peso), pero se producen una o varias de las reacciones siguientes, que cogen oxígeno y el peso aumenta:



6. Se vuelve a moler de forma manual el producto. La descomposición de todos los carbonatos después de este paso se comprueba con el diagrama FTIR (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier), donde se ve que la absorbancia es prácticamente cero y no aparecen los picos asociados a los carbonatos.

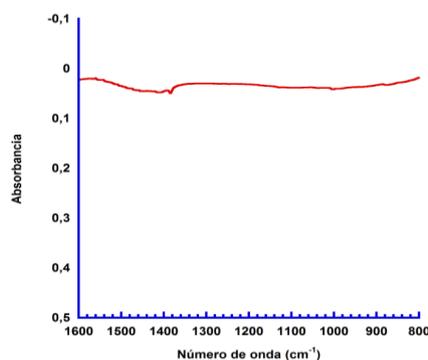


Fig. 291. Diagrama FTIR del polvo molido sin picos asociados a los carbonatos.

7. Este polvo se prensa en frío uniaxialmente en forma de discos de aproximadamente 25 mm de diámetro y 10 g de masa, (depende de la cantidad del producto) a unos 250 MPa.
8. Estos discos se introducen entre dos láminas de Ag, que se cubren exteriormente con una capa de alúmina (Al₂O₃) y se ponen entre dos discos de alúmina. El conjunto se introduce en un horno que se calienta a 850 °C y, al alcanzar la temperatura, se pone una presión de unos 30 MPa durante 14 h. Transcurrido el tiempo, se libera la presión y se deja enfriar en el horno.
9. Finalmente, se separan las láminas de Ag de los discos de alúmina y se realiza un mecanizado (fresado) para eliminar la Ag y el polvo de alúmina, y dejar las superficies lisas y paralelas.
10. Se realizan los cortes a medidas adecuadas según la aplicación.



6.3.1.2.- Optimización del proceso de fabricación.

Mediante el proceso anterior se ha desarrollado un material termoeléctrico tipo P basado en el $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, con propiedades muy prometedoras. Sin embargo, el proceso de preparación de partida, si bien es adecuado a nivel de laboratorio, posee ciertos aspectos mejorables que podrían llevar a una disminución de los tiempos y/o temperaturas de los tratamientos térmicos necesarios para obtener el producto final.

El sistema actual de fabricación resulta excesivamente largo para su industrialización, pues implica, entre otros procesos, dos tratamientos térmicos de 12 h de mantenimiento cada uno, así como un prensado uniaxial en caliente de otras 14 h. Por otro lado, la reactividad del material exige la aplicación de dos láminas de plata, que luego han de retirarse; sería deseable sustituir la plata por otro material menos caro.

Entre las vías que se explorarán, cabe destacar el molido por atrición de los precursores (CoO y CaCO_3), que lleva a una gran reducción del tamaño de partícula inicial, comparado con los obtenidos por los procesos de molienda clásicos.

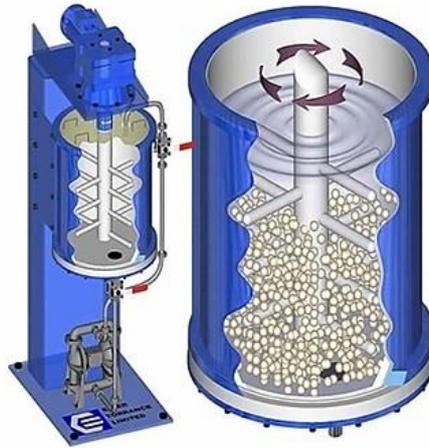


Fig. 292. Molino de atrición

Este proceso de molienda ya se utiliza a nivel industrial, con lo que no habría un problema añadido para su escalado. Sin embargo, esta reducción de los tamaños de grano se refleja en una mayor reactividad de los precursores, permitiendo la utilización de temperaturas y tiempos de calcinación menores a los utilizados previamente en el laboratorio para descomponer los carbonatos. Además de que en trabajos previos se ha encontrado que ya en el primer tratamiento los carbonatos desaparecen cuando el tamaño de partícula inicial es suficientemente pequeño, también dan lugar a una fase termoeléctrica pura, lo que es difícil de obtener cuando se utiliza un molido clásico. Además, se analiza también la reducción de los tiempos y/o temperaturas necesarias para texturar y densificar el material final.

Los parámetros que se optimizarán serán las duraciones de los diferentes tratamientos térmicos de descomposición de los carbonatos para reducirlos al mínimo necesario y descomponer totalmente el CaCO_3 , utilizando diferentes temperaturas. Por otro lado, se estudiará la relación presión-temperatura-tiempo en el proceso de texturado y la densificación del material final para tratar de disminuir el tiempo de procesado tratando, además, de disminuir la temperatura de tratamiento. Todos estos procesos de optimización se realizarán teniendo en cuenta una reducción de los costes de producción para un escalado a nivel industrial.

A fin de comprobar la validez del nuevo proceso de fabricación, se obtuvieron probetas para el análisis siguiendo el nuevo camino.

Para ello [161], se mezclaron y trituraron durante 30 minutos polvos comerciales en agua en las mismas proporciones que en el proceso inicial; en lugar de triturar a mano, se hizo utilizando un molino de atrición. Se secaron las mezclas mediante radiación infrarroja y se rompieron a mano los aglomerados para terminar calcinando la mezcla.

La disminución del tamaño de partícula facilitado por la molienda por atrición permitió calcinar a 850 °C (ligeramente superior al sistema tradicional) durante solo 1 h, frente a las 12 h necesitadas anteriormente [171].

La pérdida de peso en el proceso es similar a la que se daba anteriormente (19,5 %), por lo que se estima que se ha logrado descomponer los carbonatos de calcio y estroncio, y se han formado las fases $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ y $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, como parecen indicar los espectros FTIR que se muestran a continuación:

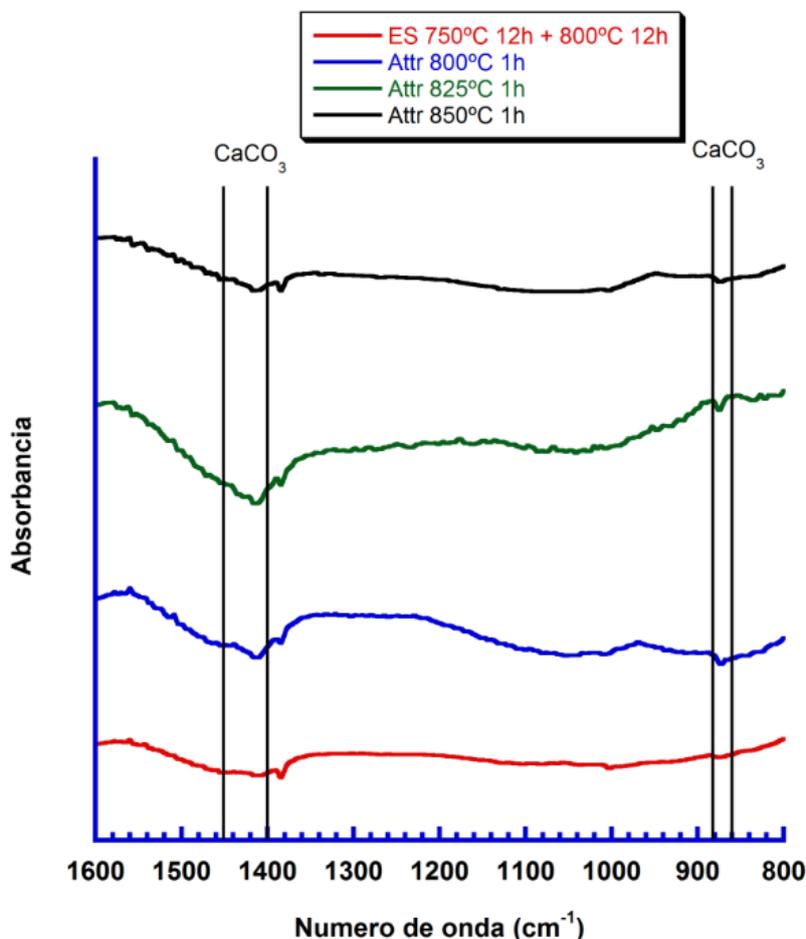


Fig. 293. Espectros FTIR de los materiales analizados. En rojo, el correspondiente al proceso de laboratorio.

Se muestra en la Fig. 294 la comparativa entre el polvo obtenido por el sistema tradicional y por el de atrición.

El polvo calcinado se compactó uniaxialmente en frío a 250 MPa en forma de discos. Los verdes fueron entonces compactados en caliente de forma uniaxial, a 800-850°C y 30-50 MPa durante 1 h.

Entre la pastilla y los útiles se colocó una lámina de plata, que protegía a ambos de reacciones a alta temperatura, y además actuaba como desmoldeante para facilitar la extracción de la pastilla.

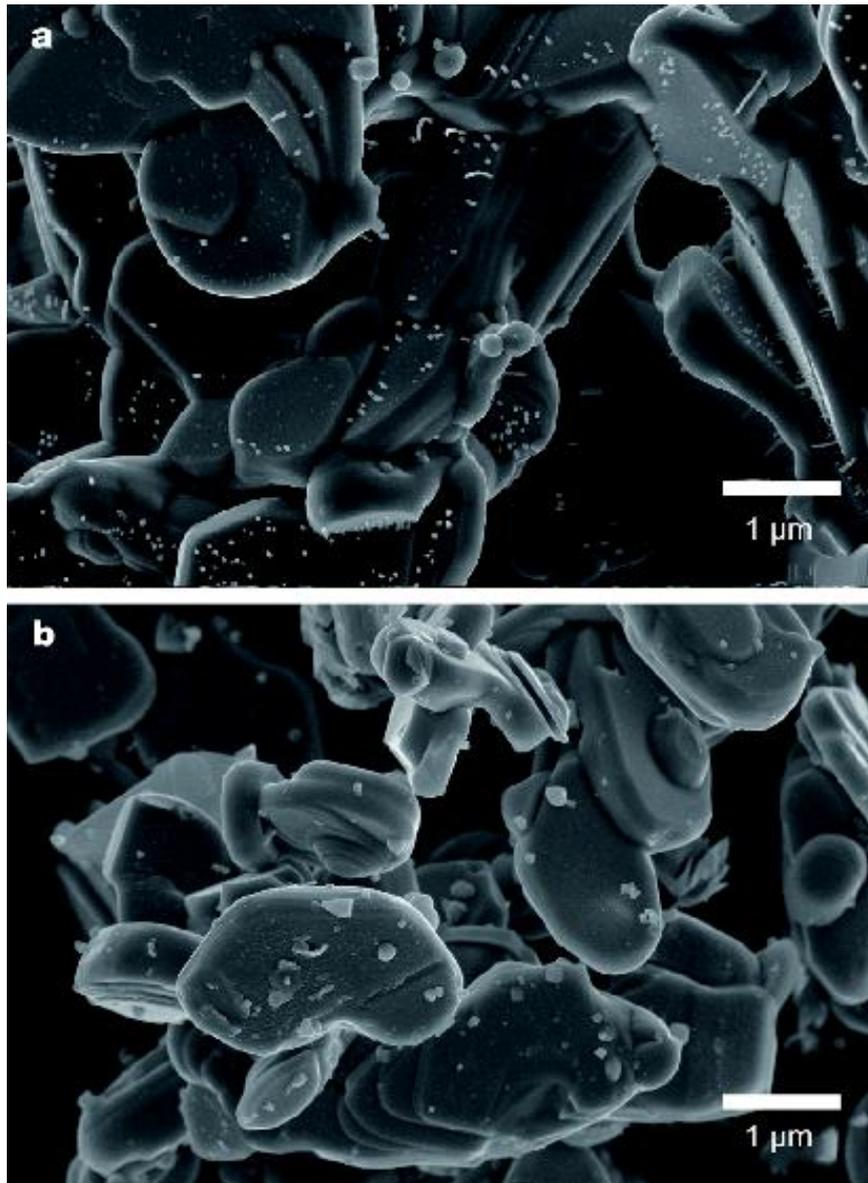


Fig. 294. Polvo calcinado a) sistema tradicional de molienda y 12 h a 750 °C más 12 h a 800 °C; b) polvo molido por atrición tras 1 h a 850 °C [161].

6.3.1.3.- Fabricación de muestras de material TE

La preparación se terminó con el fresado de las caras superior e inferior, a fin de retirar la plata adherida y además conseguir caras planas y paralelas.

De los discos así obtenidos se recortaron probetas para su caracterización. Para ello, se utilizaron coronas adiamantadas del diámetro adecuado. En su caso, se ajustó el diámetro al espacio disponible en el equipo por pulido del perímetro.

Los discos obtenidos se han fresado a fin de retirar la plata utilizada como antimoldeante y de obtener caras paralelas; seguidamente, se han cortado a las dimensiones adecuadas para cada caracterización. Además, algunas muestras se han utilizado para un proceso de envejecimiento a alta temperatura (hasta 1536 h a 850 °C).

Para el corte de las muestras se ha utilizado una cortadora de precisión Bühler Isomet 1000 con disco de diamante, en el caso de los cortes rectos, y con una corona adiamantada acoplada al taladro en el caso de las muestras circulares.



Fig. 295. Corte de muestras rectangulares

En cuanto a las muestras para la nueva configuración de módulo con estructura en \square , se han utilizado diferentes técnicas para su fabricación que se explican más adelante.

6.3.1.4.- Resultado y comparación de materiales

Se han ensayado los dos tipos de materiales termoeléctricos, los del nuevo proceso y los del de partida, teniendo ambos la misma base, un óxido de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ con elementos dopantes tal que se convierte en un semiconductor del tipo P.

La diferencia entre los dos materiales radica en el proceso de fabricación. En el proceso nuevo, el tiempo de fabricación es mucho menor, pasando de 24 a 2 horas. Esta reducción del tiempo, sin embargo, puede tener repercusión en la durabilidad del dado de material termoeléctrico.

Los ensayos realizados tienen como objetivo determinar si la durabilidad del material ha empeorado, se ha mantenido o incluso mejorado.

La observación microestructural en Microscopio Electrónico de Barrido no muestra diferencia entre ambos tipos de material

La evolución de estas características será indicador de cómo de óptima ha sido la mejora del proceso de fabricación del material en lo que a durabilidad y robustez se refiere.

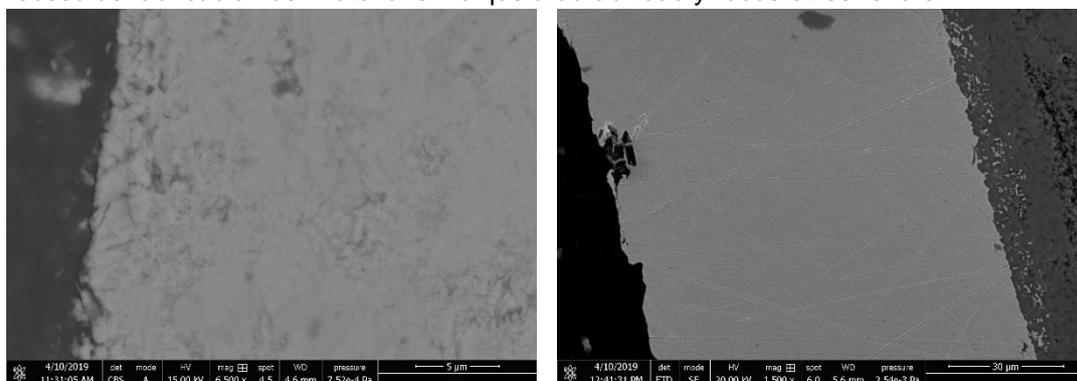


Fig. 296. Izquierda, material obtenido según proceso inicial; derecha, material obtenido según el proceso acortado



6.3.1.5.- Propiedades Termo-mecánicas

6.3.1.5.1.- Calor específico

El calor específico es una medida de la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de 1 gramo de una sustancia en 1 K. A temperatura ambiente varía entre 0,1 y 5 J/g·K; así, por ejemplo, para la alúmina (un cerámico) $C_p = 0,895$ J/g·K, mientras que para el plomo (un metal) es de 0,129 J/g·K, y para el poliestireno es de 1,3 J/g·K. Esta propiedad, en la mayoría de las sustancias, aumenta con la temperatura.

Uno de los métodos más usuales para medirlo es el de calorimetría de barrido diferencial; DSC por sus siglas en inglés. Se colocan dos muestras (ver Fig. 297), una del material de estudio y la otra de una sustancia referencia, en dos hornos independientes, y se calientan simultáneamente, de forma que siempre tienen ambas la misma temperatura; se mide la potencia necesaria para mantener cada temperatura y se compara.



Fig. 297. DSC utilizado, junto a las muestras analizadas

En los ensayos, la sustancia de referencia fue una muestra de zafiro, de características térmicas conocidas, inerte y que no sufre cambios físicos ni químicos en el intervalo de temperaturas en que se realizó la medición, entre temperatura ambiente y 850 °C.

Se realizaron las medidas sobre dos muestras diferentes del mismo material, tanto sobre el termoelectrónico original como sobre el obtenido tras atrición y en la Fig. 298 se muestran los resultados obtenidos.

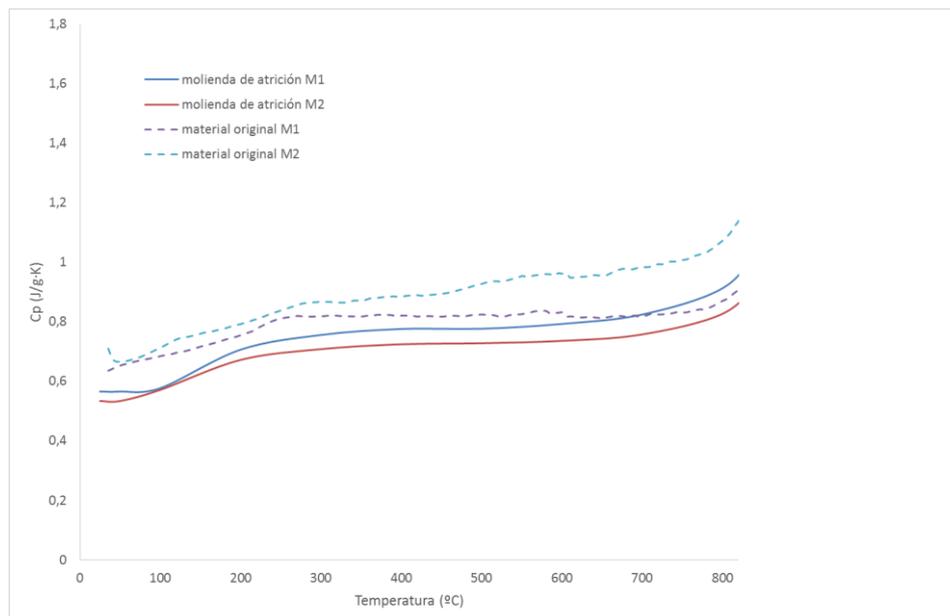


Fig. 298. Calor específico de las muestras de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ a diferentes temperaturas

6.3.1.5.2.- Difusividad térmica

La difusividad térmica, por su parte, se midió en un aparato Linseis LFA 1000 Laser Flash siguiendo la norma ASTM E1461.

Colocando la muestra en un horno que se mantiene a determinada temperatura, se irradia un pulso de energía conocida contra la parte trasera de la muestra, con lo que aumenta la temperatura homogéneamente en la superficie de la muestra; este aumento de temperatura es medido con un detector de IR de alta velocidad.

A partir de la temperatura y el tiempo, y tras medir el espesor, se puede obtener la difusividad.

$$\alpha = 0,13879 L^2 / t_{1/2} \quad (104)$$

L = Sample height

$t_{1/2}$ = Half time rise

α = Thermal Diffusivity

El espesor se obtuvo por medida directa a temperatura ambiente, que luego se corrigió con la dilatación térmica, que se midió como se describe más adelante.

Los resultados de difusividad son los de la Fig. 299.

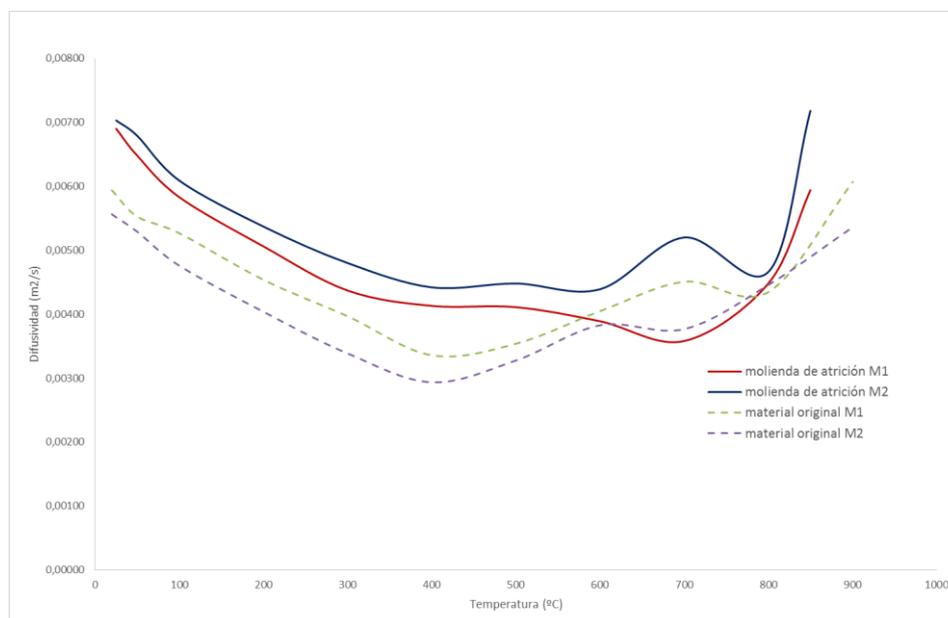


Fig. 299. Medidas de difusividad de las muestras de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ a diferentes temperaturas

6.3.1.5.3.- Dilatación térmica

Se midió la dilatación térmica en un dilatómetro vertical Linseis L75 sobre muestras de caras paralelas y con un diámetro de 6mm. La Fig. 300 muestra los valores obtenidos.

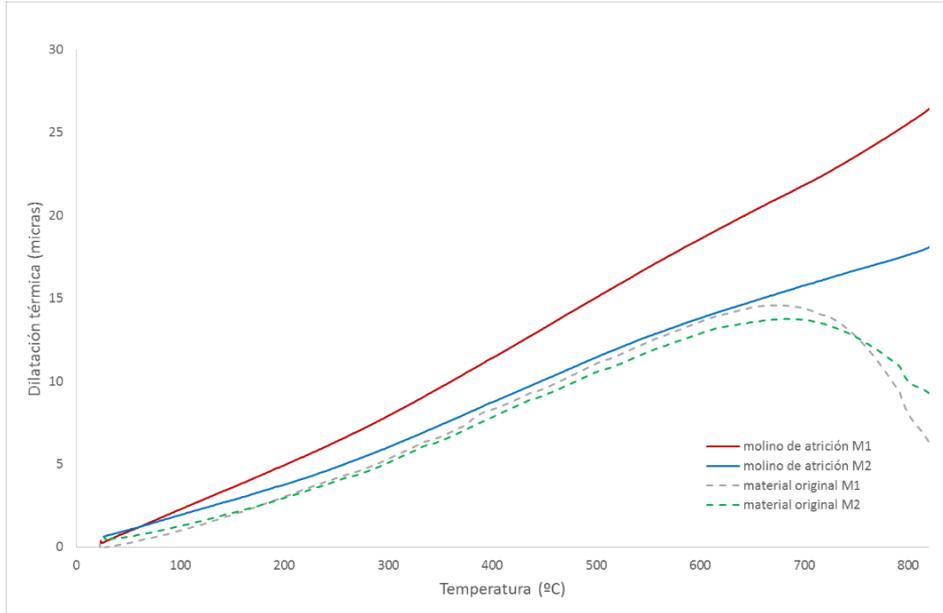


Fig. 300. Dilatación de las muestras de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ a diferentes temperaturas.

6.3.1.5.4.- Conductividad térmica

Finalmente, la conductividad térmica $\lambda(T)$ se calculó a partir de la difusividad, el calor específico y la densidad (corregido para cada temperatura considerando la dilatación):

$$\lambda(T) = \alpha(T)C_p(T)\rho(T) \quad (105)$$

α = Thermal Diffusivity

C_p = Specific Heat

ρ = Density

La densidad, medida por el método de Arquímedes ha dado un valor de $4.52 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, que corresponde a un 96.6 % de la densidad teórica. Se comprueba que la dispersión de las medidas es muy baja, lo que parece indicar una repetitividad del material obtenido.

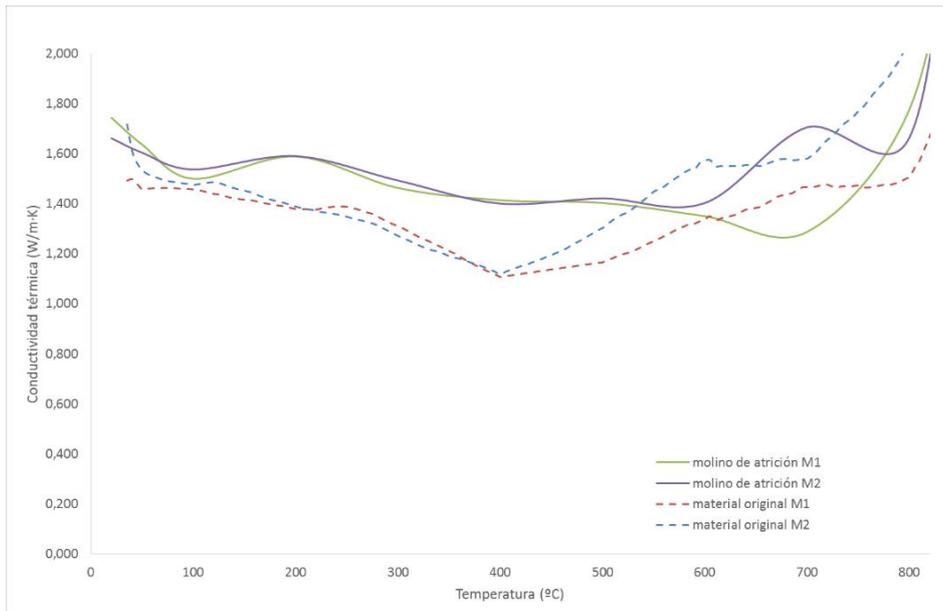


Fig. 301. Conductividad térmica de las muestras de $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ a diferentes temperaturas.

6.3.1.5.5.- Conclusiones

Se observa que la capacidad calorífica del material nuevo es menor, y su conductividad mayor, aunque a altas temperaturas se presentan unas irregularidades que habrá que estudiar a qué se pueden deber.

6.3.1.6.- Propiedades termoeléctricas

6.3.1.6.1.- Resistividad eléctrica y coeficiente Seebeck

La resistividad eléctrica y el coeficiente de Seebeck fueron medidos simultáneamente mediante la técnica de cuatro electrodos en un equipo LSR-3 de Linseis, y a temperaturas de entre 50 y 800°C en atmósfera de helio, arrojando los resultados que muestran en la Fig. 302.

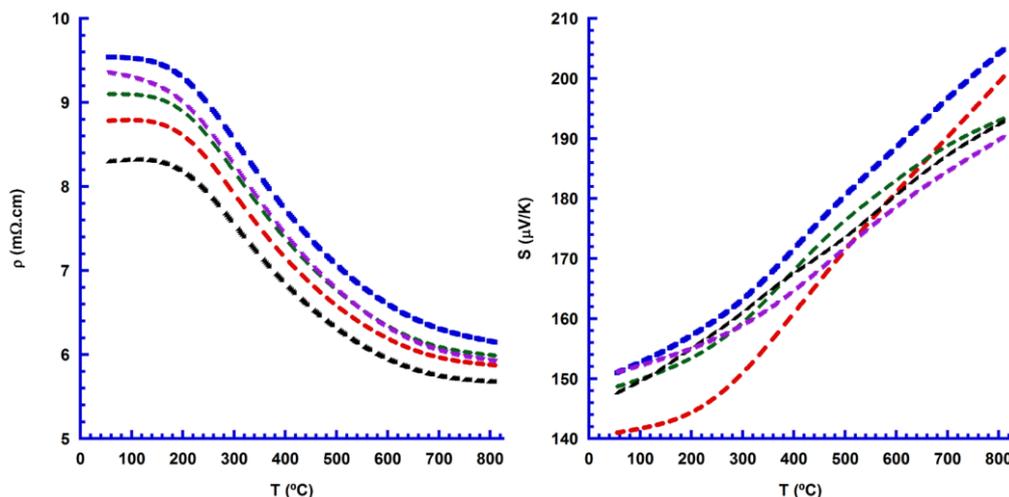


Fig. 302. Resistividad eléctrica y coeficiente de Seebeck de varias muestras de material óxido nuevo a sinterizado a 850°C.

Por otro lado, se ha analizado también si las características termoeléctricas obtenidas en distintas muestras eran comparables, a fin de evaluar la repetitividad del proceso de fabricación. Se muestran en la Fig. 303 las curvas obtenidas.

Dado el posible envejecimiento del material al mantenerlo a temperatura, se ha comprobado cómo varían estos parámetros tras la permanencia a 850°C, obteniéndose las curvas que se pueden ver en la Fig. 303.

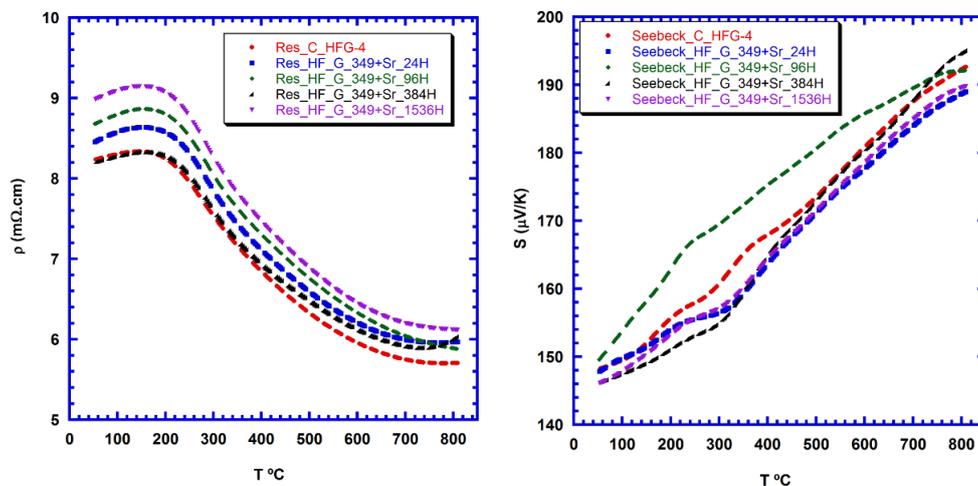


Fig. 303. Resistividad eléctrica y coeficiente de Seebeck de varias muestras de material óxido nuevo mantenido a 850°C durante diferentes periodos de tiempo como tratamiento de envejecimiento.

6.3.1.6.2.- Factor de potencia

Se utiliza la figura de mérito (ZT) como indicador de la eficiencia de la conversión de la energía térmica en eléctrica, y al producto del numerador ($\sigma\alpha^2$) se le denomina habitualmente factor de potencia (PF), cuya evolución en el tiempo se muestra en la Fig. 304.

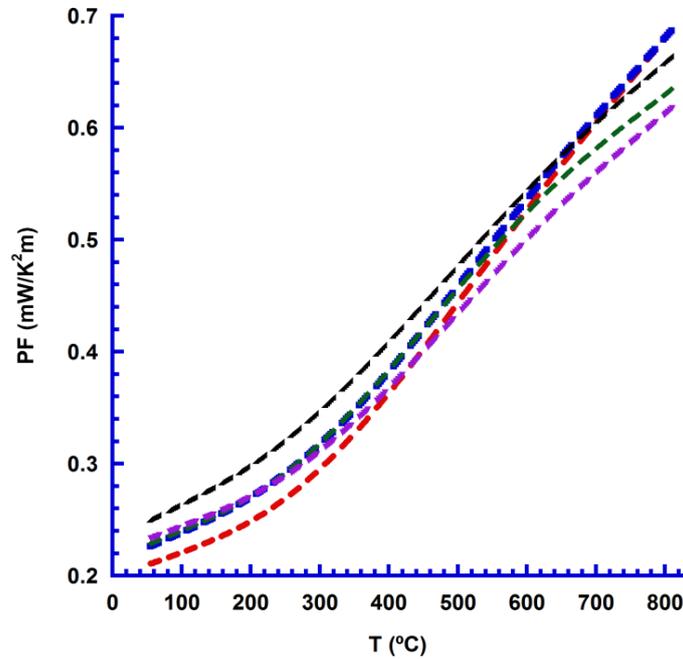


Fig. 304. Factor de potencia de varias muestras de material óxido nuevo sinterizado a 850°C.

Se ha comprobado, igualmente, la evolución de las propiedades del material tras su mantenimiento a 850°C durante diferentes periodos de tiempo (tratamiento de envejecimiento a alta temperatura), lo cual ha permitido comprobar, una vez más, la robustez del material.

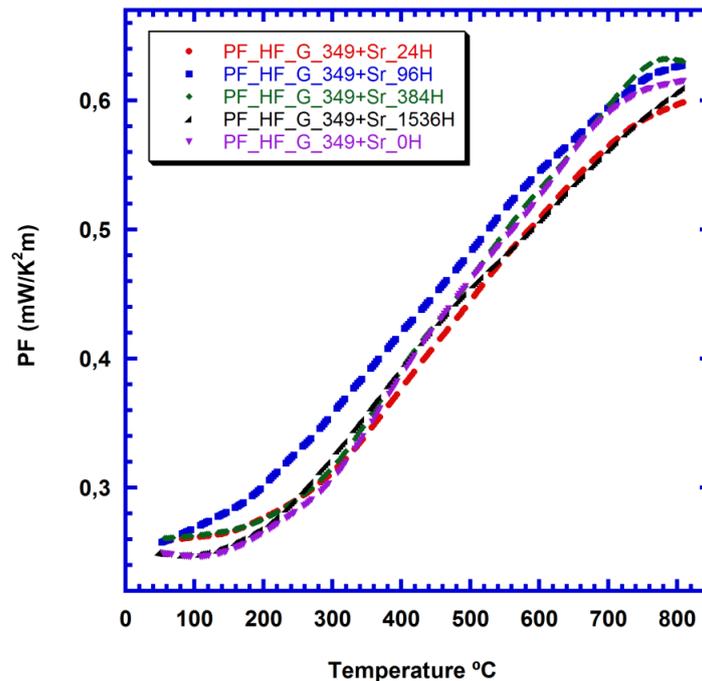


Fig. 305. Factor de potencia de varias muestras de material óxido nuevo mantenido a 850°C durante diferentes periodos de tiempo como tratamiento de envejecimiento.

Se compararon las propiedades termoeléctricas, y se comprobó (ver Fig. 306), que estas son similares, e incluso mejores que las obtenidas por el método convencional, comparables a las mejores de las reportadas en la literatura [161].

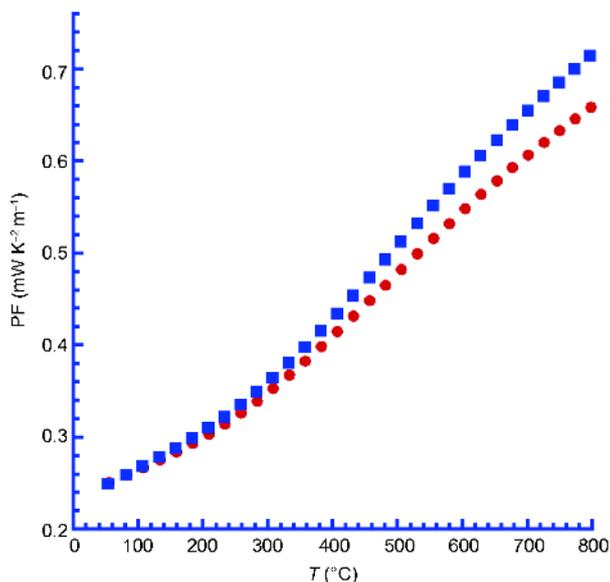


Fig. 306. Factor de potencia (PF) en función de la temperatura. En rojo, material obtenido por el proceso estándar y en azul, por molienda por atrición [161].

6.3.1.6.3.- Caracterización del comportamiento mecánico

Como medida previa a la fabricación de las estructuras en \square , se ha estudiado el comportamiento mecánico del material, para lo cual se han realizado ensayos de flexión por tres puntos, a 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ y una distancia entre apoyos de 10 mm.

La tensión de rotura se ha calculado aplicando la teoría clásica de vigas.

Estos ensayos se han realizado también sobre las muestras envejecidas a 850 °C, como se ve en la figura:

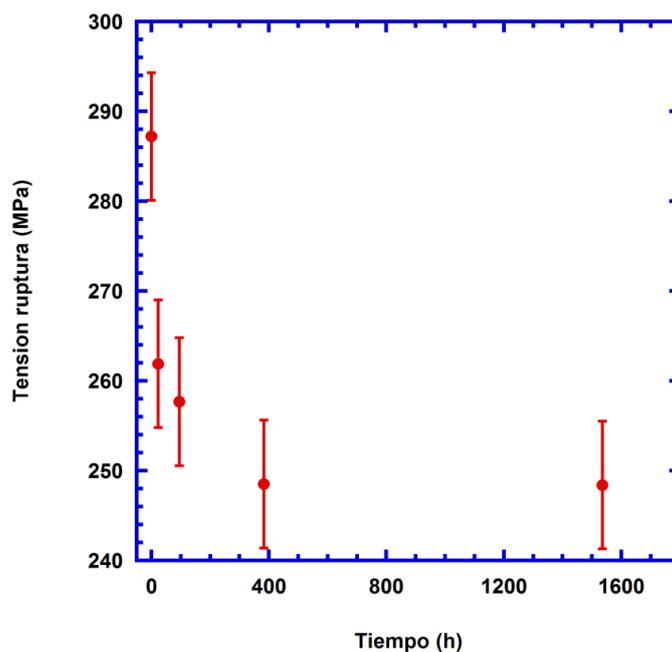


Fig. 307. Tensión de ruptura de muestras de material óxido nuevo sinterizado a 850°C.



Se puede observar en la Fig. 307 que a partir de 200-400 horas de tratamiento, el comportamiento del material se estabiliza.

6.3.1.6.4.- Parámetros termoeléctricos del $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$

De cara a utilizar el modelo simplificado desarrollado para estimar el potencial de generación del nuevo material en el VC-TE, es necesario introducir los valores de los coeficientes que describen las propiedades termoeléctricas del material.

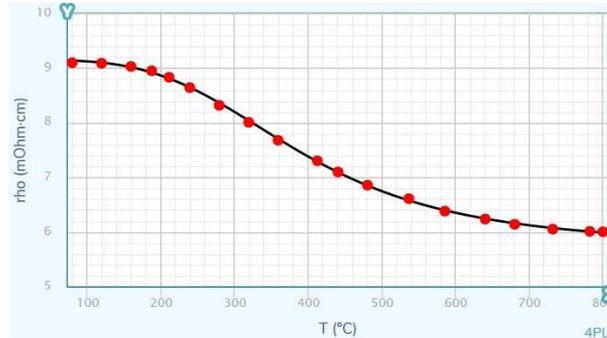


Fig. 308. Representación analítica de la curva de resistividad eléctrica.

Se trata de una función sigmoide simétrica, cuya curva queda descrita por la ecuación(106).

$$\rho = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{T}{c}\right)^b} \quad (106)$$

Donde los siguientes coeficientes aproximan la curva de la resistividad eléctrica con $R^2 = 0,9997$.

$$\begin{aligned} a &= 9,14956 && \pm 0,01631 \\ b &= 3,555773 && \pm 0,08217 \\ c &= 391,2269 && \pm 2,57100 \\ d &= 5,739101 && \pm 0,02909 \end{aligned}$$

Para el caso del coeficiente Seebeck la curva describe también una función sigmoide simétrica como se puede ver en la Fig. 309.

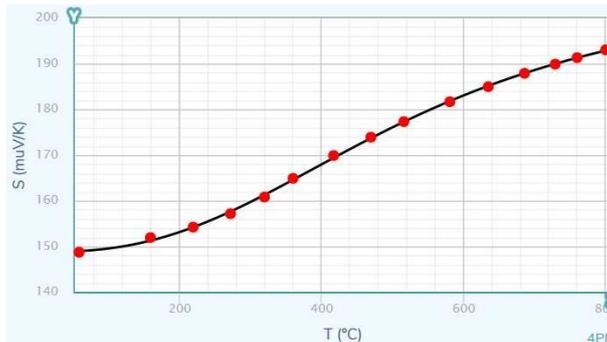


Fig. 309. Representación analítica de la curva de resistividad eléctrica

Donde los siguientes coeficientes aproximan la curva el coeficiente Seebeck con $R^2 = 0,9996$.

$$\begin{aligned} a &= 148,7823 && \pm 0,3289 \\ b &= 2,586735 && \pm 0,0956 \\ c &= 532,3642 && \pm 13,170 \\ d &= 208,2256 && \pm 1,8020 \end{aligned}$$

En cuanto a la conductividad térmica, tiene un comportamiento relativamente lineal hasta los 600°C (ver Fig. 301), por lo que se considera de valor 1,6 W/mK. Más aproximable a una curva lineal en el rango de temperaturas de trabajo de la aplicación.

6.3.2.- Entorno de caracterización y testeo

Se pretende disponer de un entorno físico en el que realizar las pruebas de vida que validen el desarrollo realizado y definir las pruebas a las que se habrá de someter el módulo TE para comprobar su durabilidad. Para ello, se desarrolla un banco de pruebas que permita la aplicación de los ciclos de trabajo definidos sobre el módulo TE y también realizar ensayos de condiciones extremas.

En los ensayos de durabilidad se pretende someter al termoelemento a ciclos de trabajo y a condiciones extremas de operación. Con estas pruebas se pretende definir la vida útil del módulo.

Los ciclos de trabajo sirven para simular la operación en condiciones normales de un largo periodo de tiempo en un tiempo reducido. En cuanto a las condiciones extremas, se buscarán combinaciones de distintas variables físicas como temperatura, gradiente térmico, humedad y fallos en los circuitos de regulación de la energía generada para establecer los límites de funcionamiento. Estas pruebas se realizarán con los termogeneradores en distintas fases de su vida útil.

En la Fig. 310, se muestran unas imágenes del diseño preliminar realizado:

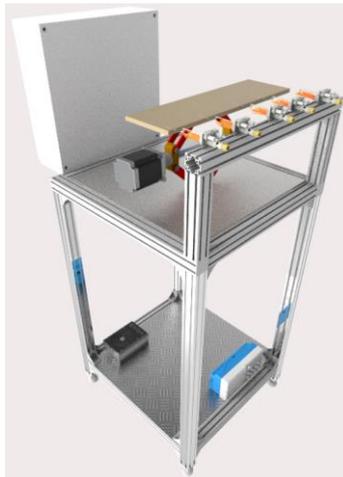


Fig. 310. Diseño general preliminar del banco de ensayos

El banco se diseña para poder ensayar 5 dispositivos TE a la vez. Consta de una estructura sobre la cual se montarán 5 llamas piloto, cada una para calentar el lado caliente de cada módulo TE.

Por otro lado, el banco consta de una plataforma elevadora sobre la cual se montarán los 5 módulos TE. Esta plataforma permitirá colocar los módulos a la altura de la llama en unos momentos y alejarlos de la llama en sentido vertical en otros, mediante la acción de un motor eléctrico, de manera que se puedan aplicar los ciclos de trabajo definidos para la validación de su durabilidad.

La refrigeración del lado frío de cada módulo TE se realizará mediante su posicionamiento sobre una placa de disipación térmica. En caso de que este método de refrigeración no sea adecuado/suficiente, se rediseñará el banco para poder incorporar otras tecnologías de disipación como la utilización de disipadores de aletas o cold-plates. Esta última forma de

refrigeración requeriría la instalación de un circuito de agua con su bomba de recirculación correspondiente y un disipador de calor (tipo Fan-Coil) en última instancia.

En la Fig. 311, se muestra un detalle del diseño preliminar de la zona de calentamiento y refrigeración de los módulos TE y en la Fig. 312 el banco real construido.

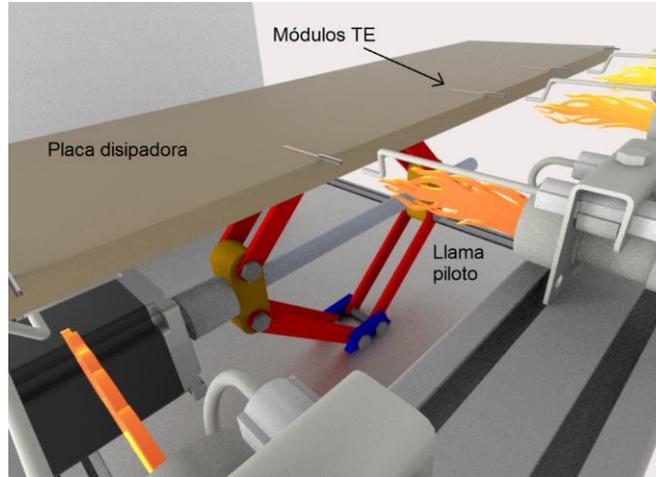


Fig. 311. Detalle 3D del diseño preliminar del banco de ensayos.

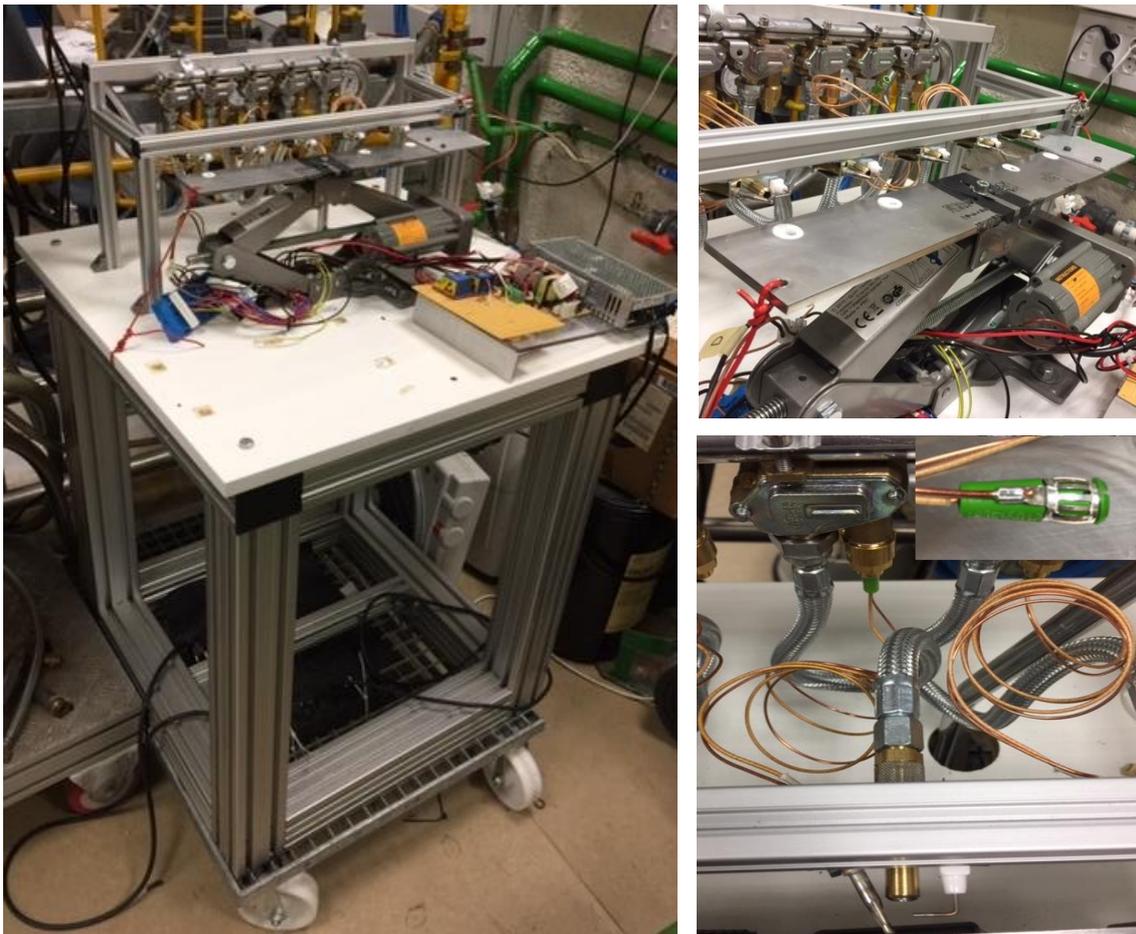


Fig. 312. Desarrollo final del banco de ensayos una vez se ha ensamblado.

Como se puede apreciar, el resultado final no ha diferido mucho del prototipado, logrando así el espacio controlado necesario para realizar los ensayos.

A continuación, en la Fig. 313, se pueden observar los datos termoeléctricos en \square con su respectiva fuente de calor proveniente de la llama alimentada por gas.

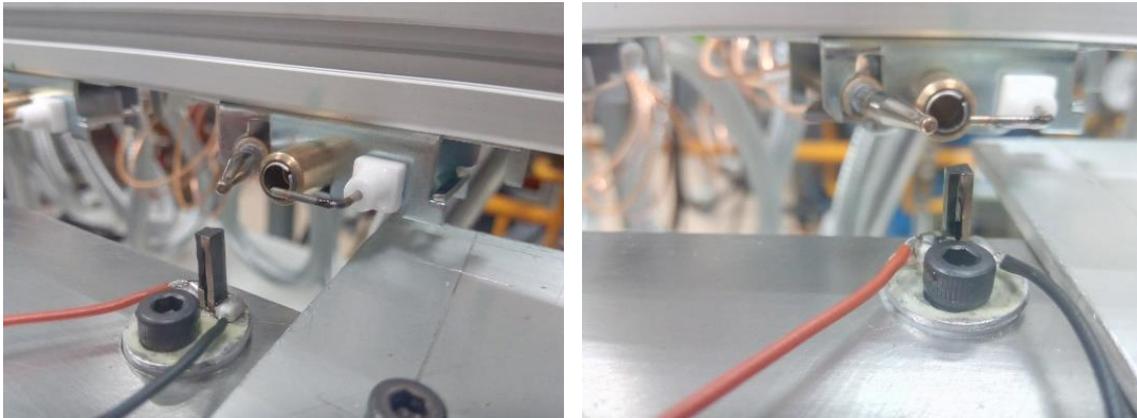


Fig. 313. Situación del dado de material termoeléctrico mecanizado como \square en la estructura frente a la llama piloto.

Para realizar los cálculos, se ha basado en el fundamento teórico del *offset compensated method*, el cual calcula la resistencia interna de los módulos Peltier. Para llevar a cabo estas mediciones, se hace un ciclado de alimentación comprendido en dos fases: encendido y apagado. Cuando está en encendido, el módulo está siendo alimentado por una intensidad, y, mediante la diferencia de voltajes obtenidos por un multímetro, se puede calcular el potencial del conjunto generador-resistencia interna. Este, comparándolo con el potencial total de la parte de apagado, puede dar el valor de la resistencia interna, como se puede observar en el esquema de la Fig. 314.

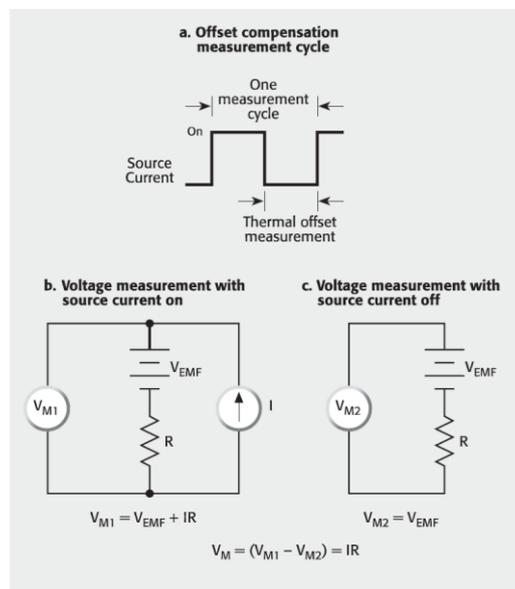


Fig. 314. Esquema de las mediciones tomadas mediante el Offset Compensated Method [173].

Con este valor de la resistencia interna, el cual irá aumentando con su uso, se podrá estimar un fin de vida útil.

Para poder aplicar este método de medición en este caso, se ha programado un método de control y lectura de datos con el programa LabView, visible en la Fig. 315, el cual nos permitirá observar las mediciones en todo momento mientras dure el ensayo, y controlar la alimentación de los módulos.

Las conexiones se han hecho con una fuente de alimentación de un valor conocido, en serie con una resistencia de *shunt*, la cual nos dará el valor de la intensidad del circuito, posibilitando así las pruebas, que son recogidas por un multímetro que calcula, gracias al software, la resistencia interna de los módulos termoelectricos.

Todos estos datos se dispondrán en una interfaz GUI fácilmente accesible para el usuario que realice el experimento.

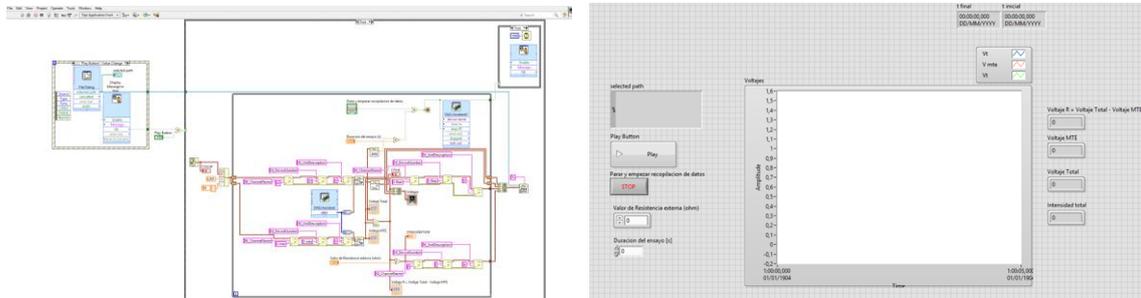


Fig. 315. Esquema de la programación interna de LabVIEW empleada en este proyecto e interfaz customizado de LabVIEW para la medición en tiempo real y continuo de la resistencia interna de los módulos.

Con el sistema descrito será posible realizar los ensayos, recopilando todo lo necesario para caracterizar el funcionamiento y el desgaste de los módulos termoelectricos. Las pruebas permitirán determinar el valor de la tensión total del circuito, la tensión del módulo y la parte del ciclo de alimentación que nos encontramos. Con los datos obtenidos será posible determinar la resistencia interna.

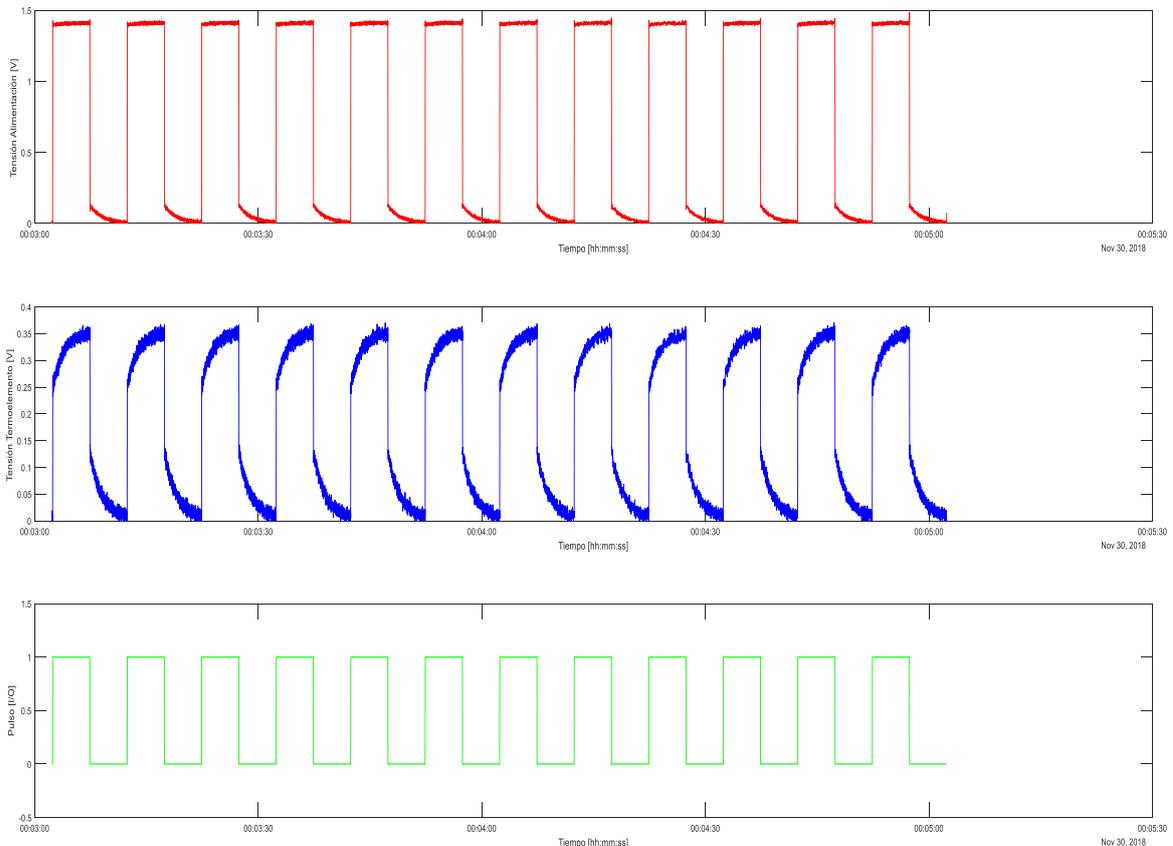


Fig. 316. Mediciones de tensión reales obtenidas y posprocesadas en Matlab, a partir de las cuales se obtiene el valor de resistencia interna.

6.3.2.1.- Software de medida

Este software se diseña para comprobar la resistencia de los termoeléctricos, sometiéndolos a una serie de pruebas de vida. Como se puede ver en la Fig. 317, los componentes termoeléctricos se someten a un estrés térmico a fin de evaluar su comportamiento en fatiga, calentándolos mediante una llama fija con un caudal de gas natural constante. Para ello, se colocan los componentes en un bastidor que alternativamente se sube y se baja mediante un gato eléctrico para someterlos a una llama (ver Fig. 312). El sistema de calentamiento está provisto de una válvula de seguridad que detecta la llama. En el caso de que la llama se apague, salta la válvula debido a la ausencia de altas temperaturas, enfriándose de ese modo el termopar que va unido a la válvula. Finalmente, se corta el suministro de gas evitando cualquier accidente. Una vez calentado el termoeléctrico lo suficiente, se comienzan a tomar las mediciones.



Fig. 317. Calentamiento del termoeléctrico en banco de ensayos.

El software determina el número de horas durante el cual la resistencia interna de los componentes termoeléctricos a testear se mantiene en una franja del 5% sobre su valor nominal, medido con un medidor RLC. De cara a efectuar un seguimiento del ensayo más detallado, se medirá la resistencia de cada componente durante el ensayo mediante el *offset compensated method*, comentado previamente.

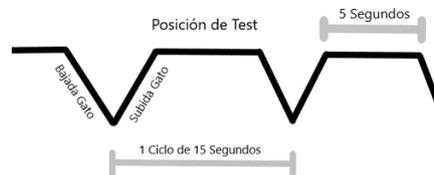


Fig. 318. Proceso en el que transcurre un ciclo completo del gato y termoeléctrico.

Se utiliza un módulo NI cDAQ9172 para la adquisición de datos, con una tarjeta de adquisición NI 9291 y un módulo NI 9474 para generar salidas digitales.

Mediante la tarjeta de salidas digitales, se alimenta alternativamente cada módulo por separado y mediante la tarjeta de adquisición, se lee el valor de cada alimentación por separado y el valor de la tensión en el módulo termoeléctrico (V_m).

El software desarrollado mediante Labview, para testear cuatro módulos termoeléctricos simultáneamente, implementa las siguientes funciones:

- Control de subida y bajada del gato, que acerca y aleja los componentes de la llama.
- Conmutación de las alimentaciones para generar la secuencia de prueba correspondiente.
- Lectura y filtrado de los valores de V_t y V_m (V_{m1} y V_{m2}).
- Escritura de los datos en disco (TDMS).
- Visualización en pantalla de los valores de medida durante la conmutación, cálculo de los valores de corriente y resistencia del módulo termoeléctrico en cada secuencia de test, así como la resistencia promedio de todas las medidas realizadas.

6.3.3.- Prototipado de estructuras de material óxido en \square

Debido a la innovación que supone la nueva estructura desarrollada y patentada en esta tesis, el proceso de ensamblaje desarrollado se reduce a las operaciones de mecanizado y metalizado, frente a utillajes y otros elementos que contemplan otros procesos que permitirían un ensamblado preciso para componentes que van a estar expuestos a elevadas temperaturas.

En este documento se explican por separado las alternativas que se han evaluado en cuanto a metalización y generación de la geometría.

6.3.3.1.- Proceso de ensamblado de nueva estructura en \square

El proceso de ensamblado de módulos termoelectricos basados en material óxido, estructura en \square y metalización en una cara, realmente se asemeja más a un proceso de mecanizado que a un proceso de ensamblado. Esta característica hace que su proceso de fabricación sea algo más complejo que el de un dado de material termoelectrico común, sin embargo, es un reto a nivel de fabricación de alto interés que presenta las siguientes ventajas:

- **Robustez física:** Al estar formado todo por el mismo material, las dilataciones y contracciones debido a los gradientes térmicos a los que se verán sometidos serán iguales en todo el módulo, proporcionando una buena vida a ciclado térmico.
- **Repetitividad:** La eliminación de las soldaduras empleadas en la unión de los termoelementos hace que las propiedades y rendimiento del módulo tan solo sufran las pequeñas variaciones que pueda tener el material en su composición, y no dependa de la calidad de las soldaduras, su material, factores de ensamblado como la temperatura...
- **Menor número de piezas:** Se elimina como elemento de soporte necesario la cerámica.

6.3.3.2.- Módulo Unileg en \square fabricado en un solo disco

El proceso de fabricación del módulo termoelectrico implementado consta de tres puntos principales; corte, serigrafía y curado.

En la Fig. 319, para ilustrar mejor las ventajas anteriormente mencionadas, se ilustra cómo podrían ser los pasos del proceso de creación del módulo.

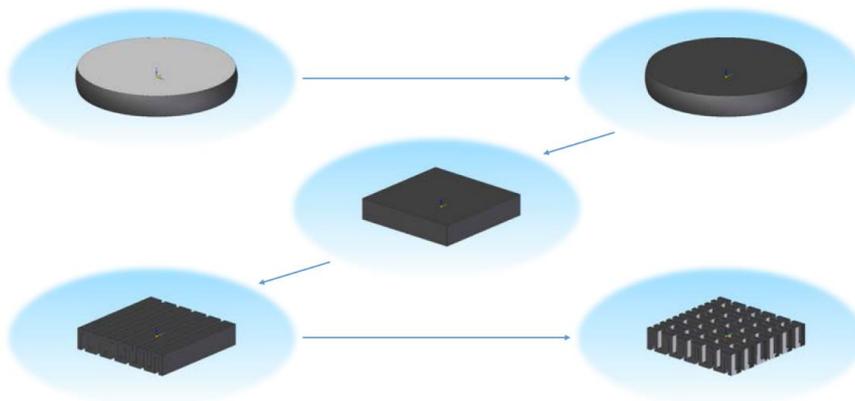


Fig. 319. Proceso de fabricación del módulo termoelectrico

El primer paso del proceso de ensamblado-mecanizado comienza con la recepción del disco de óxido de cobalto. El espesor y diámetro inicial del disco determina el tamaño del módulo termoelectrico y los dados en \square que lo componen. En el proceso de prensado en caliente, es necesario el uso de una lámina de plata que impide que el material se adhiera a los cilindros de la prensa. Se ha de retirar dicha capa mediante rectificado, dejando ambas caras del disco planas y paralelas entre sí.

Una vez se ha rectificado el disco, se le da la forma adecuada para conformar el módulo objetivo. Se han diseñado tanto módulos cilíndricos como módulos cuadrados, todos ellos actualmente en proceso de protección en forma de patente. Para los cilíndricos se efectuaría una operación de cilindrado y posteriormente se le practicarían unos cortes en dirección radial. En el caso presentado, se busca un módulo similar a los convencionales, de base rectangular, por lo que se eliminará material hasta conseguir la forma deseada.

En el siguiente paso, unos discos de corte labran unas hendiduras en las bases del prisma longitudinalmente. Estas hendiduras conforman la estructura en Π de los dados, al modo de la Fig. 320.

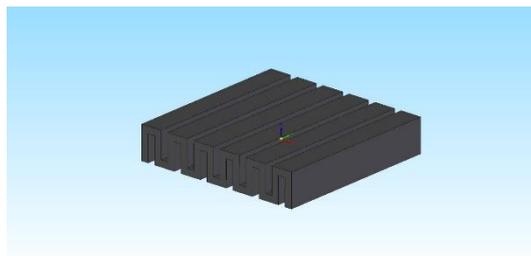


Fig. 320. Detalle del disco de óxido con cortes longitudinales.

Se observa cómo se han creado en este caso seis dados. A continuación, se procede al metalizado de la pieza, que será posteriormente retirado en aquellas zonas donde no interese. El material para metalizar es un recubrimiento conductivo de plata que será aplicado con espray. Para incrementar el número de dados y con él la tensión y potencia generada por el módulo, el siguiente paso consiste en la realización de unos cortes desde dos de los laterales, siguiendo el mismo patrón que para las ranuras hechas en el anterior paso. Jugando con las tolerancias y eliminando cantidades ínfimas de material, se eliminará la película conductiva de plata selectivamente por medios tradicionales de mecanizado (Fig. 321).

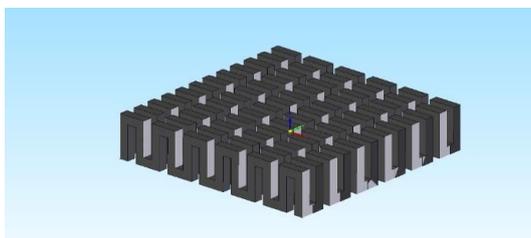


Fig. 321. Módulo con 72 estructuras Unileg en Π fabricado en un solo disco.

El resultado del proceso de mecanizado-ensamblado es la parte activa de un módulo de 72 estructuras Unileg en Π .

6.3.3.3.- Metalización de la cerámica

Tal como se ha explicado previamente, el principio de funcionamiento de la nueva estructura con forma de Π radica en que una de sus patas se encuentra cortocircuitada mediante una metalización. Así, se consigue descompensar la generación de tensión de la pata, ofreciendo un voltaje neto entre la base de ambas patas.

6.3.3.4.- Metalización con pintura de plata

La metalización se realiza empleando pintura de plata. Esta se emplea habitualmente para hacer reparaciones en pequeños circuitos electrónicos impresos y, además, en serigrafía para hacer pistas en sustratos flexibles.



El proceso de metalización con plata se ha realizado con una pintura con carga de plata de la marca RS que está compuesta por entre un 50% y un 75% de plata, entre un 10% y un 25% de 2-methoxy-1-methylethyl acetate y entre un 10% y un 25% de n-butyl acetate. Siendo estos últimos los solventes que actúan como suspensión de la plata.

El proceso consiste en las siguientes fases:

1. Pintado de las piezas. Para las piezas grandes, empleadas posteriormente en los ensayos de tracción, se ha aplicado la pintura con un pincel, mientras que a las estructuras de material termoeléctrico con forma en \square , se les ha aplicado la plata con un utensilio de precisión para dosificar un espesor adecuado y uniforme.
2. Secado. Se deja secar la suspensión aplicada bajo unas lámparas infrarrojas durante un periodo no menor a las 2 horas. En el caso de las piezas en \square , al ser necesario pintarlas por dos lados, se pinta el lado pendiente y se vuelve a secar.

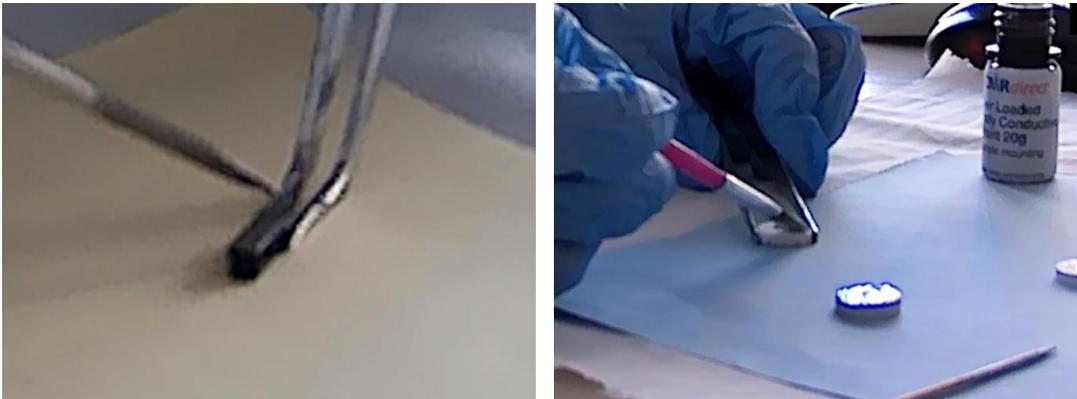


Fig. 322. Aplicación de la capa de plata en la estructura en \square y en los discos.

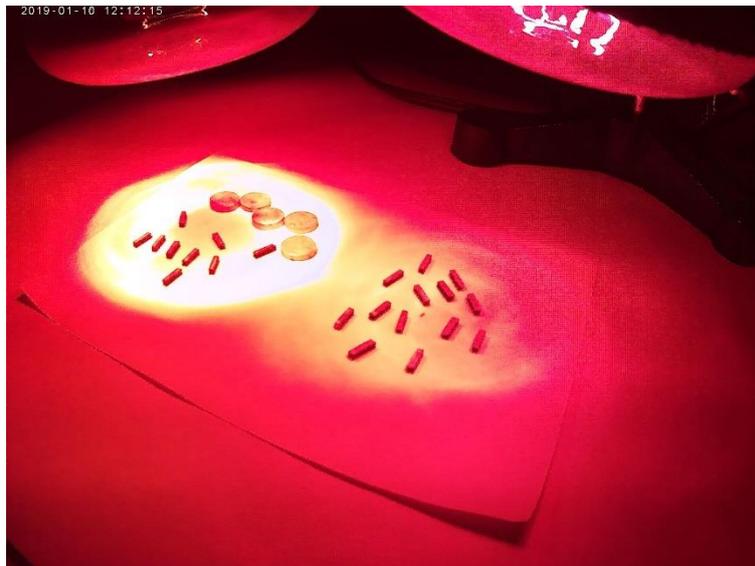


Fig. 323. Secado de las distintas muestras metalizadas en lámparas IR

3. Estas muestras, una vez secas, se sitúan en una navecilla de alúmina y se introducen a un horno a 900°C.



Fig. 324. Piezas en \square , en horno refractario.

4. **Enfriamiento.** Finalmente, se dejan enfriar las muestras durante 1 hora dentro del horno una vez se ha apagado, continuando posteriormente su enfriamiento en el exterior a temperatura ambiente.



Fig. 325. Disco y piezas en \square metalizadas con plata tras el tratamiento térmico.

Cabe señalar que no se observó ningún cambio en el material tras el curado a 900 °C (ver Fig. 326).

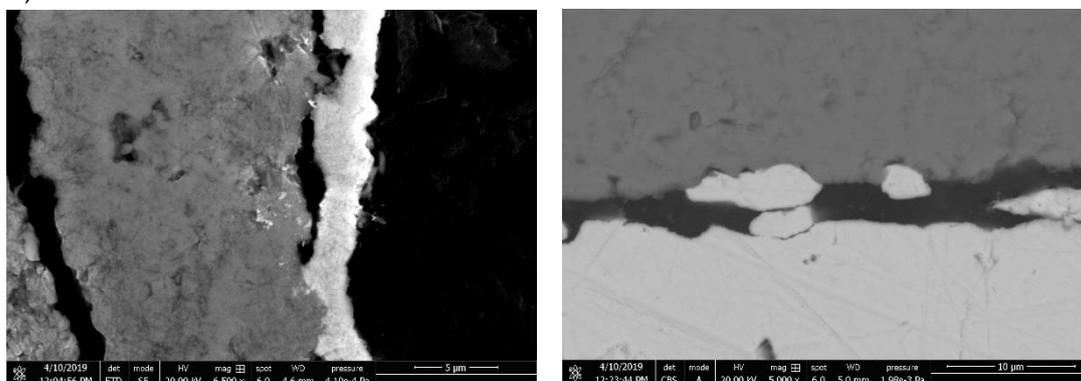


Fig. 326. Izquierda, pintura de plata aplicada (parte más clara) sin curar; derecha, tras curado

6.3.3.4.1.1 Ensayos de adherencia con pintura de plata

Para evaluar la resistencia de estas metalizaciones a la tracción, se ha dispuesto una probeta especial con múltiples metalizaciones a las cuales se les ha añadido una soldadura mediante una aleación estaño-plata junto con un cable fino. El objetivo de este ensayo es verificar que la adherencia de la plata es correcta. En la Fig. 327 se puede ver el montaje de la probeta en el útil de ensayo.

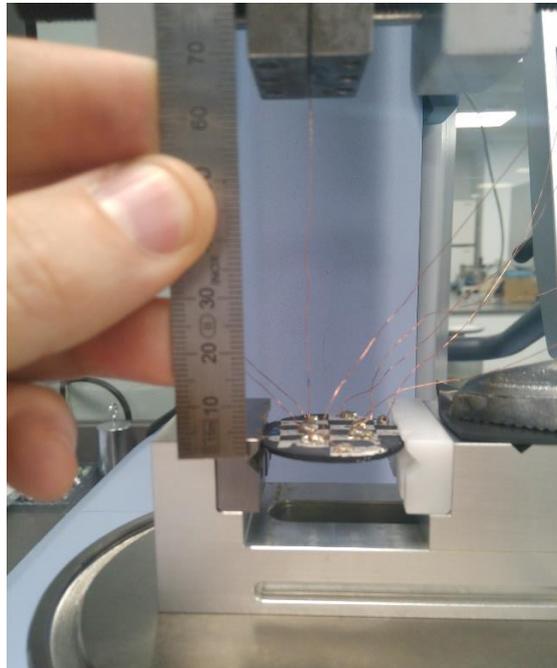


Fig. 327. Probeta metalizada situada en la máquina de ensayos de tracción

Esta máquina ha realizado una serie de ensayos a 0.5 mm/s de tracción, sometiendo a los cables y soldaduras a un esfuerzo similar a los que pueden encontrarse en servicio.

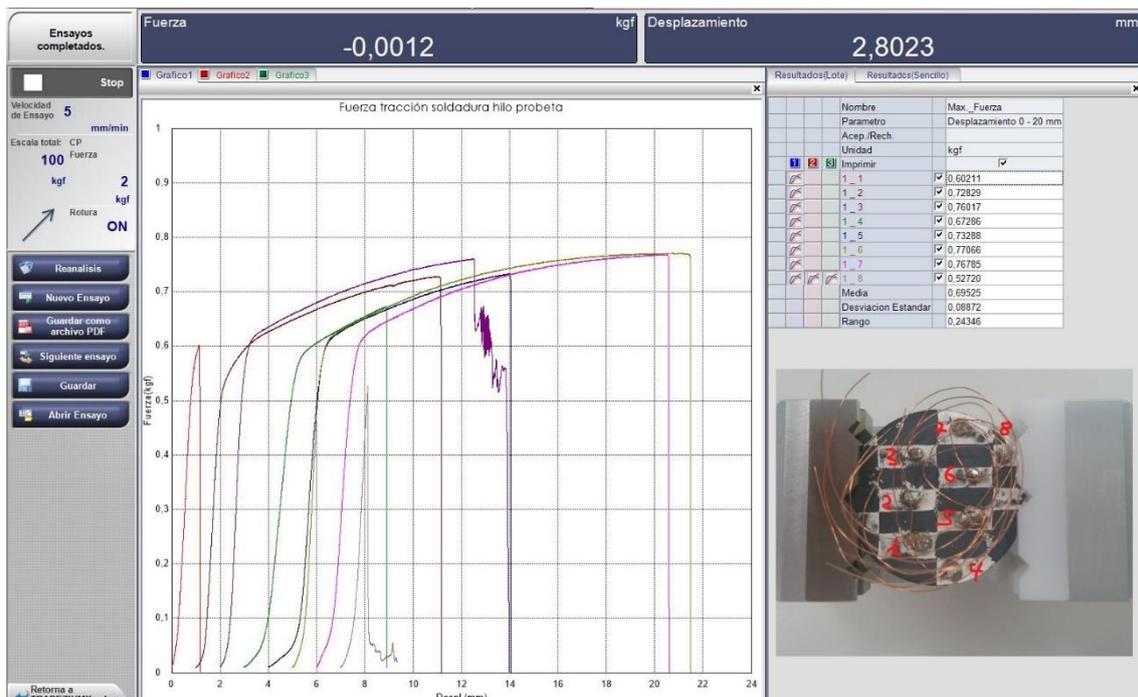


Fig. 328. Resultados de ensayos de tracción de la pintura de plata sobre el material óxido.

Como se puede apreciar en la Fig. 328, todas las muestras han llegado al fallo antes de llegar a una fuerza de tracción de 0.8 kgf, con un valor mínimo de 0.6 kgf. Entre las causas de la rotura, se muestra en la Fig. 329 el motivo para cada una de las 8 muestras metalizadas dentro de la probeta.

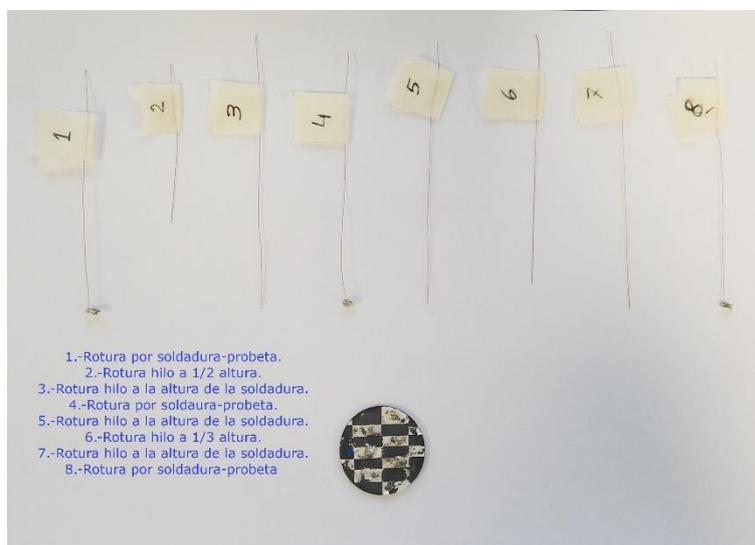


Fig. 329. Muestra de resultados de la prueba con causas de la rotura.

En tres de los casos, la rotura se ha dado en la soldadura, mientras que en otros tres, la causa del fallo se ha producido por las roturas del hilo en la zona de la soldadura. En algunos casos, también se ha dado rotura en otro punto cualquiera del hilo. Al ser hilos muy finos, es posible que la causa sea la propia resistencia del hilo en ciertos casos, por tener defectos, dobleces u otros factores que debiliten sus capacidades a tracción. En los casos donde la metalización ha sido arrancada, se aprecia además como la unión que existe entre el metalizado y la soldadura es de baja calidad y no se aprecia unión metálica.

Este proceso no ha logrado tener una adherencia suficiente, pues no se ha conseguido hacer una unión metálica. La adhesión obtenida resulta insuficiente para soportar los esfuerzos que un conector de un módulo termoeléctrico para aplicaciones industriales puede requerir.

6.3.3.5.- Metalización por deposición de cobre

En la Fig. 330 se ve cómo se ha tratado de hacer este procedimiento en un trozo de material termoeléctrico sumergido en el baño.

Aprovechando las propiedades semiconductoras del material óxido, se somete a un proceso electroquímico para tratar de depositar una capa de algún material de naturaleza metálica, al cual se le puedan soldar posteriormente unos electrodos.

Se escoge como material para realizar el enchapado el cobre. Este presenta muy buenas propiedades para la soldadura, y térmica y eléctricamente es muy similar a la plata. La disolución de cobre se hará con una mezcla al 50% de ácido acético con agua al 4% y peróxido de hidrógeno al 10%. El cobre se ha obtenido desde cobre metálico.

En esta disolución de cobre, (Fig. 330), se ha introducido una pieza de material óxido. Esta pieza será el polo negativo de la reacción electroquímica que tendrá lugar. El polo positivo será un trozo de metal. Al aplicarse una corriente continua, los iones de cobre, que le confieren al medio ese tono azulado, viajan hasta depositarse en el material óxido.



Fig. 330. Reacción de metalización en el electrolito desarrollado

El resultado de esta prueba no ha sido satisfactorio. Pese a que se consigue depositar una fina capa de material de cobre (Fig. 331), la tasa de deposición o velocidad es muy baja, y el incremento de la tensión circulante por el electrolito genera acumulaciones de cobre sobre el material óxido que degeneran en defectos y fallan al tratar de hacer una película fina de material de cobre (Ver Fig. 331).



Fig. 331. Muestra de material óxido donde se aprecia un ligero tono naranja-marrón propio del cobre en la parte inferior.

6.3.3.6.- Metalización con lámina de plata del proceso de fabricación.

Finalmente, ante el fallo de los dos métodos anteriormente planteados para lograr crear una metalización con suficientes garantías, se procede a utilizar la propia plata empleada en el proceso de fabricación del disco de material termoeléctrico como metalización.

Esta plata cumple el cometido principal de servir de mecanismo antiadherente para evitar que la mezcla, tras sinterizarse, se adhiera a la prensa, rompiendo el disco creado y pudiendo ocasionar daños al equipamiento.

La cantidad de plata utilizada ha sido objeto de optimización en el desarrollo de los discos y, debido a su elevado coste, es uno de los elementos a optimizar del proceso de fabricación del material, siendo deseable su eliminación.

El hecho de emplear plata en las tapas del disco tiene ciertas implicaciones para la estructura del material termoeléctrico. Este no dispondrá de metalizado en las caras externas paralelas al corte, sino que únicamente tendrá metalizado en las caras perpendiculares. Esto tiene inconvenientes a la hora de soldar el dado de material, tal como se puede apreciar en la Fig. 332.



Fig. 332. Estructura en □ mecanizada con metalización del proceso de fabricación, aún sin pulir.

- Se preparan para su observación metalográfica secciones de discos provenientes del sinterizado y a los que no se les había retirado la plata, y otros a los que se les había aplicado plata según el procedimiento aquí descrito.
- Para ello, se engastaron en polímero modificado para aumentar su conductividad, y se pulieron hasta pulido espejo.
- Las muestras se observaron en un Microscopio Electrónico de Barrido de Alto Vacío y Bajo Vacío, Nova NanoSEM 450 de FEI y en la Fig. 333 se muestran fotografías obtenidas en dicho microscopio. Mientras que la plata proveniente del sinterizado está perfectamente integrada, e incluso se observa que una parte ha pasado al termoeléctrico, en las muestras que fueron tintadas se detecta que la plata solo en ciertas zonas entra en contacto con el termoeléctrico, y queda una separación holgada entre ambos materiales.

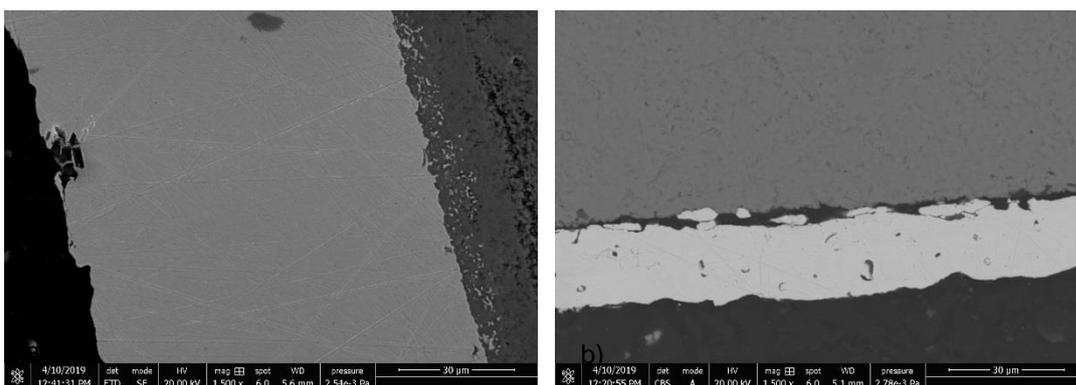


Fig. 333. Micrografías de SEM de muestras provenientes a) del sinterizado; b) de la tinta aplicada.

Así pues, aunque desde el punto de vista industrial, no parece aceptable la utilización de un material tan caro como la plata como desmoldeante, para luego retirarla, sí que resulta válida para el desarrollo de los prototipos, ya que este es el único método que ha probado ser efectivo en lo que a soldadura y resistencia a la tracción se refiere.

Se puede considerar que la metalización es un aspecto pendiente para futuros desarrollos.



6.3.3.7.- Corte del material óxido

Para crear las estructuras en \square , es necesario cortar el material y por su estructura cristalográfica, que sugiere el posible deterioro de la cerámica en su mecanizado, se han empleado varias técnicas.

6.3.3.8.- Corte por LASER

Las primeras pruebas realizadas con un equipo EPILOG Mini (Fig. 335) de 40 W de potencia, apenas marcaron el disco de óxido (Fig. 334), sin llegar a cortarlo y únicamente provocaron un calentamiento del mismo.



Fig. 335. Máquina de corte por LASER evaluada.



Fig. 334. Muestra de material termoelectrico marcada por el haz LASER.

Se emplea un LASER de fibra para incrementar y concentrar la potencia. Ofrecen una mayor concentración del haz, y en esta ocasión sí es capaz de provocar el corte. Sin embargo, la profundidad del corte es muy pequeña con relación a la anchura de la pieza.

Se realizó en Unizar un corte mediante LASER de fibra con un diseño de termopila orientado a la generación de mayor tensión, fruto de la concatenación de estructuras en \square de modo circular. El resultado se puede apreciar en la Fig. 336. La pieza de la imagen requirió en torno a 12 horas para evitar la destrucción de la muestra, que una mayor velocidad podría haber ocasionado. El tiempo resulta excesivo e inviable como método de fabricación de componentes, si bien se aprecia la precisión y finura del corte.

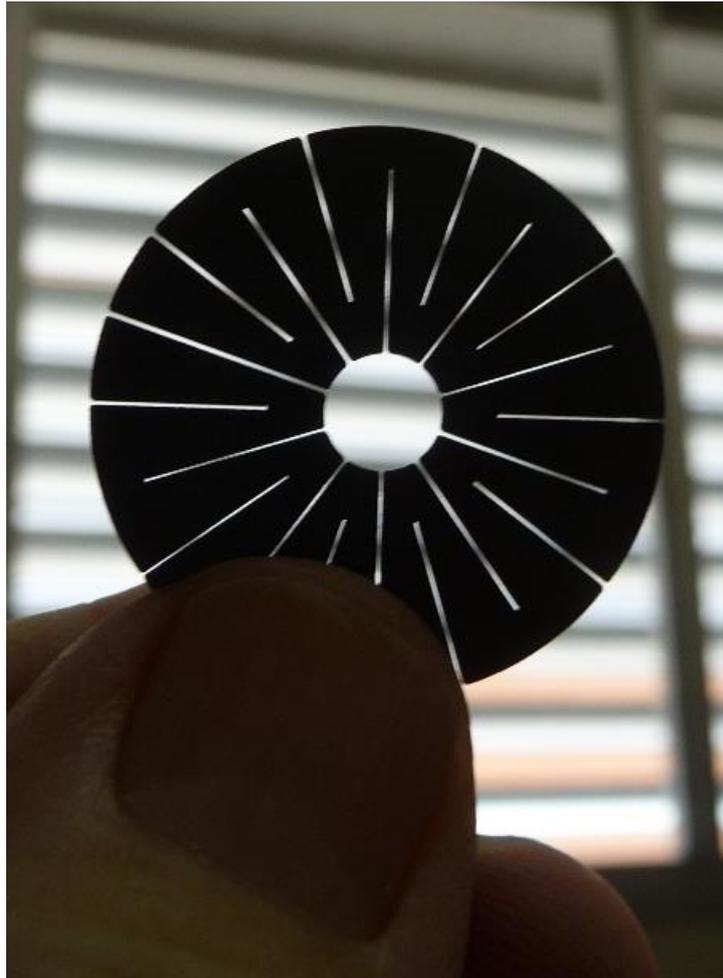


Fig. 336. Disco de material termoeléctrico cortado como una termopila

6.3.3.9.- Corte por micromecanizado

Finalmente, ante la imposibilidad de realizar los cortes por medio de una sierra de disco debido a la complejidad de las geometrías y la lentitud del LASER, se decide realizar el formado de las estructuras en \square mediante micromecanizado. El micromecanizado es un proceso de mecanizado convencional que emplea fresas de diámetros muy pequeños.

En la Fig. 337 se muestra uno de los planos empleados para la creación de las estructuras mediante micromecanizado. Se ha tratado de aprovechar al máximo el espacio para unas geometrías de 10 mm de alto por 2.5 mm de ancho.

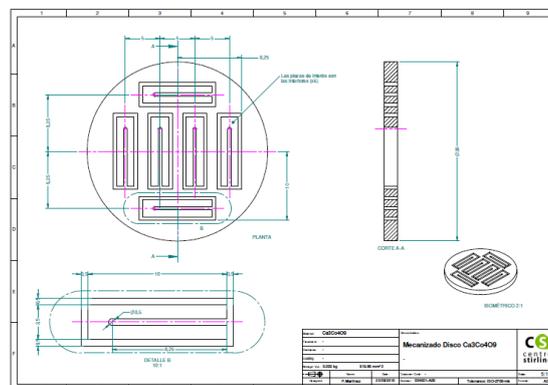


Fig. 337. Plano actual de micromecanizado de piezas en \square .



Se han realizado los mecanizados con la propia plata del proceso de fabricación.

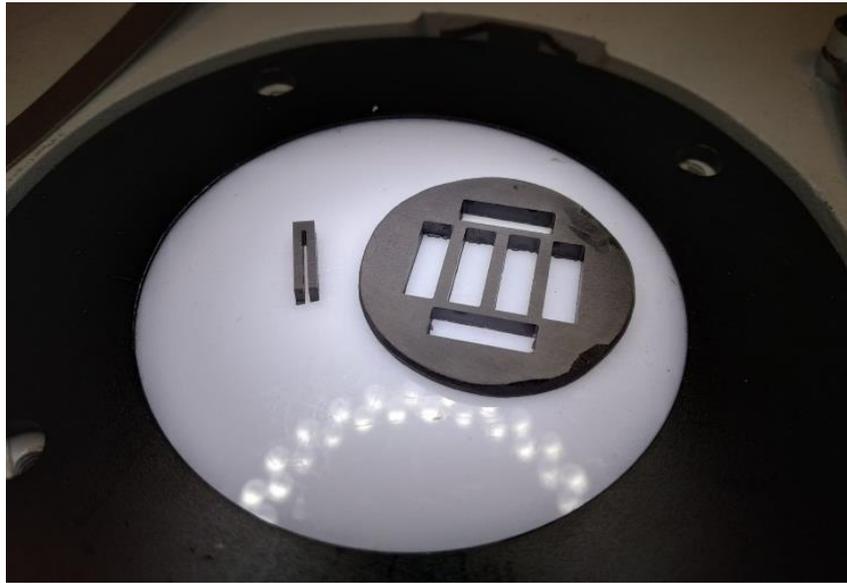


Fig. 338. Elemento termoelectrico obtenido por micro mecanizado y muestra del material restante en el disco, tras la extracción de 6 elementos.

En la Fig. 339 se puede ver, en un análisis microscópico, el detalle de los cortes. En este análisis se ver una gran precisión tanto dimensional como de forma, así como ausencia de defectos.

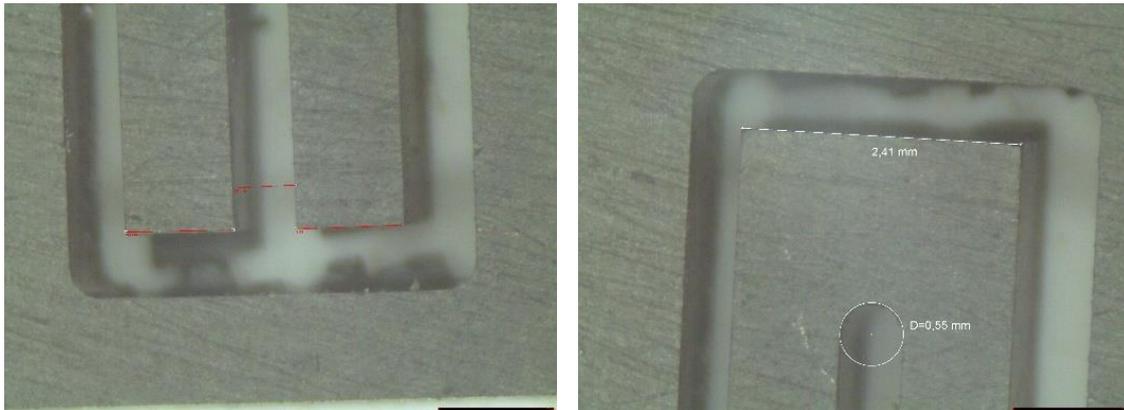


Fig. 339. Detalle de los cortes micromecanizados al microscopio.

El proceso de micromecanizado ha demostrado ser un proceso rápido y fiable para la generación de geometrías complejas que además no deja imperfecciones en el material, a lo cual hay que añadirle una elevada precisión dimensional y geométrica.

6.3.3.10.-Retirado selectivo de plata

Finalmente, para completar el proceso de fabricación de la estructura en \square , es necesario realizar un retirado selectivo de plata para provocar el desbalanceo eléctrico de la nueva estructura. Este proceso se ilustra mediante una secuencia de imágenes en la Fig. 340. Una de las patas permanece completamente metalizada, mientras que a la otra tan solo se le ha dejado una extensión metalizada de 3 mm en su extremo inferior para poder efectuar las soldaduras pertinentes.



1- Estructura en \square micromecanizada



2- Pulido de la plata



3- Zona de exposición



4- Retirado de plata sobrante



5- Patas metalizadas resultantes de material termoeléctrico

Fig. 340. Proceso final de preparación de las geometrías en \square .

6.3.3.11.-Conclusiones

Las alternativas de pintado y deposición electroquímicas de metalizado no han dado los resultados esperados, teniéndose que emplear finalmente la plata que se queda adherida en el proceso de fabricación.

En cuanto al corte del material, debido a la complejidad geométrica y su alta resistencia al calor, ha sido necesario emplear técnicas de micromecanizado frente a otras más flexibles como el LASER.

Aun así, el complejo proceso de ensamblado de los módulos tradicionales queda reducido a unas pocas operaciones que mejoran la robustez del producto.

6.3.4.- Resultados

6.3.4.1.- Caracterización de los termoelectricos

Las pruebas se realizan en ocho termoelectricos divididos en dos grupos de cuatro. Estos dos grupos se diferencian por sus propiedades resistivas, las cuales se estudiarán más adelante.

Para cada termoelectrico se realizan ocho ensayos: siete con caras resistencias diferentes y un último ensayo con una configuración en circuito abierto. Tanto el voltaje como la intensidad en el circuito van a depender de la resistencia que se le aplique al mismo. El circuito está compuesto únicamente por el termoelectrico, la resistencia y los cables que los unen; y para minimizar errores se tendrá en cuenta la resistencia producida por los cables de medición. Este valor, producido por la resistencia de los cables, será restado del resultado obtenido en la medición de cada experimento. Es importante que, en todo momento de la medición el calor que se le aplique al termoelectrico sea constante. De esta forma se evitan lecturas incorrectas al cambiar de un termoelectrico a otro, ya que con un caudal distinto de llama la temperatura del termoelectrico cambiaría y del mismo modo variaría el voltaje producido en el circuito. Una vez obtenidos los valores de las tensiones, se pueden determinar la intensidad y potencia a través de la ley de Ohm. Para estos valores, se podrán hacer las gráficas correspondientes V-I, P-I, P-R y V-R.

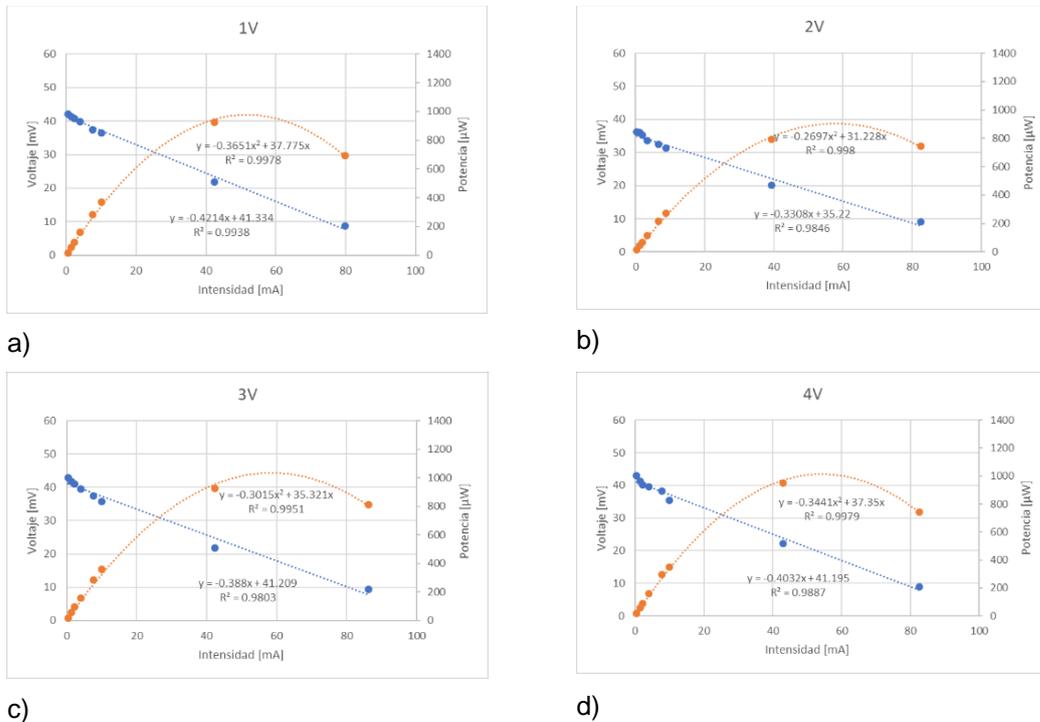


Fig. 341. Gráficas de voltaje (azul) y potencia (naranja) en función de la intensidad para el termoelectrico compuesto por el material de partida, con sus respectivas líneas de tendencia.

En estas primeras graficas de la Fig. 341 se estudian el voltaje y la potencia en función de la intensidad.

La tensión máxima en circuito abierto ronda los 40mV y su potencia máxima alcanza 1,1 mW aproximadamente cerca de los 50- 60mA. En este punto de máxima potencia, el valor de la resistencia del componente se iguala a la resistencia acoplada al circuito.

A continuación, se somete al mismo ensayo al nuevo material.

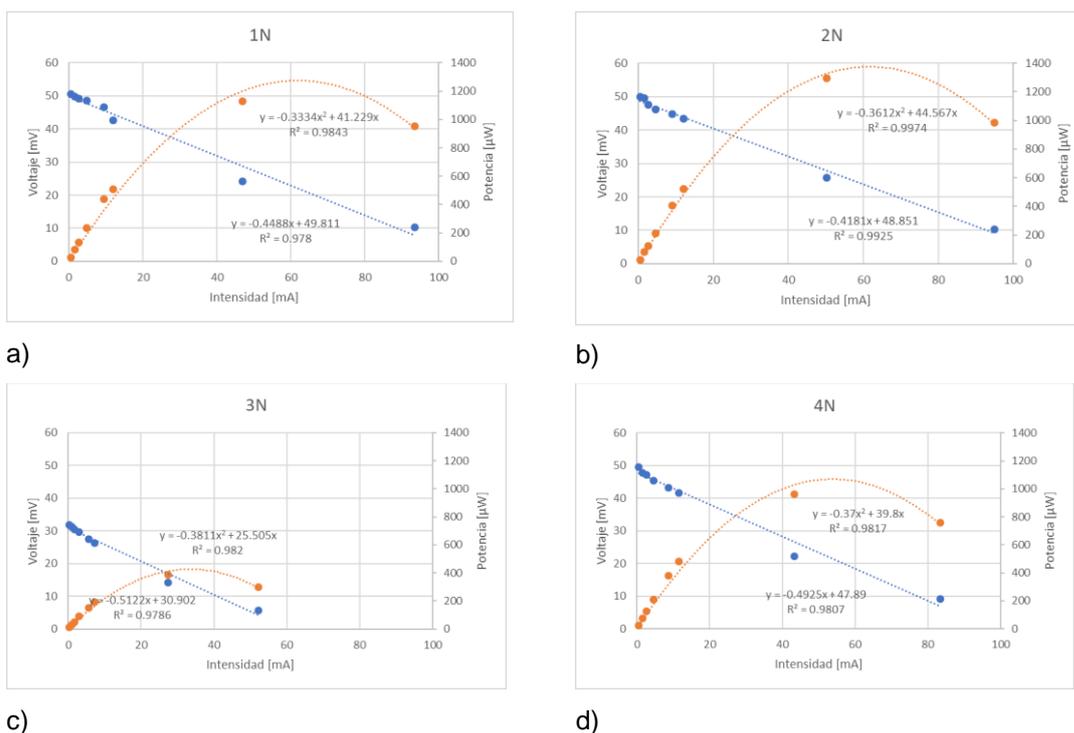
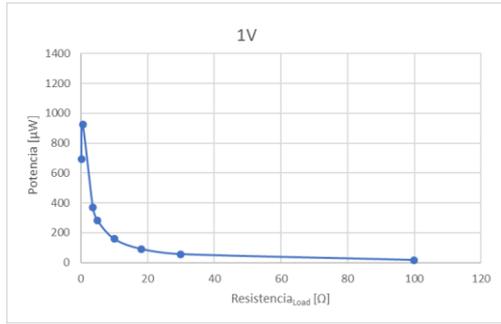


Fig. 342. Gráficas de voltaje (azul) y potencia (naranja) en función de la intensidad para los termoeléctricos compuestos por el material nuevo con sus respectivas líneas de tendencia.

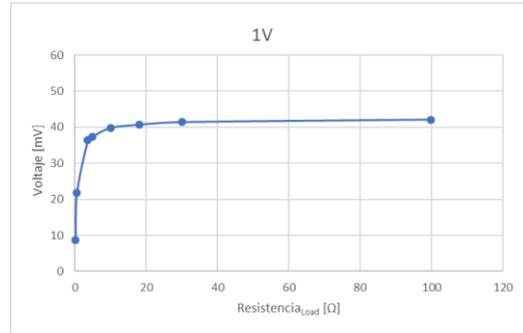
En este caso, el comportamiento en las gráficas de la Fig. 342 es similar al del termoeléctrico compuesto por el material viejo de la Fig. 341, pero cabe señalar que los valores de potencia y voltaje son superiores en el material nuevo, alcanzando los 50 mV en circuito abierto y una potencia máxima de 1,2 mW para intensidades próximas a 60mA. Más adelante se podrá ver con más claridad el comportamiento de ambos materiales con los valores promedios de cada uno.

Como se ha mencionado previamente, el voltaje y la intensidad en el circuito dependen de la resistencia que se le ponga al mismo. Las gráficas P-R de la Fig. 343, representan el valor de la potencia frente a la resistencia de carga. Esta curva experimenta un máximo en el punto donde la resistencia interna de la estructura en \square coincide con la resistencia de carga.

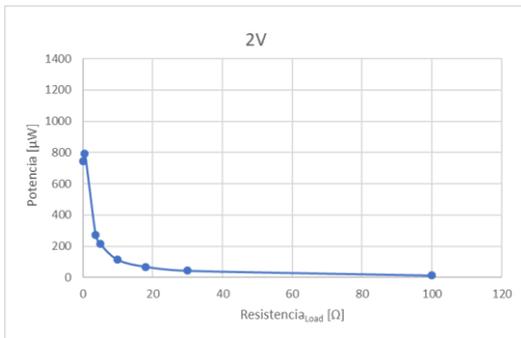
En el caso de las gráficas V-R de la Fig. 343, para los valores de resistencia más próximos a cero (cortocircuito), el voltaje toma los valores más bajos, mientras que un valor de resistencia infinito (circuito abierto) tiende a estabilizarse en el valor de medida sin carga.



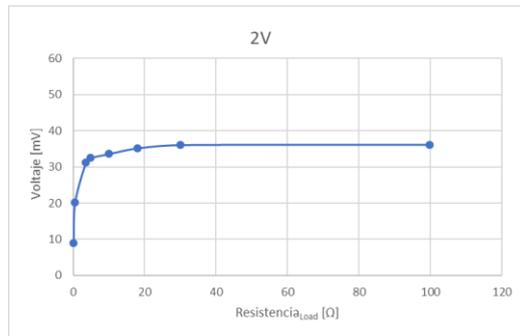
a)



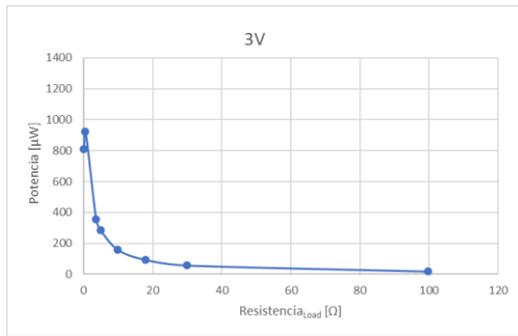
b)



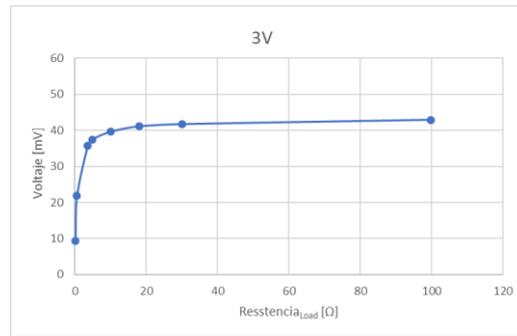
c)



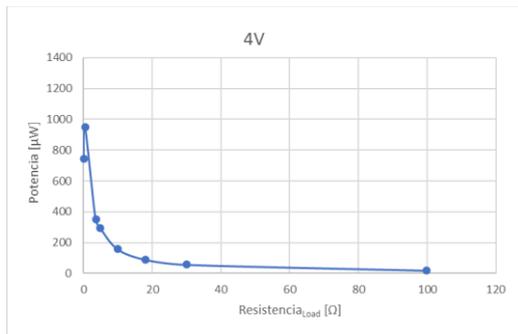
d)



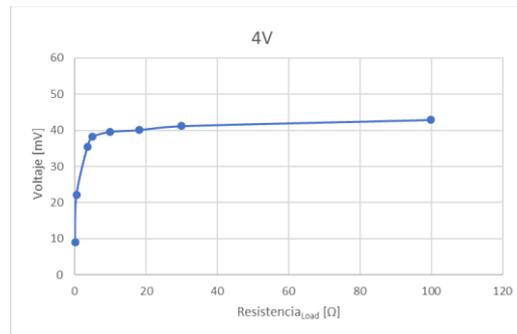
e)



f)

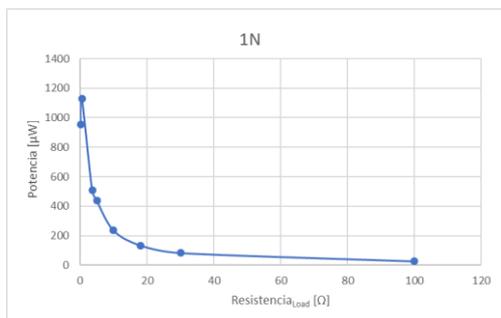


g)

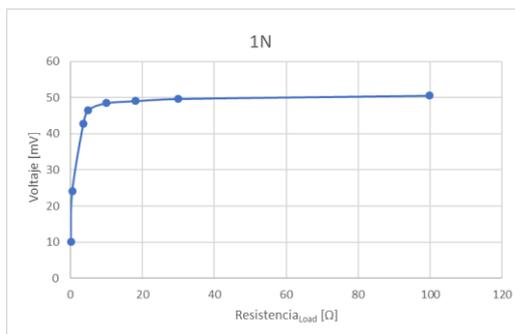


h)

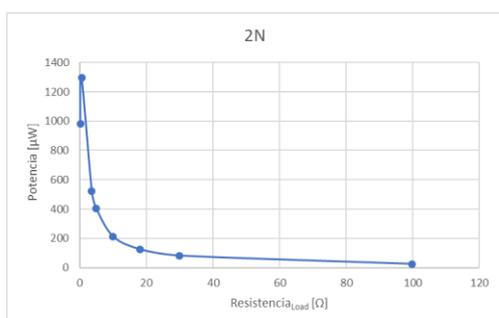
Fig. 343. Gráficas de potencia-resistencia y voltaje-resistencia con material termoelectrico de partida



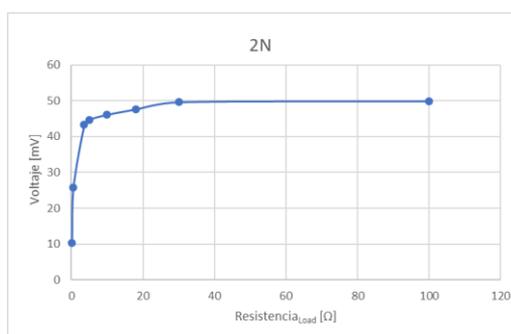
a)



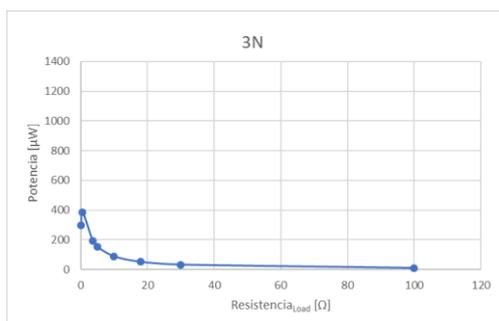
b)



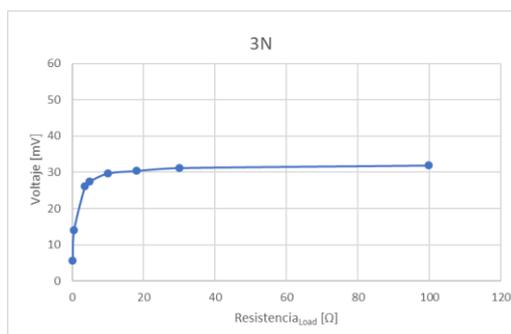
c)



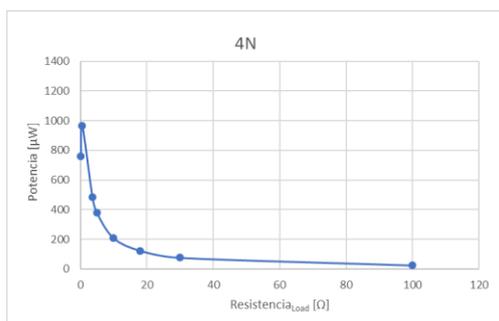
d)



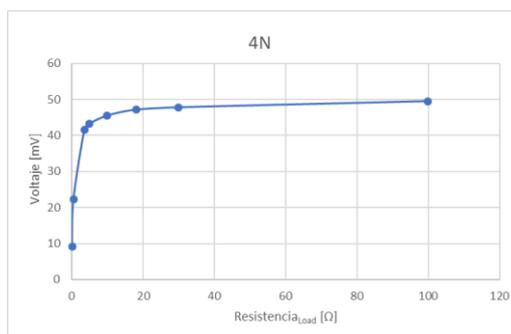
e)



f)



g)



h)

Fig. 344. Gráficas potencia-resistencia y voltaje-resistencia con material termoeléctrico nuevo

Del mismo modo que en el material de partida, ocurre en el material nuevo para las gráficas P-R y V-R de la Fig. 344. La potencia, el voltaje y la intensidad son función de la resistencia total del circuito, aunque los valores de potencia y de voltaje del material nuevo son superiores a los del material de partida.

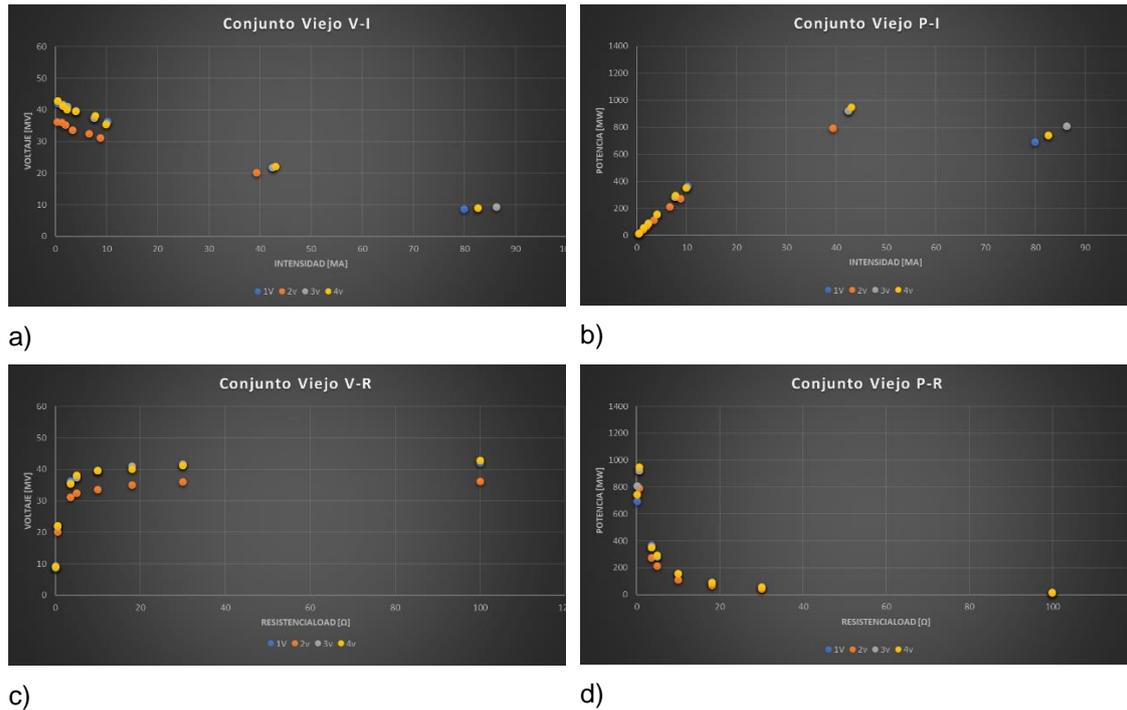


Fig. 345. Gráficas V-R, P-R, V-I y P-I para la estructura en □ con el material de partida (viejo).

En la Fig. 345 se aprecia el efecto generado en las gráficas V-R, P-R, V-I y P-I por el conjunto de las cuatro estructuras en □ del material de partida analizados.

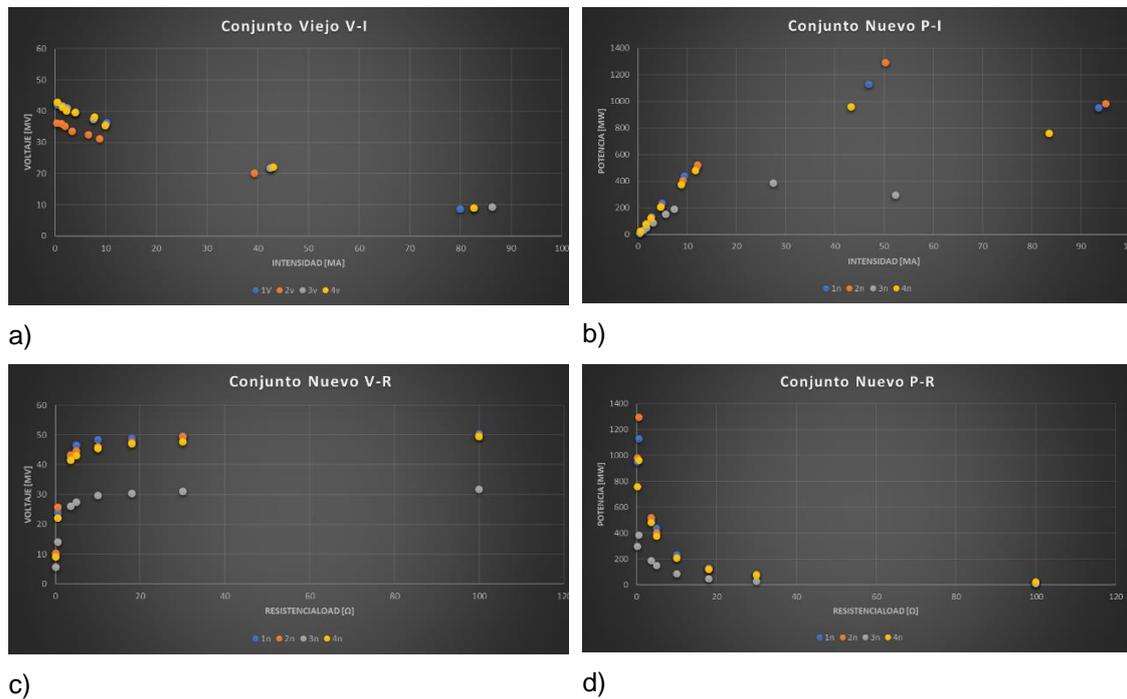


Fig. 346. Gráficas V-R, P-R, V-I y P-I para la estructura en □ con el material nuevo.

En la Fig. 346 se puede ver el conjunto de las cuatro estructuras en □ del material nuevo con sus graficas V-R, P-R, V-I y P-I para ocho puntos dados por las distintas configuraciones de resistencias.

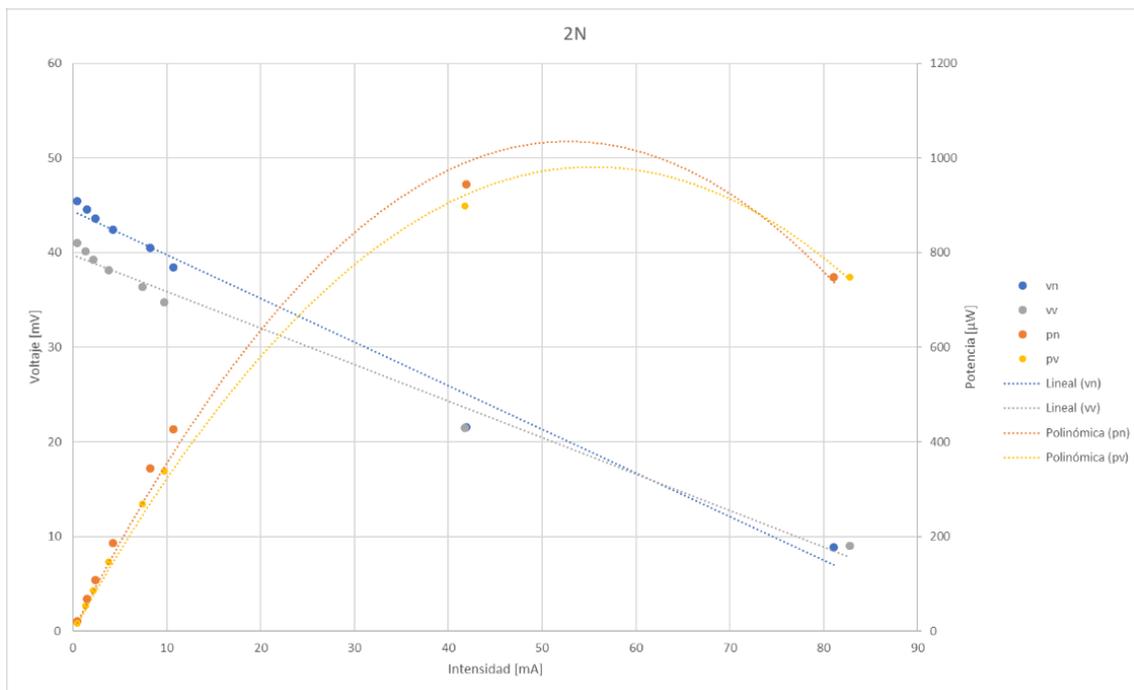


Fig. 347. Comparativa de voltaje y potencia en función de la intensidad para las estructuras termoeléctricas compuestas por el material nuevo y el de partida.

A través de las gráficas V-I y P-I de la Fig. 347, se puede ver claramente el comportamiento del termoeléctrico compuesto del material de partida y compararlo con el termoeléctrico fabricado con el material nuevo. Se puede apreciar cómo para una misma intensidad el voltaje del material nuevo (vn) es mayor que el del material de partida (vv). Por el contrario, cuando la intensidad ronda valores superiores a los 70 mA, este comportamiento se invierte. Esto se debe a que las resistencias internas de las estructuras en \square del material nuevo son mayores que las del material de partida. Por otra parte, estudiando el comportamiento de la potencia, coincide en tendencia con el voltaje, señalando que los valores de potencia del material nuevo son superiores para una misma intensidad a los del material de partida. A medida que la intensidad aumenta, este comportamiento se invierte y la potencia en el material de partida muestra valores más elevados.

6.3.4.2.- Ciclado y vida del material termoeléctrico

Estas pruebas de ciclado y vida van a servir para comprobar la resistencia de los termoeléctricos frente a unas situaciones de estrés térmico. Estos ensayos se van a realizar en el banco de ensayo desarrollado y mostrado en la Fig. 348. Este banco está provisto de cinco tomas de gas fijas. Cada toma de gas incorpora una válvula de seguridad como la de la Fig. 348 d), alimentada por el termopar de la Fig. 348 c) en contacto con la llama encendida. Cuando la llama se apaga, el termopar pierde temperatura y desengancha la válvula de gas. Los termoeléctricos se fijan sobre una lámina de acero. Esta lámina se compone de cinco orificios mecanizados donde poder poner las estructuras en \square . Como se puede ver en la Fig. 348 c), las estructuras en \square se fijan mediante tornillos a la plataforma. Para poder realizar los ensayos de ciclado y vida útil del material es necesario poder mover los termoeléctricos en el eje vertical. Para ello, la lámina de acero está unida a un gato accionado por una manivela. Gracias a este sistema se podrá mover en el eje vertical el elemento termoeléctrico hasta la altura deseada. En cada ensayo, se mide la resistencia interna de cada uno de los materiales de partida y nuevos.

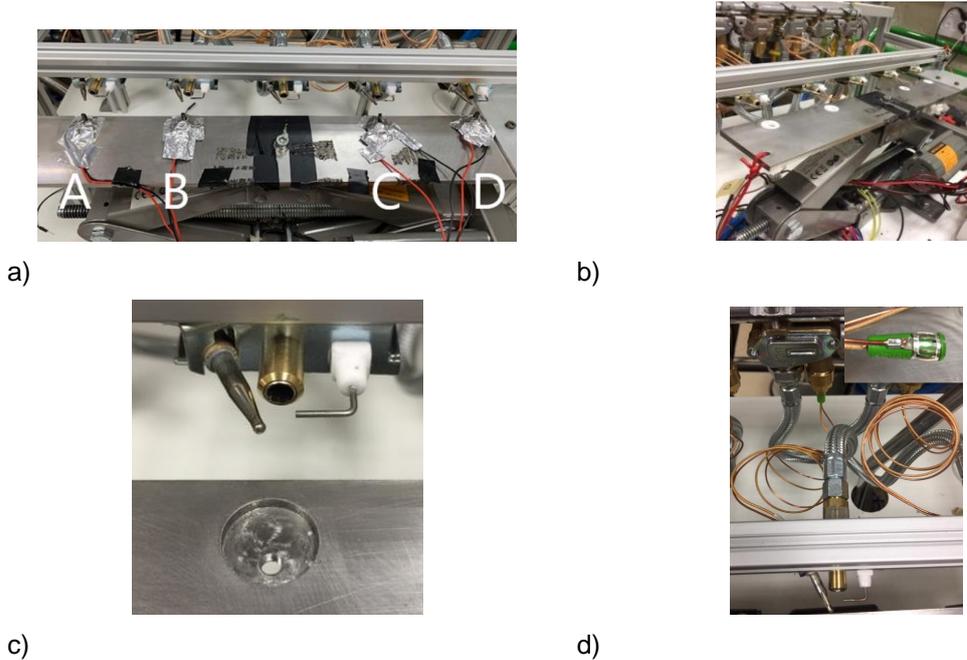


Fig. 348. Banco de ensayos: a) Posición de los termoelectrónicos b) Vista de un lado del banco de ensayos. c) Área de posicionamiento del termoelectrónico junto a la salida de la llama y el termoelectrónico de seguridad. d) Válvula de seguridad del gas, accionada mediante un termopar.

6.3.4.3.- Ciclado térmico

El objetivo de esta prueba es determinar la capacidad de los componentes y las uniones soldadas de resistir un determinado número de ciclos, oscilando entre temperaturas muy elevadas y la temperatura ambiente. Mediante estas pruebas se somete a la pieza a un estrés mecánico muy elevado, pudiendo producir cambios permanentes en las características físicas y eléctricas del material. La principal diferencia con la vida útil del material es que el proceso de ciclado no somete a la pieza a un estrés continuo. En el ensayo no es necesario llegar al fallo. Una vez realizadas las pruebas, si la resistencia interna del material supera el 5 %, se supondrá que ha llegado a su límite de fatiga. Una vez alcanzado este punto, es irreversible. El material no recupera sus cualidades iniciales, por lo que alcanza su máxima vida útil para las condiciones a las que fue sometido.

Ciclado con el material de partida.

A través de un número determinado de ciclos, se comprueba la integridad de la resistencia eléctrica de cada estructura en \square del material de partida. Para ello, se mide la resistencia interna de cada una de las estructuras en \square para 3000 ciclos. Es importante tener en cuenta, como se puede ver en la Tabla 58 (donde, TA, TB, TC y TD corresponden con las posiciones de las estructuras en \square en el banco de ensayos), que las resistencias eléctricas de las estructuras en \square del material nuevo son superiores a las del material de partida.

Tabla 58. Valor de la R_{int} de las estructuras en \square ensayadas.

Estructura en \square	Resistencia interna material de partida [m Ω]	Resistencia interna material nuevo [m Ω]
1	547,12 (TD Fallido)	607,91(*)
2	462,31 (TD)	542,59 (*)
3	497,95 (TC)	668,32 (TA)
4	465,48(*)	700,68 (TB)

(*) estructuras en \square sin evaluar en las pruebas de ciclado y vida.

En la imagen de la Fig. 349 aparecen los valores de resistencia obtenidos para las estructuras en \square del material de partida para 1000 y 3000 ciclos. Como se puede apreciar en la estructura en \square D de la Fig. 349, durante todo el proceso de medición los valores de resistencia permanecen estables con un comportamiento lineal. Al comienzo del segundo ciclado, la estructura en \square falló dando como resultado valores de resistencia muy elevados. En el segundo ciclado, se pudo observar cómo todas las estructuras en \square aguantaron sin problema, dando lugar a una línea de tendencia completamente estable. Esto indica que las estructuras en \square aguantan notablemente el esfuerzo al que se les ha sometido.

Por otro lado, la estructura en \square C en el primer ciclado a) presenta una línea de tendencia ascendente, siendo el valor de R^2 superior al de los demás casos. En la segunda prueba se le somete a un esfuerzo mayor, de 3000 ciclos, y se puede observar en la gráfica c) cómo la línea de tendencia se estabiliza disminuyendo notablemente el valor de R^2 , lo cual implica una reducción considerable del aumento del valor de la resistencia con el paso del tiempo.

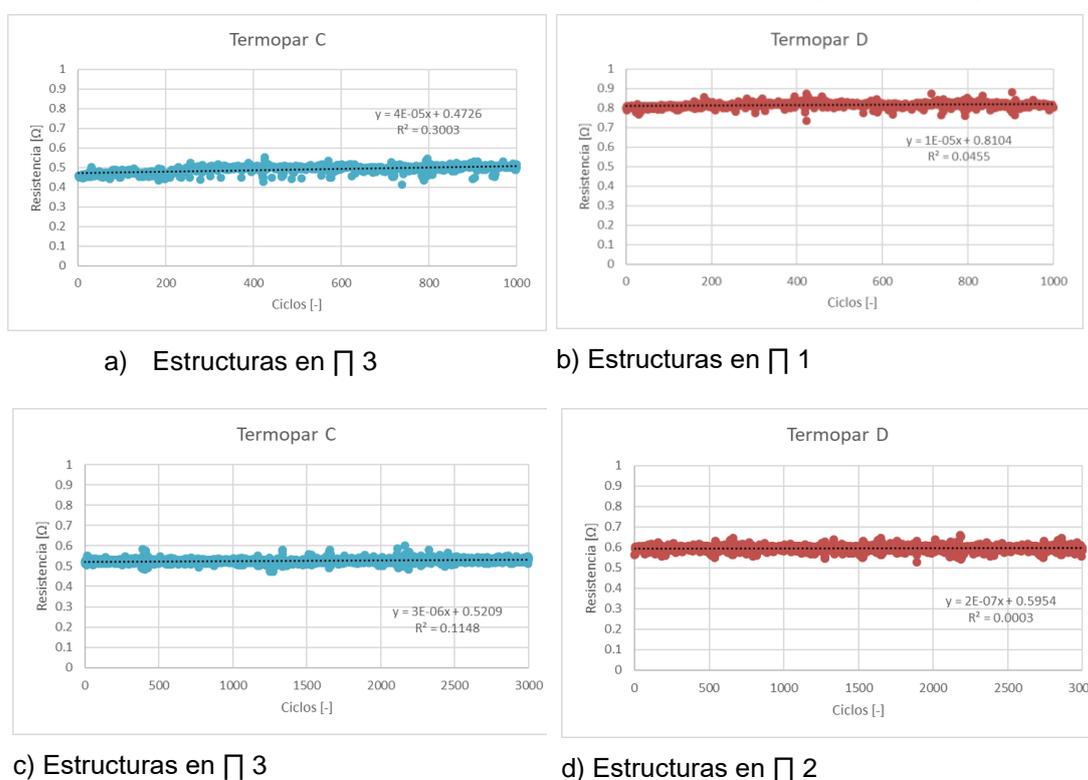
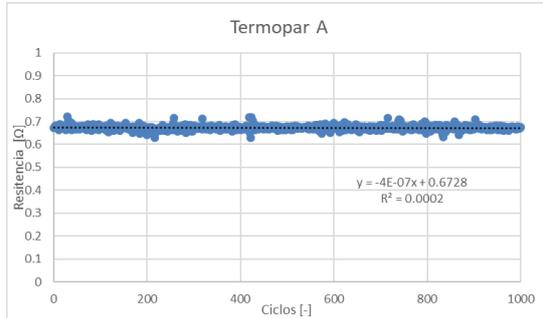


Fig. 349. Resultados de las mediciones de resistencias eléctricas formadas del material de partida para la prueba de ciclado térmico a) y b) 1000 ciclos, c) y d) 3000 ciclos.

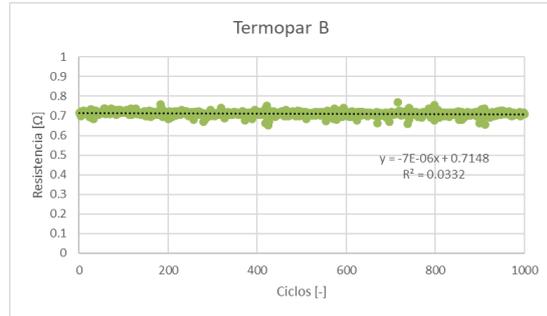
Es importante señalar que el calor aplicado a la estructura en \square puede poner en riesgo la base que lo soporta. Esto se debe a que el adhesivo con el que se adhiere la estructura en \square a la superficie durante el proceso de fabricación, sometido a un calor constante, acaba perdiendo eficacia y contacto con la superficie. Del mismo modo, las soldaduras que unen la estructura en \square al circuito son bastante frágiles. Si además se tiene en cuenta el calor constante al que se someten estas uniones, resulta sencillo que acaben soltándose. Para evitar el calentamiento excesivo de la plataforma, se añadió un aislante de aluminio en la superficie de la estructura en \square . Todo esto puede dar lugar a mediciones erróneas. Por lo que sería interesante, en un futuro, optimizar la base de la estructura en \square para asegurar un funcionamiento óptimo.

Ciclado con el material nuevo

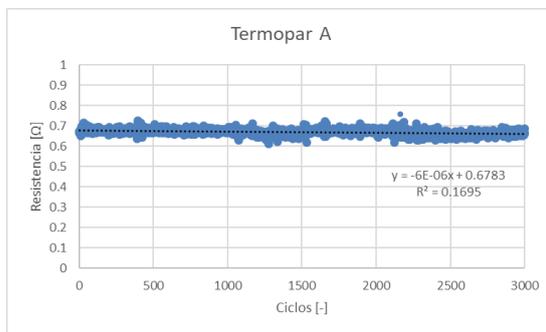
Se realizan las pruebas de ciclado de 1000 y 3000 ciclos en el material nuevo.



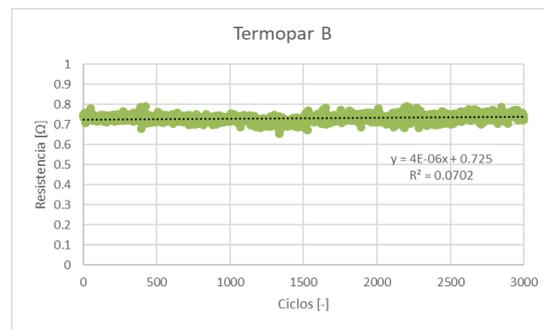
• a) Estructura en \square 3



• b) Estructura en \square 4



• c) Estructura en \square 3



• d) Estructura en \square 4

Fig. 350. Resultados de las mediciones de resistencias eléctricas formadas del material nuevo para la prueba de ciclado térmico a) y b) 1000 ciclos, c) y d) 3000 ciclos.

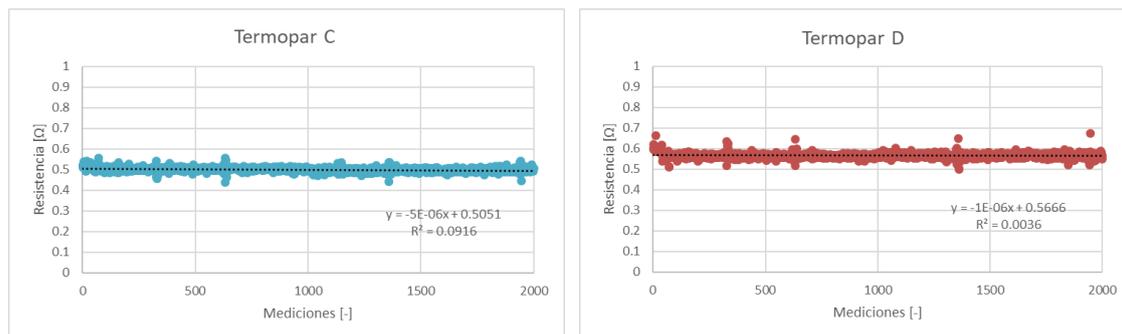
En la Fig. 350 se pueden observar los valores de resistencia eléctrica de las estructuras en \square del material nuevo. Todos presentan una línea de tendencia estable. Con el paso de los ciclos, los valores de resistencia no varían prácticamente, obteniendo valores de R^2 relativamente bajos. Esto implica que están aguantando el estrés al que se les está sometiendo sin incidencias.

6.3.4.4.- Vida del material termoeléctrico

Los ensayos de vida en un material se basan en someter al mismo a un esfuerzo constante, hasta el punto en el que este deje de funcionar adecuadamente o hasta un tiempo determinado. Es decir, se determina el periodo de tiempo en el que el material conserva sus cualidades fisicoquímicas. Por lo tanto, el material está sometido a un estrés constante hasta el fallo de este o durante un tiempo determinado de trabajo. Como puede ser, en este caso, la resistencia interna de las estructuras en \square . Una vez sometido el material a las pruebas, cuando su resistencia interna alcanza un valor de variación superior o igual al 5%, finaliza su periodo de vida útil. En todos los ensayos de vida, la toma de datos se realizará cada 15 segundos durante el periodo completo de testeo.

Vida continua de las estructuras en \square del material de partida.

El material de las estructuras en \square del material de partida es sometido a un ensayo de vida continua, donde se realizan 2000 mediciones a intervalos de 15 segundos en cada medición. Es decir, se mantiene la estructura en \square a temperaturas elevadas durante un largo periodo de tiempo.



a) Estructura en \square 3.

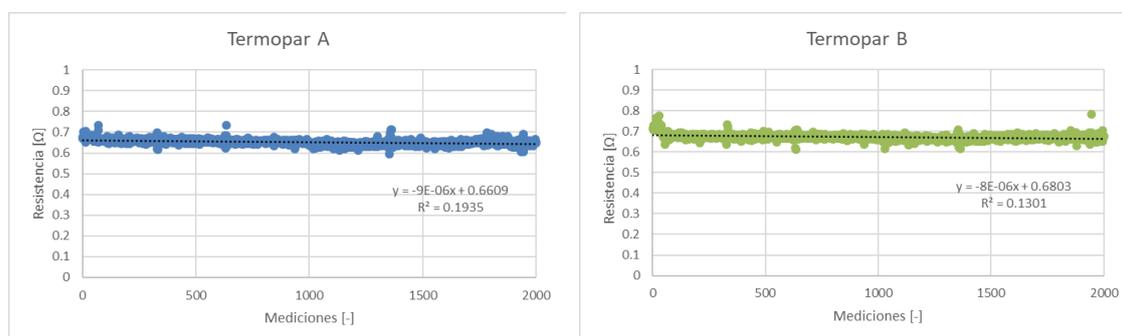
b) Estructura en \square 2.

Fig. 351. Valor de las resistencias eléctricas para el material de partida en la prueba de vida.

Una vez procesados los datos de la Fig. 351, se puede ver cómo ambos termoeléctricos compuestos del material de partida tienen una línea de tendencia estable. En la Fig. 351 b) el valor de R^2 es tan bajo que prácticamente no hay variación o es insignificante. El comportamiento en la estructura en \square de la figura a) varía ligeramente respecto al de b), provocando un valor más elevado de R^2 .

Vida continua del termoeléctrico compuesto del material nuevo.

Se somete el material nuevo a la misma prueba. Como se puede ver en la Fig. 352, comparando los dos materiales nuevo y viejo, el material nuevo tiene una mayor resistencia eléctrica que el material de partida.



a) Estructura en \square 3.

b) Estructura en \square 4.

Fig. 352. Valor de las resistencias eléctricas para el material nuevo en la prueba de vida.

Observando los resultados en la Fig. 352, se puede ver cómo en ambos casos la línea de tendencia es estable con una pendiente negativa. Con el paso del tiempo, los valores de resistencia van reduciéndose muy poco a poco con un valor muy similar de R^2 en ambos casos.

6.3.4.5.- Conclusiones

Conclusiones sobre la caracterización de los materiales.

Con los resultados obtenidos, se concluye que la estructura en \square fabricada con el material nuevo alcanza una potencia máxima de trabajo superior al fabricado con el material de partida. Del mismo modo, para valores iguales de intensidad el voltaje generado es superior en el material nuevo.



Conclusiones sobre ciclado de la estructura en \square .

Una vez completado el ensayo de ciclado y analizados los datos, se puede llegar a la conclusión de que la estructura en \square aguantan perfectamente un elevado número de ciclos. El material nuevo tiene menor variación de la resistencia eléctrica a medida que pasa el tiempo. Para el caso del termoelectrico fallido, sería necesario realizar más pruebas para asegurarse de si fue o no un caso aislado o, o estuvo motivado por estrés térmico al que fue sometido.

Conclusiones sobre la vida de la estructura en \square .

Una vez finalizada la prueba del periodo de vida en ambos tipos de termoelectricos, analizando los resultados se puede concluir que todas las estructuras en \square soportan largos periodos de estrés continuo sin fluctuaciones importantes en los valores de resistencia. La tendencia de las estructuras en \square es a mantenerse estable, reduciéndose muy lentamente los valores de resistencia eléctrica con el paso del tiempo, especialmente en el caso de los termoelectricos viejos.

Conclusiones generales.

Analizados todos los resultados obtenidos, se puede concluir que los termoelectricos fabricados con el material nuevo generan valores más altos de potencia y voltaje. Son capaces de soportar perfectamente elevados ciclos de estrés. Además, el proceso de fabricación en los termoelectricos nuevos es más rápido y requiere temperaturas más bajas de fabricación. Lo cual implica un menor costo energético en la fabricación de los termoelectricos.

6.4.- Nuevo concepto TEG de aplicación al VC-TE.

De cara a reducir los costes del sistema TEG, el elemento con mayor impacto económico es el módulo termoelectrico, por lo que en este apartado se evalúa un nuevo diseño orientado tanto a la reducción de costes como a la reducción del número de unidades necesarias mediante la mejora de su eficacia en la generación, que no eficiencia, ya que los conceptos aplicados no actúan en los parámetros que afectan directamente a la eficiencia.

Si bien este concepto no se ha llegado a implementar y validar, sí se ha planteado el análisis de su potencial impacto, quedando para futuros pasos su validación.

6.4.1.- Diseño del nuevo concepto en discos.

La idea básica de la propuesta consiste en sustituir los módulos termoelectricos por obleas termoelectricas del mismo material. La oblea termoelectrica es un componente que se produce en una fase previa a la fabricación del módulo.

Brevemente explicado, para la fabricación de un módulo se parte de un lingote n y otro p, que pueden haber sido crecidos por diferentes métodos (*Czochralski*, *zone melting*, etc.). Este lingote se divide en obleas mediante corte por hilo, con lo que se genera una primera pérdida de material equivalente a la anchura del corte del hilo, que repercute en un incremento de coste de la oblea.

La oblea recibe tratamiento para proteger el semiconductor mediante la deposición de barreras de anti-difusión de níquel de unas pocas micras en ambas caras. Y otra capa de estaño para facilitar la soldadura, también de unas pocas micras.

Con la oblea así dispuesta, se somete a un nuevo proceso de corte para obtener los dados termoelectricos. Este proceso implica nuevamente desperdicio de material e incremento de coste asociado al producto final.

Los datos termoeléctricos nuevamente se constituyen en módulos mediante un proceso de ensamblado manual que añade defectivo y coste, que ya se ha explicado con anterioridad.

Por ello, con la sustitución propuesta se evita desperdicio, defectivo e incremento de coste.

Aproximadamente el 50% del coste de producción de los dados corresponde al coste de fabricación del lingote, y el porcentaje aumenta al 85% si se considera el coste de producción de la oblea. Lo que supone un ahorro en coste del 15% con respecto al material empleado en forma de dados.

Como puede apreciarse en la Fig. 353, el coste del material *bulk* puede suponer un 40% del coste del módulo.

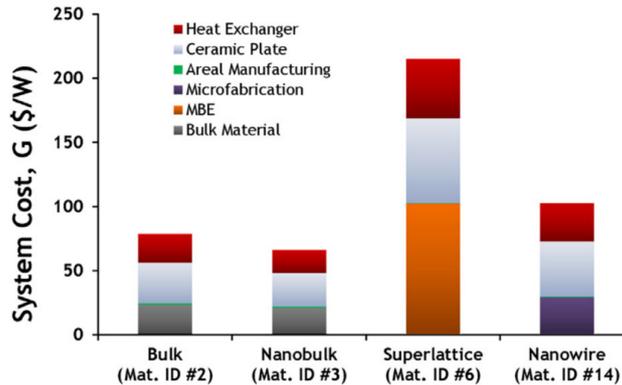


Fig. 353. Desglose de costes de un módulo termoeléctrico para varias clases de fabricación [84]

Por ello, con la solución propuesta, sin cerámica, ni cobre, ni proceso de ensamblado, la estimación que se baraja sobre la repercusión en el precio podría alcanzar una reducción del 67% en el coste de los módulos.

Hay que tener en cuenta que los módulos considerados tienen 127 dados termoeléctricos de 1,4 x1,4 mm² y 1,6 mm de altura, que vienen a representar unos 4 gramos por modulo y unos 5 cm² de área del material activo frente a los 16 cm² del módulo termoeléctrico completo.

Una oblea de este área tendría un diámetro de 23 mm, que deja mucho espacio a un disco que cubriera todo el área que el módulo cubriría. De hecho, con un diámetro de 40 mm, la oblea termoeléctrica cubriría un área de 12,5 cm². Esto supone 2,5 veces más área.

Cabe señalar que, manteniendo la misma diferencia de temperatura entre las caras del material termoeléctrico, la relación entre la tensión y la corriente generada se invertiría, siendo la tensión resultante equivalente a la generada por un solo dado (256 veces inferior a la generada por un módulo) y la corriente generada se incrementaría del mismo modo, por lo que la potencia eléctrica generada sería la misma, sin tener en consideración la afectación de la resistencia de contacto.

En la imagen de la Fig. 354 se aprecia el aspecto que podría tener una oblea termoeléctrica con estructura en \square .

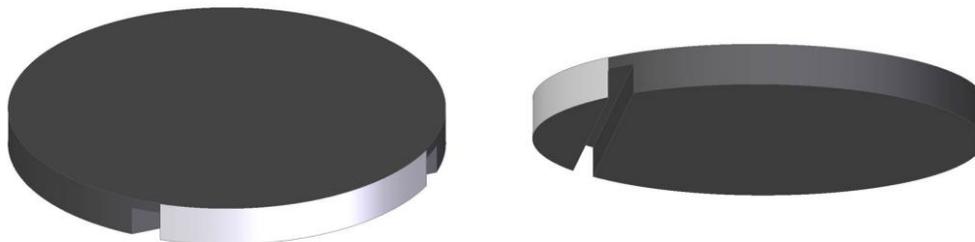


Fig. 354. Estructura en \square generada en la totalidad de un disco u oblea termoeléctrica.



Sin embargo, una solución como la mostrada en la Fig. 354 que abarque el máximo área generaría 2,5 veces más potencia, en igualdad de condiciones de contorno, y reduciría las resistencias de contacto eléctrico, el defectivo en el proceso de fabricación y el desperdicio de materiales.

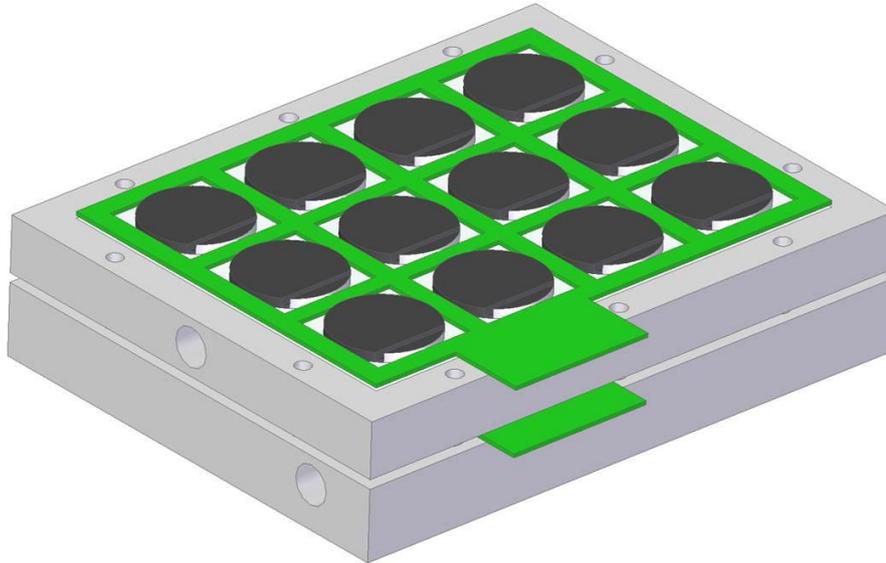


Fig. 355. Sistema TEG con sustitución de módulos termoelectricos por obleas termoelectricas.

La solución integrada en el sistema TEG, que se puede apreciar en la Fig. 355, contiene 72 obleas, que podrían estar eléctricamente conectadas en serie.

Las intensidades generadas por el VC-TE alcanzaron los 230 mA, con un área de 1,96 mm², por lo que un disco de 5 cm² podría generar cerca de 60 A y 1,4 mV. Del mismo modo, la oblea de tamaño mayor comentada podría generar hasta 150 A con la misma tensión para las condiciones de la prueba.

Sin embargo, esta propuesta, pese a parecer ventajosa a priori, lleva implícito un proceso de desarrollo eléctrico en cuanto a lo que adaptación de señal se refiere, ya que es necesario elevar la tensión generada hasta un mínimo que sea aprovechable a nivel electrónico.

Un primer paso consistiría en conectar todas las obleas eléctricamente en serie, con lo que alcanzarían cerca de 100 mV, pero se requiere un análisis de la factibilidad del diseño electrónico.

6.4.2.- Estado del arte de las etapas elevadoras de ultra baja tensión y muy alta intensidad

No existen o no se han identificado soluciones comerciales capaces de elevar tensiones de milivoltios y cientos de amperios a formas de señal manejables, siendo la más alta encontrada una solución de *Texas Instrument* [174] con el convertidor TPS61088 y una potencia de 6,6 W con la capacidad de soportar entradas de 0,9-2,7 V y 9,78 A y salidas de 3,3 V y 2 A. La eficiencia de trabajo ronda el 75% y la intensidad de entrada sería de 9,78 A.

En este sentido, a nivel de investigación, apenas existe un puñado de trabajos a tener en consideración que sí alcanzan a convertir corrientes de entrada en el rango de interés de este proyecto. Hao Ma, en la universidad de Zhejiang [175], desarrolló en 2013 un convertidor de corriente IPOS de 1V/200A de entrada y 48V de salida construido para un sistema de carga electrónico de 3kW y los resultados experimentales confirman que el sistema propuesto con el convertidor es una opción competitiva y eficiente, alcanzó incluso un 85% de eficiencia.

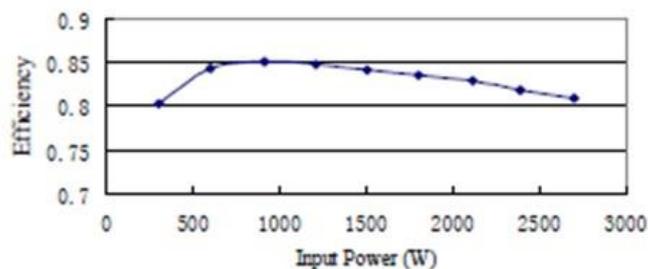


Fig. 356. Eficiencia del conversor DC-DC de 3KW de la universidad de Zhejiang

En la Universidad de Viena, Edlmoser [176] [177] trabajó varias etapas del convertidor en paralelo para lograr una eficiencia total aceptable. Convirtiendo una tensión de entrada de aproximadamente 2V en 350V para aplicaciones de inversores solares de 200 W de potencia que, en el caso de un inversor monofásico, esto conduce a una corriente de entrada de aproximadamente 100 A.

Mentrova [178] analizaba en 2002 las nuevas tecnologías de componentes, circuitos y embalajes necesarias para lograr una densidad de potencia de 500 W para futuros convertidores de corriente continua de bajo voltaje y alta corriente. Consiguiendo un reporte de 90% de eficiencia para potencias de 100 W y tensiones de salida de 3,3 V y 1,5 V.

Hay que tener en consideración que las estimaciones iniciales para cada unidad que compone el elemento de generación termoeléctrica podría generar unos 100 mV y 60 A-150 A o más. Sin embargo, a pesar del importante reto que supone, se aprecia que el enfoque planteado tiene mucho potencial, ya que, de tener éxito, se contaría con un *know how* y un producto disruptivo en cuanto a la solución de generación termoeléctrica.

6.4.3.- Potencial impacto económico.

Aun quedando pendiente la inclusión del nuevo concepto en el modelo simplificado, se puede considerar que la solución con obleas de Bi_2Te_3 tiene una cota superior de mejora de potencia eléctrica generada en 2,5 veces la generada por el diseño de VC-TE actual. Las limitaciones vendrían impuestas por la reducción de la diferencia de temperatura en las caras de las obleas, si no se modifica y mejora el coeficiente de transferencia térmica de los disipadores, ya que la conductancia térmica a través del área de las obleas ha aumentado con respecto a la de los módulos termoeléctricos y por la afectación de las resistencias eléctricas de contacto, además de por la eficiencia de las etapas de elevación electrónica, difíciles de predecir de modo teórico.

Por ello, considerando la cota superior indicada, la estimación de los costes, teniendo en consideración la reducción de precio en los módulos y el extra de obleas necesarios para alcanzar los 18 W, rondaría los 214 € por VC-TE, lo que arroja un *payback* más interesante de 14,2 años. La aplicación de subvenciones orientadas a la mejora de la eficiencia energética por parte de agencias públicas estatales o regionales, como el EVE, podrían ayudar a reducir el periodo de *payback* y hacerlo más competitivo frente al radiador o el Fan-Coil.

Para el caso del $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ desarrollado, cabe señalar que su figura de mérito es relativamente baja en comparación con el Bi_2Te_3 . Trabajando a muy altas temperaturas, podría alcanzar eficiencias superiores, pero en el rango de temperaturas de trabajo, su figura de mérito es muy baja (ver Fig. 357) y la eficiencia alcanzable es muy inferior a la del Bi_2Te_3 (ver Fig. 288), por lo que el *payback* de una solución de VC-TE basada en $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ sería muy superior a la del Bi_2Te_3 .

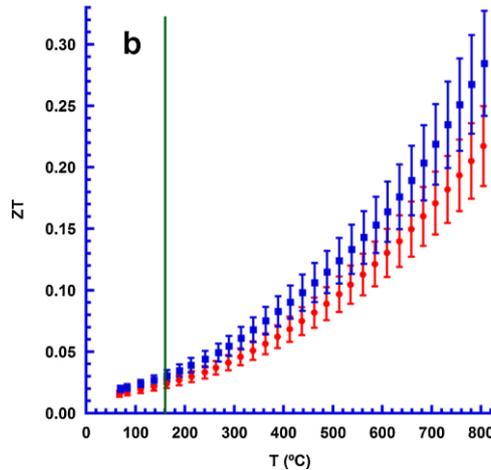


Fig. 357. Figura de mérito del $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ [179]

6.5.- Conclusiones

En el capítulo 6 se ha evaluado teóricamente una novedosa estructura termoeléctrica Unileg en \square mediante un modelo número implícito termoeléctrico de diferencias finitas hecho a medida.

- El desequilibrio térmico y eléctrico debido a la presencia del recubrimiento conductor ha resultado en una diferencia de potencial neta entre las patas de la estructura.
- La capa conductora adherida a una de las patas del elemento termoeléctrico cumple la función esperada de simular un cortocircuito eléctrico, disminuyendo la resistencia eléctrica teórica de la estructura en ausencia de este recubrimiento.
- La validación de la estructura ha permitido su protección mediante patente europea.
- El modelo numérico implícito ha demostrado ser válido para la simulación de estructuras inusuales difícilmente modelizables mediante modelos analíticos. Lo que permite disponer de una herramienta muy valiosa desde el punto de vista técnico, para abordar el desarrollo de proyecto de *energy harvesting* con arquitectura poco convencionales de materiales termoeléctricos.

Se ha desarrollado también un nuevo proceso de fabricación asociado un material óxido robusto, con el objetivo de economizarlo para hacerlo interesantes para aplicaciones industriales orientadas a la producción masiva.

- Se ha caracterizado completamente el material desde el punto de vista termoeléctrico; incluyendo la conductividad térmica, eléctrica, y coeficiente Seebeck
- Se ha reducido un 95% el tiempo de procesamiento requerido para la fabricación del material. Si bien, puede suponerse una correlación directa con el coste final de material, el análisis de dichos costes es una tarea que todavía está pendiente.
- El nuevo proceso mejora ligeramente el factor de potencia.

Se han desarrollado con éxito estructuras Unileg en \square con el material óxido y validado mediante ensayos en laboratorio en banco hecho a medida aplicando el método del offset compensado el comportamiento y la robustez del diseño de la nueva estructura y el material óxido.

- Ha superado más de 4000 ciclos térmicos sin variación significativa de la resistencia interna.
- Ha superado más de 8 horas a llama continua también sin variación significativa de la resistencia interna.

- El diseño de estructura Unileg en \square específico ensayado ha generado cerca de 50 mV sin carga y 50 mA en su punto de máxima potencia, que ronda los 1,2 W.

Aunque su generación es inferior a otras estructuras Unileg, su diseño no está todavía optimizado, dejando en este punto posibles líneas de investigación a futuro. Su robustez, además, hace de esta solución una candidata interesante para competir en aplicaciones nicho de generación de energía.

Se han planteado, a continuación, nuevos diseños basados en la estructura patentada, orientados a la reducción de los costes del VC-TE y se ha evaluado su potencial impacto. Sin embargo, su integración en el modelo para su análisis termoeléctrico y su validación mediante prototipo queda pendiente para futuros desarrollos.





CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES GENERALES Y LINEAS FUTURAS



7.1.- Introducción.

Este último capítulo, con el que se finaliza la presente tesis doctoral, condensa de forma breve los puntos fundamentales del trabajo desarrollado, expone las principales conclusiones obtenidas y resultados más significativos, y discute las líneas de investigación que quedan abiertas para futuros trabajos.

7.2.- Conclusiones

En el capítulo 3 se ha desarrollado un modelo analítico unidimensional simplificado que englobará la totalidad del sistema de generación termoeléctrico (TEG) y se ha validado experimentalmente con un prototipo TEG completo desarrollado sobre la base de un modelo analítico no ideal que incluye la afectación de las resistencias de contacto térmicas y eléctricas para el cálculo y diseño de los componentes. Igualmente, y para facilitar el desarrollo de los ensayos, se ha desarrollado una metodología específica basada en las características térmicas y termoeléctricas del TEG.

- El modelo analítico unidimensional simplificado es capaz de predecir la generación termoeléctrica de aplicaciones de recuperación del calor residual para la generación de energía eléctrica para bajas temperaturas.
- El diseño termoeléctrico realizado tiene la capacidad de cumplir sobradamente los objetivos establecidos, dependiendo de las condiciones de contorno.
- La simplificación de la metodología de ensayo en el establecimiento del estado estacionario ha resultado coincidente en resultados con las estimaciones de los modelos de partida.

En el capítulo 4 se ha descrito el modo de trabajo de un ventiloincubador termoeléctrico (VC-TE) integrando en un ventiloincubador convencional todo el desarrollo termoeléctrico del capítulo 3. Se ha desarrollado un VC-TE completo y tomado mediciones reales del mismo con las que se valida experimentalmente del modelo analítico unidimensional simplificado desarrollado.

- El VC-TE no alcanza el nivel de la potencia eléctrica generada establecido en las especificaciones, debido a la poca capacidad de disipación de calor del plato frío; apenas genera 6 W, frente a los 18 W objetivo.
- A pesar de ello, el modelo analítico unidimensional simplificado es capaz de predecir con un error muy bajo la potencia de generación eléctrica y la eficiencia de trabajo, por lo que se dispone de un modelo, con ciertas limitaciones, útil como herramienta de cálculo para el desarrollo de aplicaciones de recuperación del calor residual para la generación de energía eléctrica.
- El modelo computacional desarrollado resulta en una herramienta muy útil para la caracterización y simulación de aplicaciones de generación termoeléctrica en escenarios de energy harvesting de baja temperatura.

Por otra parte, se ha desarrollado una metodología para buscar la evidencia de la mejora de los ventiloincubadores frente a los radiadores convencionales. Con esta metodología se ha realizado el cálculo de los consumos de ambos elementos para los entornos climáticos de interés, resultando en una herramienta muy útil para disponer de una primera estimación de la mejora de eficiencia, aunque con limitaciones que deben ser mejoradas para incrementar la fiabilidad y precisión.

- El ventiloincubador estudiado ofrece un ahorro del 20% del consumo frente a un radiador convencional, en el País Vasco para el día 5 de enero de 2017, lo que resulta directamente extrapolable a la mejora de la eficiencia.



- La información aportada por los fabricantes de Fan-Coils relativa a la mejora de eficiencia del 32% está en consonancia con los resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se ha realizado un estudio de costes y de impacto potencial de la solución de VC-TE concluyendo que:

- La inversión inicial que es necesario realizar es sin duda uno de los mayores obstáculos en cuanto al éxito comercial de estos sistemas se refiere.
- Las mejoras tecnológicas junto con posibles subvenciones por su sostenibilidad podrían fomentar el éxito de estas instalaciones en nuevas viviendas y rehabilitación, siendo en rehabilitación donde gozan de mayores oportunidades.
- El coste de los módulos termoelectricos es principal obstáculo para reducir el payback y mitigar la barrera de entrada al mercado que supone el desembolso inicial.
- El ahorro económico potencial en País Vasco puede ascender a cerca de 50 M€ anuales, con un impacto medioambiental potencial equivalente a 260.000 árboles.

Al inicio del capítulo 3 se han sentado las bases teóricas y desarrollado una metodología numérica implícita unidimensional de un sistema termoelectrico bidimensional de aplicación a geometrías donde los datos difieren de las convencionales y la aplicación de modelos analíticos resulta excesivamente complejo.

En el capítulo 6 se ha evaluado teóricamente una novedosa estructura termoelectrica Unileg en \square mediante el modelo número implícito termoelectrico de diferencias finitas hecho a medida introducido en el capítulo 3. Se han sacado las siguientes

- El desequilibrio térmico y eléctrico debido a la presencia del recubrimiento conductor ha resultado en una diferencia de potencial neta entre las patas de la estructura.
- La capa conductora adherida a una de las patas del elemento termoelectrico cumple la función esperada de simular un cortocircuito eléctrico, disminuyendo la resistencia eléctrica teórica de la estructura en ausencia de este recubrimiento.
- La validación de la estructura ha permitido su protección mediante patente europea.
- El modelo numérico implícito ha demostrado ser válido para la simulación de estructuras inusuales difícilmente modelizables mediante modelos analíticos. Lo que permite disponer de una herramienta muy valiosa desde el punto de vista técnico, para abordar el desarrollo del proyecto de *energy harvesting* con arquitecturas poco convencionales de materiales termoelectricos.

Se ha desarrollado también un nuevo proceso de fabricación asociado un material óxido robusto, con el objetivo de economizarlo para hacerlo interesantes para aplicaciones industriales orientadas a la producción masiva.

- Se ha caracterizado completamente el material desde el punto de vista termoelectrico; incluyendo la conductividad térmica, eléctrica, y coeficiente Seebeck.
- Se ha reducido un 95% el tiempo de procesamiento requerido para la fabricación del material.
- El nuevo proceso mejora ligeramente el factor de potencia.

Se han desarrollado con éxito estructuras Unileg en \square con el material óxido y validado mediante ensayos en laboratorio, en banco hecho a medida, aplicando el método del offset compensado, el comportamiento y la robustez del diseño de la nueva estructura y el material óxido.

- Ha superado más de 4000 ciclos térmicos sin variación significativa de la resistencia interna.
- Ha superado más de 8 horas a llama continua también sin variación significativa de la resistencia interna.
- El diseño de la estructura Unileg en \square específico ensayado ha generado cerca de 50 mV sin carga y 50 mA en su punto de máxima potencia, que ronda los 1,2 W.

- Aunque su generación es inferior a otras estructuras Unileg, su diseño no está todavía optimizado, dejando en este punto posibles líneas de investigación a futuro. Su robustez, además, hace de esta solución una candidata interesante para competir en aplicaciones nicho de generación de energía.

Se han planteado, al finalizar el capítulo 6, nuevos diseños basados en la estructura patentada, orientados a la reducción de los costes del VC-TE y se ha evaluado su potencial impacto.

7.3.- Líneas futuras de investigación.

La presente tesis deja abiertas dos líneas de investigación diferenciadas. La primera, centrada en la continuidad del desarrollo del VC-TE con la tecnología termoeléctrica u otra tecnología competidora que permita mejorar el *payback*. La segunda, orientada a la optimización de las estructuras en \square para garantizar un proceso de fabricación robusto y mejorar su eficiencia.

En la primera vía, podría sopesarse el empleo de motores de combustión externa como ya se apuntaba en el estudio del estado del arte sobre las posibilidades de la tecnología Stirling.

Por otro lado, dando continuidad a la vía termoeléctrica, es conveniente profundizar en el modelo analítico unidimensional simplificado, de modo que el modelo incluya elementos que reduzcan sus limitaciones, como el deterioro de los materiales termoeléctricos, siendo necesario un estudio que aborde su evolución en el tiempo. Es necesario evaluar también la incidencia de la variación de los parámetros de entrada al modelo, en aras de aumentar la diferencia de temperatura en el TEG, ya que la tendencia de crecimiento de la potencia generada con respecto a la diferencia de temperatura es de carácter exponencial y puede ofrecer grandes ventajas.

Igualmente, es necesario mejorar la metodología aplicada a la identificación de una evidencia de la mejora de eficiencia del Fan-Coil frente al radiador. El valor de eficiencia obtenido está sujeto a errores cometidos por las limitaciones de la metodología aplicada. Por ello, no puede considerarse el valor obtenido como valor absoluto al no haberse estimado el error cometido en la metodología aplicada. Quedando esta labor pendiente para futuros desarrollos.

Con respecto a las estrategias de mejoras propuestas al finalizar el capítulo 6, es necesario realizar su integración en el modelo para su análisis termoeléctrico. Igualmente, su validación mediante prototipo queda pendiente para futuros desarrollos.

Las limitaciones de la metodología numérica implícita unidimensional ponen de manifiesto la necesidad de un trabajo de continuidad en el desarrollo de la misma, pero de igual manera, permiten reconocer el enorme valor que una herramienta de estas características puede representar para el análisis de geometrías y materiales complejos.

Con respecto al proceso de fabricación de los materiales óxidos, la reducción de tiempo conseguida (95%) en el tiempo de procesamiento requerido para la fabricación del material, puede relacionarse de forma directa con el coste final de material, sin embargo, está pendiente el desarrollo de un análisis detallado de dichos costes.

La segunda línea de investigación se orienta a la optimización de las estructuras en \square trabajando a alta temperatura, donde han demostrado su robustez, pero previo a su aplicación en productos industriales, requiere solventar las dificultades identificadas en algunas partes del proceso de fabricación, como la metalización y la reducción de las resistencias internas para mejorar su eficiencia.



CAPÍTULO 8 *APORTACIONES CIENTIFICAS*



8.1.- Publicaciones en revistas internacionales

G. García, P. Martínez-Filgueira, M. Cordon, I. Urrutibeascoa, A. Sotelo, J.C. Diez, M.A. Torres, M.A. Madre, 2019. *Π Unileg Thermoelectric Structure for Cycling Robustness at High Temperature and Low Manufacturing Cost*. Journal of Electronic Materials, 48, 2010–2017. doi: 10.1007/s11664-019-06944-x

G. García, M. Cordon, P. Martínez-Filgueira, I. Garay, J. Aranceta, y K. Martin 2019. *Development and Experimental Validation of a New Off-Grid Thermoelectric Fancoil for Domestic Heating*, Journal of Electronic Materials, vol. 48, n.º 4, pp. 1785-1794. doi: 10.1007/s11664-018-06860-6

M.A. Torres, **G. García**, I. Urrutibeascoa, M.A. Madre, J.C. Diez, A. Sotelo, 2019. Fast preparation route to high-performances textured Sr-doped Ca₃Co₄O₉ thermoelectric materials through precursor powder modification. Science China Materials. 62, 399–406. doi: 10.1007/s40843-018-9339-1. Factor de impacto: 5,636

M.A. Madre, I. Urrutibeascoa, **G. García**, M.A. Torres, A. Sotelo, J.C. Diez, 2019. *High-Temperature Stability of Hot-Pressed Sr-Doped Ca₃Co₄O₉*. Journal of Electronic Materials, 48, 1965–1970. doi: 10.1007/s11664-018-6748-x

8.2.- Publicaciones en revisión.

P. Martínez-Filgueira, E. Zulueta, A. Sanchez-Chica, **G. García**, U. Fernandez-Gamiz, J. Soriano. *Experimental Air Impingement Crossflow Comparison and Theoretical Application to Photovoltaic Efficiency Improvement*. Applied Thermal Engineering. Factor de impacto: 4,026

Relativa a la mejora del sistema de refrigeración mediante la técnica de *Water/Air Impingement Jet*.

8.3.- Publicaciones en congresos internacionales

G. García, P. Martínez-Filgueira, M. Cordon, I. Urrutibeascoa, A. Sotelo, M. A. Madre, *A Novel Thermoelectric Leg Structure oriented to Cycling Robustness at High Temperature and Low Manufacturing Cost*. 37th Annual International and 16th European Conference on Thermoelectrics (ICT&ECT18). Caen, France. July 2018.

G. García, M. Cordon, P. Martínez-Filgueira, I. Garay, J. Aranceta, K. Martin, *Development and Experimental Validation of a new off-grid Thermoelectric Fancoil for Domestic Heating*. 37th Annual International and 16th European Conference on Thermoelectrics (ICT&ECT18). Caen, France. July 2018.

A. Sotelo, **G. García**, I. Urrutibeascoa, M.A. Madre, M.A. Torres, J.C. Diez, *Application of powder engineering to achieve high performances in textured Sr-doped Ca₃Co₄O₉ with very short processing times*. 37th Annual International and 16th European Conference on thermoelectrics (ICT&ECT18). Caen, France. July 2018.



M. A. Madre, I. Urrutibeascoa, **G. García**, M.A. Torres, A. Sotelo, J.C. Díez, *High temperature stability of hot pressed Sr-doped Ca₃Co₄O₉ samples*. 37th Annual International and 16th European Conference on thermoelectrics (ICT&ECT18). Caen, France. July 2018.

A. Sotelo, **G. García**, I. Urrutibeascoa, J.A. Gomez, M.A. Torres, P. Martínez-Filgueira, M.A. Madre, J.C. Díez. *Optimization of thermoelectric oxides processing for their integration in commercial modules for power generation*. 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM). Antalya, Turquía. Mayo 2018. (Ponencia invitada)

J.C. Díez, M.A. Madre, M.A. Torres, A. Sotelo, I. Urrutibeascoa, **G. García**. High density Sr-doped Ca₃Co₄O₉ thermoelectric samples: properties preservation at high temperatures (> 1000 K). XIV Reunión Nacional de Electrocerámica. Castellon, España. Junio 2019

A. Sotelo, **G. García**, I. Urrutibeascoa, P. Martínez-Filgueira, M. A. Torres, M. A. Madre, J. C. Díez. Very high thermoelectric performances in Sr-doped textured Ca₃Co₄O₉. Costs optimization of unileg thermoelectric generator fabrication. 4th edition of International Workshop of Materials Physics (IWMP). Bucarest, Romania. Mayo, 2019. (Ponencia invitada)

P. Martínez-Filgueira, **G. García**, J. Rodríguez Perez, U. Fernandez-Gamiz, J. Soriano. *Finite difference thermoelectric module modeling suitable for materials of uneven properties*. 7th Eur. Conf. Ren. Energy Sys (ECRES) Madrid, Spain. June 2019.

8.4.- Patentes europeas.

G. García, P. Martínez-Filgueira, J. Aranceta, M. Eskubi, *Thermoelectric module*. EP18382462EN. 10 July 2018.

La patente solicitada es una patente de la **Oficina Europea de Patentes (EPO)** y su número de aplicación es **EP18382462.2**.

Ha pasado la primera revisión por parte del examinador y, para asegura la calidad y novedad de la invención, concluye de su examen que se podrían conceder directamente dos patentes distintas. Sin embargo, se han modificado las reivindicaciones que el examinador ha puesto en duda con el objetivo aglutinar todo en una patente única de mucho más poder en lo que a propiedad intelectual se refiere.

CAPÍTULO 9 *REFERENCIAS*



- [1] Y. Saheb, K. Bódis, S. Szabó, H. Ossenbrink, y S. Panev, «Energy Renovation: The Trump Card for the New Start for Europe», p. 103, 2015.
- [2] Unión Europea, «Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios», p. 23, may 2010.
- [3] IDAE, «PROYECTO SECH-SPAHOUSEC Análisis del consumo energético del sector residencial en España INFORME FINAL», jul. 2011.
- [4] EVE, «Estrategia Energética de Euskadi 2020», 2011.
- [5] Gobierno Vasco, «PCTI. EUSKADI 2020. Una estrategia de especialización inteligente», p. 132, dic. 2014.
- [6] Panasonic Marketing Europe, «Infografía: Caldera Vs Bomba de Calor», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.aircon.panasonic.eu/ES_es/blog/infografia-caldera-vs-bomba-de-calor/. [Accedido: 06-may-2019].
- [7] J. P. Carmo, L. M. Goncalves, y J. H. Correia, «Thermoelectric Microconverter for Energy Harvesting Systems», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n.º 3, pp. 861-867, mar. 2010.
- [8] G. J. Snyder, «Thermoelectric Energy Harvesting», en *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya y D. J. Inman, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 325-336.
- [9] G. Nolas, J. Sharp, y H. J. Goldsmid, *Thermoelectrics-Basic Principles and New Materials Developments*. 2001.
- [10] H. J. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [11] D. M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. 2005.
- [12] Z. H. Dughaish, «Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation», *Phys. B Condens. Matter*, vol. 322, n.º 1-2, pp. 205-223, sep. 2002.
- [13] M. Abd El Qader *et al.*, «Structural, electrical, and thermoelectric properties of CrSi 2 thin films», *Thin Solid Films*, vol. 545, pp. 100-105, oct. 2013.
- [14] G. J. Snyder y E. S. Toberer, «Complex thermoelectric materials», en *Materials for Sustainable Energy*, Co-Published with Macmillan Publishers Ltd, UK, 2010, pp. 101-110.
- [15] A. M. López, «Caracterización de Skutterudites como material termoeléctrico desarrollado con nanotecnología.», Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [16] R. J. Buist y P. G. Lau, «Thermoelectric power generator design and selection from TE cooling module specifications», presentado en International Conference on Thermoelectrics, ICT, Proceedings, 1997, pp. 551-554.
- [17] M. von Lukowicz, E. Abbe, T. Schmiel, y M. Tajmar, «Thermoelectric Generators on Satellites—An Approach for Waste Heat Recovery in Space», *Energies*, vol. 9, p. 541, jul. 2016.
- [18] N.-H. Bae, S. Han, K. E. Lee, B. Kim, y S.-T. Kim, «Diffusion at interfaces of micro thermoelectric devices», *Curr. Appl. Phys.*, vol. 11, n.º 5, Supplement, pp. S40-S44, sep. 2011.
- [19] AIMME - Instituto Tecnológico Metalmecánico, «Aproximación a los materiales termoeléctricos», OTEA Observatorio Tecnológico del Metal, feb. 2012.
- [20] I. Serrano, «Estudio de nuevos materiales termoeléctricos basados en óxidos de hierro», Tesis de grado, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2010.
- [21] Laird Thermal Systems, «Welcome to Laird Thermal Systems», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.lairdthermal.com/>. [Accedido: 10-may-2019].
- [22] II-VI Marlow, «Thermoelectric Cooling Technologies», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.marlow.com. [Accedido: 10-may-2019].
- [23] BTS Europe Thermal Solutions, «ThermaTEC Series Specifications», 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.thermalsolutions.nl/htseries.html>. [Accedido: 10-may-2019].
- [24] Hebei I.T., «Peltier Modules China». [En línea]. Disponible en: <http://www.hebeiltd.com.cn/?p=peltier.module>. [Accedido: 10-may-2019].
- [25] Kryotherm, «Historical Background Thermoelectricity». [En línea]. Disponible en: <http://kryothermtec.com/historical-background.html>. [Accedido: 06-may-2019].



- [26] California Institute of Technology, «History of Thermoelectrics», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>. [Accedido: 06-may-2019].
- [27] Northwestern University, «Thermoelectrics. The Science of Thermoelectric Materials», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>. [Accedido: 06-may-2019].
- [28] Ministerio de Vivienda, «REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.», 2006.
- [29] E. Sarachu, «CALORYFRIO. La calefacción central se convertirá en individual a partir de 2017», ene-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/la-calefaccion-central-se-convertira-en-individual-a-partir-de-2017.html>. [Accedido: 10-may-2019].
- [30] Unión Europea, Directiva (UE) 2018 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. 2018, p. 17.
- [31] Unión Europea, Directiva (UE) 2018/2002 del parlamento Europeo y del consejo de 11 de diciembre de 2018 por la que se modifica la Directiva 2012/ 27/ UE relativa a la eficiencia energética. 2018, p. 21.
- [32] Tecteg, «CMO oxide & CMO cascade 800°C hot side thermoelectric power modules», *Tecteg Power Generator*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://tecteg.com/cmo-oxide-cmo-cascade-800c-hot-side-thermoelectric-power-modules/>. [Accedido: 14-may-2019].
- [33] A. Miner, «The Industrialization of Thermoelectric Power Generation Technology», presentado en DOE Thermoelectric Applications Workshop, Baltimore, Maryland, 2012.
- [34] S. LeBlanc, «Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications», *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 1-2, pp. 26-35, dic. 2014.
- [35] G. García, F. J. Aranceta, J. J. Borda, y A. J. Barbero, «Method for manufacturing a thermoelectric module, and thermoelectric module», EP2381498A1, 26-oct-2011.
- [36] S. Sano, H. Mizukami, y H. Kaibe, «Development of High-Efficiency Thermoelectric Power Generation System», *Komatsu Tech. Rep.*, vol. 49, p. 7, 2003.
- [37] S. Hébert y L. Crismat, «Oxides for thermoelectricity», presentado en UCSB – ICMR Summer School on Inorganic Materials for Energy Conversion and Storage, Laboratoire CRISMAT, CNRS, ENSICAEN, ago-2012.
- [38] J. Cresko, D. Shenoy, H. Liddell, y R. Sabouni, «Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing», en *Quadrennial technology review. An assesment of energy technologies and reseach opportunities*, 2015.
- [39] G. Bennett y E. A. Skrabek, «Power performance of US space radioisotope thermoelectric generators», presentado en Fifteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings ICT '96, Pasadena, CA, USA, 1996, pp. 357-372.
- [40] J. A. Santamaria, J. Alkorta, y J. Gil Sevillano, «Mechanical properties of bismuth telluride (Bi₂Te₃) processed by high pressure torsion (HPT)», *Boletín Soc. Espanola Ceram. Vidr.*, vol. 52, n.º 3, pp. 137-142, 2013.
- [41] H. Wang *et al.*, «High Thermoelectric Performance of a Heterogeneous PbTe Nanocomposite», *Chem. Mater.*, vol. 27, pp. 944-949, mar. 2015.
- [42] A. A. Yaroshevsky, «Abundances of chemical elements in the Earth's crust», *Geochem. Int.*, vol. 44, n.º 1, pp. 48-55, ene. 2006.
- [43] M. Elsheikh *et al.*, «A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 337–355, feb. 2014.
- [44] I. Terasaki, Y. Sasago, y K. Uchinokura, «Large Thermoelectric Power in NaCo₂O₄ Crystals», *Phys. Rev. B*, vol. 56, p. 75397, oct. 1997.
- [45] W. Shin y N. Murayama, «Thermoelectric properties of (Bi,Pb)–Sr–Co–O oxide», *J. Mater. Res.*, vol. 15, n.º 2, pp. 382-386, feb. 2000.

- [46] S. Li, R. Funahashi, I. Matsubara, K. Ueno, S. Sodeoka, y H. Yamada, «High Temperature Thermoelectric Properties of Oxide Ca₉Co₁₂O₂₈», presentado en J. Mater. Chem., Baltimore, MD, USA, 1999, vol. 9, pp. 581-583.
- [47] I. Terasaki, «Thermal Conductivity and Thermoelectric Power of Semiconductors», en *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016.
- [48] S. B. Inayat, K. R. Rader, y M. M. Hussain, «Nano-materials enabled thermoelectricity from window glasses», *Sci. Rep.*, vol. 2, p. 841, 2012.
- [49] Q. Zhang, Y. Sun, W. Xu, y D. Zhu, «Organic Thermoelectric Materials: Emerging Green Energy Materials Converting Heat to Electricity Directly and Efficiently», *Adv. Mater.*, vol. 26, n.º 40, pp. 6829-6851, 2014.
- [50] B. Russ, A. Glauddell, J. J. Urban, M. L. Chabiny, y R. A. Segalman, «Organic thermoelectric materials for energy harvesting and temperature control», *Nat. Rev. Mater.*, vol. 1, n.º 10, p. 16050, oct. 2016.
- [51] Kryotherm, «Thermoelectric coolers for industrial applications». [En línea]. Disponible en: <http://kryothermtec.com/thermoelectric-coolers-for-industrial-applications.html>. [Accedido: 15-may-2019].
- [52] T. J. Hendricks, S. Yee, y S. LeBlanc, «Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive», *J. Electron. Mater.*, vol. 45, nov. 2015.
- [53] D. Champier, «Thermoelectric generators: A review of applications», *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 167-181, may 2017.
- [54] Hui Mao, «Thermoelectric cooling module», 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.huimao.com/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [55] Hebei I.T., «Basic Pricelist of Peltier modules». [En línea]. Disponible en: <http://www.hebeiltd.com.cn/?p=z.peltier.pricelist>. [Accedido: 16-may-2019].
- [56] Amazon, «Triamisul 12 V 60 W TEC1-12706». [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/Triamisul-TEC1-12706-Temperatura-Termoel%C3%A9ctrico-refrigeraci%C3%B3n/dp/B07LBNBZLY/ref=sr_1_1?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&keywords=peltier&qid=1558016466&s=gateway&sr=8-1. [Accedido: 16-may-2019].
- [57] B. Alexander, A. Boscoe, M. Cabot, P. Dawsey, L. E. Barreau, y R. Griffith, «Alphabet Energy: Thermoelectrics and Market Entry», *Calif. Manage. Rev.*, vol. 55, n.º 1, pp. 149-160, oct. 2012.
- [58] steemit, «Power Generating Combustor - Transforms flaring & heat into a source of clean electricity», *Alphabet Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://steemit.com/steemhunt/@ideas-abstractas/power-generating-combustor-transforms-flaring-and-heat-into-a-source-of-clean-electricity>. [Accedido: 16-may-2019].
- [59] «PowerModule-γ™», *Alphabet Energy*. [En línea]. Disponible en: <https://www.alphabetenergy.com/product/powermodule/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [60] M. E. Filip, G. Csaba, y D. Lelea, «Comparative analysis of heat recovery methods from internal combustion engines», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 477, p. 012011, feb. 2019.
- [61] Thermagy, RGS Development, «Industrial waste heat recovery by Thermoelectric Generation modules». [En línea]. Disponible en: <http://www.rgsdevelopment.nl/solutions/thermagy>. [Accedido: 16-may-2019].
- [62] A. Schönecker *et al.*, «Cost Efficient Manufacturing of Silicide Thermoelectric Materials and Modules using RGS Technique», *Mater. Today Proc.*, vol. 2, n.º 2, pp. 538-547, ene. 2015.
- [63] Kryotherm, «Thermoelectric generators operating on gas fuel». [En línea]. Disponible en: <http://kryothermtec.com/thermoelectric-generators-operating-on-gas-fuel.html>. [Accedido: 16-may-2019].
- [64] Gentherm, «Thermal Systems & Climate Control», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.gentherm.com/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [65] D. Champier, «Thermoelectric Generators: A Review of Present and Future Applications», en *3rd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2015)*, 2017, pp. 203-212.



- [66] RIF Corporation, «Success promoting technologies». [En línea]. Disponible en: <http://eng.rifcorp.ru/about/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [67] RIF Corporation, «Products». [En línea]. Disponible en: <http://eng.rifcorp.ru/products/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [68] Telgen, «Thermoelectric generator, thermoelectric conditioner», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://telgen.ru/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [69] Telgen, «Thermoelectric Generator GTG», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://telgen.ru/products/termoelektricheskij-generator/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [70] Telgen, «Thermoelectric generators for home, power pot, thermoelectric oven», 2016. [En línea]. Disponible en: <http://telgen.ru/products/bytovye-primeneniya-termoelektricheskikh-generatorov/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [71] Thermonamic Electronics Corp., «Thermoelectric Generators». [En línea]. Disponible en: <http://www.thermonamic.com/products.asp?cid=363>. [Accedido: 16-may-2019].
- [72] CS Centro Stirling, «Centro de I+D+I de Mondragón Componentes». [En línea]. Disponible en: <http://www.centrostirling.com/>. [Accedido: 16-may-2019].
- [73] Laird Thermal Systems, «Liquid Series». [En línea]. Disponible en: <https://www.lairdthermal.com/products/product-series/liquid-series>. [Accedido: 16-may-2019].
- [74] I. Barreno, «Desarrollo de una metodología de cálculo para el diseño de una bomba de calor Stirling oscilante», Ph.D. Thesis, Mondragon Unibertsitatea, 2016.
- [75] C. Costa, «Numerical characterization study of pressure drop and heat transfer phenomena in woven wire matrix of a stirling engine regenerator», Ph.D. Thesis, Mondragon Unibertsitatea, 2014.
- [76] K. Khalili y R. J. Meijer, «Conceptual Design Of A Stirling Heat Pump/air Conditioning System», en *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1990, vol. 5, pp. 250-257.
- [77] J. Egas y D. Clucas, «Stirling Engine Configuration Selection», *Energies*, vol. 11, p. 584, mar. 2018.
- [78] C. Iniesta, J. L. Olazagoitia, J. Vinolas, y J. Aranceta, «Review of travelling-wave thermoacoustic electric-generator technology», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Power Energy*, vol. 232, n.º 7, pp. 940-957, nov. 2018.
- [79] L. B. Kong, T. Li, H. H. Hng, F. Boey, T. Zhang, y S. Li, *Waste Energy Harvesting: Mechanical and Thermal Energies*. Springer Science & Business Media, 2014.
- [80] G. Sebald, S. Pruvost, y D. Guyomar, «Energy harvesting based on Ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic», *Smart Mater. Struct. Print*, vol. 17, n.º 1, 2008.
- [81] B. F. Tchanche, M. Pétrissans, y G. Papadakis, «Heat resources and organic Rankine cycle machines», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1185-1199, nov. 2014.
- [82] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, y V. Lemort, «Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 168-186, jun. 2013.
- [83] S. Lecompte, H. Huisseune, M. van den Broek, B. Vanslambrouck, y M. De Paepe, «Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 448-461, jul. 2015.
- [84] S. LeBlanc, S. K. Yee, M. L. Scullin, C. Dames, y K. E. Goodson, «Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 313-327, abr. 2014.
- [85] Earth Save Products, «Thermovec Fan Coil Units», *ESP Thermovec*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.thermovec.co.uk/>. [Accedido: 17-may-2019].
- [86] Panasonic Marketing Europe, «Nuevo Aquarea Air, el fancoil-radiante», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.aircon.panasonic.eu/ES_es/happening/nuevo-aquarea-air-el-fancoil-radiante/. [Accedido: 10-abr-2019].
- [87] PHNIX, «Ultra-Thin Fan Coil». 16-may-2016.

- [88] HTP Comfort Solutions, «HTP Ultra-Thin Hydronic Fan Coil», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.htproducts.com/fan-coil.html>. [Accedido: 10-abr-2019].
- [89] 123 Zero Energy, «Ultra-Thin Fan Coil Unit. Sensible Water to Air Heating System», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.123zeroenergy.com/ductless-split-fan-coil.html>. [Accedido: 10-abr-2019].
- [90] HeatwaveUk, «Radfan», 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.radfan.com/>. [Accedido: 10-abr-2019].
- [91] «Eigg – A small Scottish isle that runs on 90-95% renewable energy», *Hacker News*, 30-mar-2017. .
- [92] University of Salford, «Salford Energy House. An overview». Communications Division, 2014.
- [93] C.E.L. Šumperk, «Do not throw the money through the chimney». [En línea]. Disponible en: <http://www.cel.cz/index.html>. [Accedido: 17-may-2019].
- [94] J. A. Myhren, «Potential of Ventilation Radiators: Performance evaluation by numerical, analytical and experimental means», Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Haninge-Stockholm, Sweden, 2011.
- [95] P. Kříž, «Using thermoelectric generator to increase the efficiency of the radiator», Tesis de master, BRNO University of Technology, Brno, Chequia, 2015.
- [96] Caframo Lifestyle Solutions, «Ecofan | Heat Powered Stove Fan». [En línea]. Disponible en: <https://www.caframolifestylesolutions.com/ecofan/>. [Accedido: 18-may-2019].
- [97] V. Philipp y L. Marti, «Ecofan Fuel Savings Report». 26-jul-2010.
- [98] X. F. Zheng y R. Boukhanouf, «Experimental study of a domestic thermoelectric cogeneration system», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 62, pp. 69-79, ene. 2014.
- [99] M. P. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, F. Gomez-Paz, y F. Passaretti, «Design and Development of a TEG Cogenerator Device Integrated into a Self-Standing Natural Combustion Gas Stove», *J. Electron. Mater.*, vol. 44, n.º 1, pp. 377-383, ene. 2015.
- [100] M. P. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, F. Gomez-Paz, y F. Passaretti, «Update on the Design and Development of a TEG Cogenerator Device Integrated into Self-Standing Gas Heaters», *J. Electron. Mater.*, vol. 42, n.º 7, pp. 2243-2248.
- [101] M. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, y F. Passaretti, «Design and Development of a Thermoelectric Cogeneration Device Integrated in Autonomous Gas Heaters», presentado en 9th European Conference on Thermoelectrics: ECT2011, Tesalónica, Grecia., 2012, vol. 1449, pp. 512-515.
- [102] B. Xhabija, «Convector device applicable to radiators for heating plants», WO2016030773A1, 03-mar-2016.
- [103] T. T. Frankie, «Hot-air distribution system», US4369626A, 25-ene-1983.
- [104] M. P. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, F. Gomez-Paz, y F. Passaretti, «Design and Development of a TEG Cogenerator Device Integrated into a Self-Standing Natural Combustion Gas Stove», *J. Electron. Mater.*, vol. 44, n.º 1, pp. 377-383, ene. 2015.
- [105] «RadiatorBooster», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://radiatorbooster.com/>. [Accedido: 10-abr-2019].
- [106] A. Montecucco, J. Siviter, y A. R. Knox, «Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators», *Appl. Energy*, vol. 185, pp. 1336-1342, ene. 2017.
- [107] A. Bitschi, «Modelling of thermoelectric devices for electric power generation», Doctoral Thesis, ETH Zurich, 2009.
- [108] C. Wu, «Analysis of waste-heat thermoelectric power generators», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, n.º 1, pp. 63-69, ene. 1996.
- [109] D. M. Rowe y G. Min, «Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation», *Sci. Meas. Technol. IEE Proc.*, vol. 143, pp. 351-356, dic. 1996.
- [110] J. Chen, B. Lin, H. Wang, y G. Lin, «Optimal design of a multi-couple thermoelectric generator», *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 15, p. 184, feb. 2000.
- [111] J. Stevens, «Optimal design of small ΔT thermoelectric generation systems», *Energy Convers. Manag.*, vol. 42, pp. 709-720, abr. 2001.



- [112] L. Chen, J. Gong, F. Sun, y C. Wu, «Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generators», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 41, n.º 1, pp. 95-99, ene. 2002.
- [113] J. Yu y H. Zhao, «A numerical model for thermoelectric generator with the parallel-plate heat exchanger», *J. Power Sources*, vol. 172, n.º 1, pp. 428-434, oct. 2007.
- [114] R. O. Suzuki y D. Tanaka, «Mathematical simulation of thermoelectric power generation with the multi-panels», *J. Power Sources*, vol. 122, n.º 2, pp. 201-209, jul. 2003.
- [115] D. T. Crane y G. Jackson, «Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery», *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, pp. 1565-1582, jun. 2004.
- [116] A. Cengel y J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5.ª ed. McGraw-Hill Education, 2014.
- [117] G. Fraisse, J. Ramousse, D. Sgorlon, y C. Goupil, «Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements», *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 351-356, ene. 2013.
- [118] E. Massaguer Colomer, A. Massaguer Colomer, L. Montoro, y J. R. Gonzalez, «Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of thermoelectric generators», *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 65-74, dic. 2014.
- [119] F. Cheng, «Calculation Methods for Thermoelectric Generator Performance», en *Thermoelectrics for Power Generation - A Look at Trends in the Technology*, InTech, 2016.
- [120] L. Zhan, X. Li, y S. Hu, «Experiment Research for the Interfacial Thermal Contact Resistance», Central South University, Changsha, China, sep. 2002.
- [121] C. Yuan, B. Duan, L. Li, y X. Luo, «Thermal conductivity and contact resistance measurements for thermal interface materials», *Huagong Xuebao CIESC J.*, vol. 66, pp. 349-353, jun. 2015.
- [122] D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, 1st Edition. CRC Press, 1995.
- [123] D. Astrain, J. G. Vián, A. Martínez, y A. Rodríguez, «Study of the influence of heat exchangers' thermal resistances on a thermoelectric generation system», *Energy*, vol. 35, n.º 2, pp. 602-610, feb. 2010.
- [124] H. Lee, Ed., «Thermal and Electrical Contact Resistances for Micro and Macro Devices», en *Thermoelectrics: Design and Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 89-98.
- [125] O. V. Merkulov, B. V. Politov, K. Yu. Chesnokov, A. A. Markov, I. A. Leonidov, y M. V. Patrakeev, «Fabrication and Testing of a Tubular Thermoelectric Module Based on Oxide Elements», *J. Electron. Mater.*, vol. 47, n.º 5, pp. 2808-2816, may 2018.
- [126] Hui Mao, «Center Hole & Round Thermoelectric Cooling Module», 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.huimao.com/product/showproduct.php?id=26&lang=en>. [Accedido: 23-may-2019].
- [127] I. R. Friedman, H. D. Foust, y A. G. Butt, «Heat exchanger having uniform surface temperature and improved structural strength», US4478277A, 23-oct-1984.
- [128] Y. Y. Hsiao, W. C. Chang, y S. L. Chen, «A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine», *Energy*, vol. 35, n.º 3, pp. 1447-1454, mar. 2010.
- [129] X. Gou, H. Xiao, y S. Yang, «Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system», *Appl. Energy*, vol. 87, n.º 10, pp. 3131-3136, oct. 2010.
- [130] A. Montecucco, J. Buckle, y A. Knox, «Solution to the 1-D unsteady heat conduction equation with internal Joule heat generation for thermoelectric devices», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 35, pp. 177-184, mar. 2012.
- [131] G. García, M. Cordon, P. Martínez-Filgueira, I. Garay, J. Aranceta, y K. Martin, «Development and Experimental Validation of a New Off-Grid Thermoelectric Fancoil for Domestic Heating», *J. Electron. Mater.*, vol. 48, n.º 4, pp. 1785-1794, abr. 2019.
- [132] M. Martin, «Comportamiento térmico de cerramientos soleados. Un modelo de simulacion por diferencias finitas», Ph.D. Thesis, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1996.

- [133] Time and Date AS, «Weather in enero 2017 in Bilbao, Basque Country, Spain», 2019-1995. [En línea]. Disponible en: <https://www.timeanddate.com/weather/spain/bilbao/historic?month=1&year=2017>. [Accedido: 20-sep-2019].
- [134] Comisión Europea, «Acción por el clima de la UE», *Acción por el Clima*, 23-nov-2016. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en. [Accedido: 07-oct-2019].
- [135] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Banco Central Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Hoja de Ruta de la Energía para 2050», 15-dic-2011. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52011DC0885&from=ES>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [136] Grupo Tecma Red, «La calefacción supone cerca del 65% del consumo de energía en los hogares europeos, según Eurostat», *Eseficiencia. Portal de Eficiencia y Servicios Energéticos*, 09-abr-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.eseficiencia.es/2018/04/09/calefaccion-supone-cerca-65-por-ciento-consumo-energia-hogares-europeos-eurostat>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [137] H. S. Knowles, «Realizing residential building greenhouse gas emissions reductions: The case for a Web-based geospatial building performance and social marketing tool». University of Florida, 2008.
- [138] V. Jourová, «European Commission - A New Deal for Energy Consumers – Making it a reality», presentado en 8th Citizen's Energy Forum, Londres, 23-feb-2016.
- [139] Comisión europea, «Review study of ecodesign and energy labelling for space heating boilers and combination heaters», 02-oct-2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecoboiler-review.eu/documents.htm>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [140] European Environment Agency, «Households energy consumption by end uses», *Energy efficiency and energy consumption in the household sector*, 22-jun-2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/energy-efficiency-and-energy-consumption-2/assessment-2>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [141] Eustat, «Los hogares vascos tienen un alto nivel de equipamientos y de conciencia medioambiental». [En línea]. Disponible en: http://www.eustat.eus/elementos/ele0005100/Los_hogares_vascos_tienen_un_alto_nivel_de_equipamientos_y_de_conciencia_medioambiental/not0005104_c.html. [Accedido: 07-oct-2019].
- [142] Eustat, «El parque de viviendas de la C.A. de Euskadi aumenta en 9.» [En línea]. Disponible en: http://www.eustat.eus/elementos/EI_parque_de_viviendas_de_la_CA_de_Euskadi_aumenta_en_9549_unidades_entre_2016_y_2018/not0016653_c.html. [Accedido: 07-oct-2019].
- [143] EVE, «Claves energéticas del sector doméstico en Euskadi». mazo de-2013.
- [144] EFEverde, «La calefacción se encendió una media de 4 horas diarias este invierno», *Consumo energético*, 30-mar-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.efeverde.com/noticias/consumo-energetico-invierno-momit/>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [145] Raquel, «El tamaño importa. Así son las superficies promedio de las casas en cada país», *Decoesfera*, 25-abr-2016. [En línea]. Disponible en: <https://decoracion.tendencias.com/casas/el-tamano-importa-asi-son-las-superficies-promedio-de-las-casas-en-cada-pais>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [146] M. A. Boggiano, «Argentina, ¿el gas más barato del mundo?», *Fortuna WEB*, 31-ago-2015. [En línea]. Disponible en: <https://fortuna.perfil.com/2015-08-31-166087-argentina-el-gas-mas-barato-del-mundo/>. [Accedido: 07-oct-2019].
- [147] Red Eléctrica de España, «Metodología para el Cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Red Eléctrica de España, SAU.» ene-2018.
- [148] MITECO, «Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono.» Oficina Española de Cambio Climático (OECC), abr-2019.



- [149] «Compensación de emisiones de CO₂ mediante la plantación de árboles y obtención del certificado correspondiente», *Ecoeficiencia Factor 4*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ecorresponsabilidad.es/fichas/compensacion.htm>. [Accedido: 12-oct-2019].
- [150] J. W. Fergus, «Oxide materials for high temperature thermoelectric energy conversion», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 32, n.º 3, pp. 525-540, mar. 2012.
- [151] K. Bae *et al.*, «Power-Generation Characteristics After Vibration and Thermal Stresses of Thermoelectric Unicouples with CoSb₃/Ti/Mo(Cu) Interfaces», *J. Electron. Mater.*, vol. 44, jun. 2015.
- [152] S. Lemonnier, C. Goupil, y J. Noudem, «Four-leg Ca_{0.95}Sm_{0.05}MnO₃ unileg thermoelectric device», *J. Appl. Phys.*, vol. 104, pp. 014505-014505, ago. 2008.
- [153] E. Reddy, J. Noudem, S. Hebert, y C. Goupil, «Fabrication and Properties of Four-Leg Oxide Thermoelectric Modules», *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 38, p. 3751, sep. 2005.
- [154] H. Suda y J. Sato, «Thermoelectric conversion module», US9537076B2, 03-ene-2017.
- [155] H. Suda, S. Ito, T. Nemoto, y J. Sato, «Thermoelectric conversion module», US10003003B2, 19-jun-2018.
- [156] W. Wijesekara, L. Rosendahl, D. R. Brown, y G. J. Snyder, «Unileg Thermoelectric Generator Design for Oxide Thermoelectrics and Generalization of the UnilegDesign Using an Idealized Metal», *J. Electron. Mater.*, vol. 44, n.º 6, pp. 1834-1845, jun. 2015.
- [157] M. A. Madre, I. Urrutibeascoa, G. García, M. A. Torres, A. Sotelo, y J. C. Diez, «High-Temperature Stability of Hot-Pressed Sr-Doped Ca₃Co₄O₉», *J. Electron. Mater.*, vol. 48, n.º 4, pp. 1965-1970, abr. 2019.
- [158] A. Gardea *et al.*, «Material compatibility and thermal aging of thermoelectric materials», Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, Technical Report 986608, sep. 2019.
- [159] W.-C. Lin, Y.-S. Li, y A. T. Wu, «Study of Diffusion Barrier for Solder/n-Type Bi₂Te₃ and Bonding Strength for p- and n-Type Thermoelectric Modules», *J. Electron. Mater.*, vol. 47, n.º 1, pp. 148-154, ene. 2018.
- [160] G. García *et al.*, «Π Unileg Thermoelectric Structure for Cycling Robustness at High Temperature and Low Manufacturing Cost», *J. Electron. Mater.*, ene. 2019.
- [161] M. A. Torres, G. Garcia, I. Urrutibeascoa, M. A. Madre, J. C. Diez, y A. Sotelo, «Fast preparation route to high-performances textured Sr-doped Ca₃Co₄O₉ thermoelectric materials through precursor powder modification», *Sci. China Mater.*, vol. 62, n.º 3, pp. 399-406, sep. 2018.
- [162] J. M. Gordon, «Generalized power versus efficiency characteristics of heat engines: The thermoelectric generator as an instructive illustration», *Am. J. Phys.*, vol. 59, n.º 6, pp. 551-555, jun. 1991.
- [163] W.-H. Chen, P.-H. Wu, X.-D. Wang, y Y.-L. Lin, «Power output and efficiency of a thermoelectric generator under temperature control», *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 404-415, nov. 2016.
- [164] F. J. Cheng, Z. Ma, Y. Wang, G. X. Zhang, y W. M. Long, «Microstructure and aging resistance of the joints between SAC305 solder and thermoelectric materials with different diffusion barriers», *Met. Mater.*, vol. 52, pp. 157-162, ene. 2014.
- [165] Ferrotec, «Reliability of Thermoelectric Cooling Modules», *Thermoelectric Technical Reference*, 1019-2001. [En línea]. Disponible en: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref10/>. [Accedido: 24-sep-2019].
- [166] A. Masset *et al.*, «Misfit-Layered Cobaltite With an Anisotropic Giant Magnetoresistance: Ca₃Co₄O₉», *Phys. Rev. B - PHYS REV B*, vol. 62, pp. 166-175, jul. 2000.
- [167] Y. Liu, Y. Lin, Z. Shi, C. W. Nan, y Z. Shen, «Preparation of Ca₃Co₄O₉ and Improvement of its Thermoelectric Properties by Spark Plasma Sintering», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 88, pp. 1337-1340, abr. 2005.

- [168] M. Madre *et al.*, «Preparation of high-performance Ca₃Co₄O₉ thermoelectric ceramics produced by a new two-step method», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 33, pp. 1747-1754, sep. 2013.
- [169] M. M. Seabaugh, I. H. Kerscht, y G. L. Messing, «Texture Development by Templated Grain Growth in Liquid-Phase-Sintered α -Alumina», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 80, n.º 5, pp. 1181-1188, 1997.
- [170] D. Kenfau, D. Chateigner, G. Moussa, y J. Noudem, «Anisotropy of the Mechanical and Thermoelectric Properties of Hot-Pressed Single-Layer and Multilayer Thick Ca₃Co₄O₉ Ceramics», *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 8, pp. 214-226, ene. 2011.
- [171] G. Constantinescu, Sh. Rasekh, M. A. Torres, J. C. Diez, M. A. Madre, y A. Sotelo, «Effect of Sr substitution for Ca on the Ca₃Co₄O₉ thermoelectric properties», *J. Alloys Compd.*, vol. 577, pp. 511-515, nov. 2013.
- [172] F. Kahraman *et al.*, «Enhancement of mechanical and thermoelectric properties of Ca₃Co₄O₉ by Ag addition», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 35, jul. 2015.
- [173] Tektronik, «Low Resistance Measurement with a SourceMeter: Do I use Current Reversal, Offset Compensation or Delta Mode measurement methods?», 14-ene-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.tek.com/blog/low-resistance-measurement-sourcemeeter-do-i-use-current-reversal-offset-compensation-or-delta-m>. [Accedido: 27-sep-2019].
- [174] Z. Chen, «Low input voltage high current boost converter with TPS61088». Texas Instruments Incorporated, 2015.
- [175] H. Ma, Q. Guo, X. Han, y L. Chen, «Energy recycling load system with a high gain DC-DC converter for ultra low voltage power supplies», en *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2013, pp. 1-6.
- [176] K. H. Edelmoser y H. Ertl, «DC-to-DC Converter for Low Voltage Solar Applications», en *Proceedings of the 11th WSEAS*, Agios Nikolaos, Creta, Grecia, 2007, vol. 11, pp. 104–108.
- [177] K. H. Edelmoser y F. A. Himmelstoss, «Ultra Low Voltage DC-to-DC Converter for Solar Applications», en PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2014, pp. 1-7.
- [178] V. Mehrotra, S. Jian, y S. Chandrasekaran, «Ultra compact DC-DC converters for the digital age», en *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, 2002, vol. 4, pp. 3232-3237 vol.4.
- [179] M. Torres Portero *et al.*, «Significant enhancement of the thermoelectric performance in Ca₃Co₄O₉ thermoelectric materials through combined strontium substitution and hot-pressing process», *J. Eur. Ceram. Soc.*, dic. 2018.
- [180] «Materials Database - Thermal Properties», *Thermtest Instruments*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://thermtest.com/materials-database>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [181] «Thermoelectric Generator Power Bulk Material BiTe, PbTe», *Tecteg Power Generator*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://tecteg.com/thermoelectric-generator-power-bulk-material-bite-pbte/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [182] «Fluent material database», *ANSYS Student Community*. [En línea]. Disponible en: <https://studentcommunity.ansys.com/thread/fluent-material-database/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [183] M. Chen, L. Rosendahl, y T. Condra, «A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, pp. 345-355, ene. 2011.



ANEXO A *TÉRMINOS Y DEFINICIONES* ***BÁSICAS***



En el Anexo A se recogen el conjunto de definiciones de interés relevantes para la comprensión de este documento. Las definiciones y términos que se exponen se muestran con sus definiciones, obtenidas tanto del Código Técnico de la Edificación con del Reglamento (UE) 2015/1188 del Consejo, de 24 de abril de 2015, del Reglamento (UE) 2016/2281 de la Comisión, de 30 de noviembre de 2016, así como de las normas EN 442-1:2014 y EN 16430-2:2014.

Entre ellas y por la relación preferencial con la temática de proyecto cabe señalar la definición concisa de ventilador recogida en el Código Técnico de la Edificación.

A.1. Términos y definiciones básicas CTE

Estas definiciones se referenciarán a lo largo del documento, siendo necesarias para la comprensión del este.

Bienestar térmico: Condiciones interiores de temperatura, humedad y velocidad del aire establecidas reglamentariamente que se considera producen una sensación de bienestar adecuada y suficiente a sus ocupantes.

Cerramiento: Elemento constructivo del edificio que lo separa del exterior, ya sea aire, terreno u otros edificios.

Demanda energética: Energía útil necesaria que tendrían que proporcionar los sistemas técnicos para mantener en el interior del edificio unas condiciones definidas reglamentariamente. Se puede dividir en demanda energética de calefacción, de refrigeración, de agua caliente sanitaria (ACS) y de iluminación, y se expresa en kWh/m²·año, considerada la superficie útil de los espacios habitables del edificio.

Energía final: Energía tal y como se utiliza en los puntos de consumo. Es la que compran los consumidores, en forma de electricidad, carburantes u otros combustibles usados de forma directa.

Energía primaria: Energía suministrada al edificio procedente de fuentes renovables y no renovables, que no ha sufrido ningún proceso previo de conversión o transformación. Es la energía contenida en los combustibles y otras fuentes de energía e incluye la energía necesaria para generar la energía final consumida, incluyendo las pérdidas por su transporte hasta el edificio, almacenamiento, etc.

Emisividad (ε): Capacidad relativa de una superficie para radiar calor. Los factores de emisividad van de 0,0 (0%) hasta 1,0 (100%).

Envolvente edificatoria: Se compone de todos los cerramientos del edificio.

Envolvente térmica: Se compone de los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior y las particiones interiores que separan los recintos habitables de los no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.

Recinto habitable: recinto interior destinado al uso de personas cuya densidad de ocupación y tiempo de estancia exigen unas condiciones acústicas, térmicas y de salubridad adecuadas.

Producto de calentamiento de aire: un dispositivo que:

- incorpora o proporciona calor a un sistema de calefacción a base de aire;
- está equipado con uno o varios generadores de calor, y
- puede incluir un sistema de calefacción a base de aire para suministrar aire calentado directamente al espacio calentado mediante un dispositivo de circulación de aire.



Se considerará que un generador de calor diseñado para ser incorporado a un producto de calentamiento de aire y una caja de un producto de calentamiento de aire diseñada para ser equipada con tal generador de calor constituyen, conjuntamente, un producto de calentamiento de aire;

Sistema de calefacción a base de aire: los componentes o equipos necesarios para el suministro de aire calentado, mediante un dispositivo de circulación de aire, bien por conductos o directamente al espacio calentado, cuya finalidad es alcanzar y mantener una temperatura interior agradable para el confort térmico del ser humano en un espacio cerrado, como un edificio o partes del mismo;

Generador de calor: la parte de un producto de calentamiento de aire que genera calor útil mediante uno o varios de los siguientes procesos:

- a) la combustión de combustibles líquidos o gaseosos;
- b) el efecto Joule en los elementos calefactores de un sistema de calefacción por resistencia eléctrica;
- c) la captura de calor del aire ambiente, de aire extraído de un sistema de ventilación, de agua o de la tierra, y la transferencia de ese calor al sistema de calefacción a base de aire utilizando un ciclo de compresión de vapor o un ciclo de sorción;

Ventiloconvector: un dispositivo que proporciona circulación forzada de aire interior con la finalidad de calentar, refrigerar, deshumidificar o filtrar el aire interior, a efectos del confort térmico del ser humano, pero que no incluye la fuente de calentamiento o refrigeración ni un intercambiador de calor de exterior. El dispositivo puede ir equipado de un conducto mínimo para guiar entrada y salida de aire, incluido aire acondicionado. Puede estar diseñado para ser empotrado o disponer de una carcasa que permita colocarlo en el espacio que deba acondicionarse. Puede incluir un generador de calor por efecto Joule diseñado para ser utilizado exclusivamente como calefactor de reserva;

Potencia nominal de calefacción: la potencia de calefacción de una bomba de calor, de un generador de aire caliente o de un ventiloconvector, expresada en kW, al proporcionar calor a un espacio en «condiciones estándar»;

Condiciones estándar: las condiciones de funcionamiento de las enfriadoras de confort, los acondicionadores de aire y las bombas de calor en las que estos se ensayan para la determinación de su potencia nominal de calefacción, su potencia nominal de refrigeración, su nivel de potencia acústica o las emisiones de óxidos de nitrógeno.

A.2. Términos y definiciones básicas Reglamento (UE) 2015/1188 DE LA COMISIÓN de 28 de abril de 2015

Aparato de calefacción local: un dispositivo de calefacción que emite calor por transferencia directa o en combinación con la transferencia de calor a un fluido a fin de alcanzar y mantener un nivel térmico adecuado para el ser humano en el espacio cerrado en el que el producto está situado, eventualmente combinado con la producción de calor para otros espacios, y equipado con uno o más generadores de calor que convierten directamente la electricidad o combustibles gaseosos o líquidos en calor por medio del uso del efecto de Joule o la combustión de combustibles, respectivamente;

Aparato de calefacción local para uso doméstico»: un aparato de calefacción local distinto a los destinados al uso comercial;

Aparato de calefacción local de combustible gaseoso»: un aparato de calefacción local abierto por su parte frontal o un aparato de calefacción local cerrado en su parte frontal que utilicen combustibles gaseosos;

Aparato de calefacción local de combustible líquido»: un aparato de calefacción local abierto por su parte frontal o un aparato de calefacción local cerrado en su parte frontal que utilicen combustibles líquidos;

Aparato de calefacción local eléctrico»: un aparato de calefacción local que utiliza el efecto eléctrico de Joule para generar calor;

Aparato de calefacción local para uso comercial»: un aparato de calefacción local de radiación luminosa o de tubo radiante;

Aparato de calefacción local con la parte frontal abierta»: un aparato de calefacción local que utiliza combustibles gaseosos o líquidos en el cual el lecho de combustión y los gases de combustión no están separados del espacio en el que está instalado el producto y que está conectado a un conducto de chimenea u hogar o que requiere un conducto para la evacuación de los productos de la combustión;

Aparato de calefacción local con la parte frontal cerrada»: un aparato de calefacción local que utiliza combustibles gaseosos o líquidos en el cual el lecho de combustión y los gases de combustión están separados del espacio en el que está instalado el producto y que está conectado a un conducto de chimenea u hogar o que requiere un conducto para la evacuación de los productos de la combustión;

Aparato de calefacción dependiente: un aparato de calefacción local eléctrico que no puede funcionar de forma autónoma, sino que necesita señales enviadas por un control maestro exterior que no forma parte del producto, pero está conectado con él por cable piloto, medios inalámbricos, comunicación mediante cable eléctrico u otras técnicas equivalentes, con el fin de regular la emisión de calor en el local en el que está instalado el producto;

Aparato de calefacción local de radiación luminosa»: un aparato de calefacción local que utiliza combustibles gaseosos o líquidos y está equipado con un quemador; se instala a un nivel más alto que el de la cabeza, dirigido hacia el lugar donde están los sujetos receptores, de modo que la emisión de calor del quemador, por ser predominante de rayos infrarrojos, calienta directamente a aquellos y emite los productos de la combustión en el espacio en que está situado;

Aparato de calefacción local de tubo radiante»: un aparato de calefacción local que utiliza combustibles gaseosos o líquidos y está equipado con un quemador; se instala a un nivel más alto que el de la cabeza a proximidad de los sujetos receptores, calienta el espacio principalmente mediante rayos infrarrojos procedentes del tubo o tubos que se calientan por el paso en su interior de productos de combustión y cuyos productos de la combustión deben evacuarse a través de un conducto de evacuación;

Producto para calentar el aire»: un producto que proporciona calor a un sistema de calefacción exclusivamente a base de aire que puede ser evacuado por un conducto; está diseñado para ser instalado o sujetado en un lugar específico o fijado en la pared y distribuye el aire mediante un dispositivo que lo remueve al objeto de alcanzar y mantener un nivel térmico adecuado para el ser humano en el espacio cerrado en el que el producto está situado;

Potencia calorífica directa»: la potencia calorífica del producto por radiación y convección del calor emitido al aire por el propio producto; no incluye la potencia calorífica que el producto transmite a un fluido transmisor térmico y está expresada en kW;



Potencia calorífica indirecta: la potencia calorífica del producto transmitida a un fluido transmisor térmico mediante el mismo proceso de generación de calor que produce la potencia calorífica directa del producto, y está expresada en kW;

Potencia calorífica nominal» (Pnom): la potencia calorífica de un aparato de calefacción local que incluye la potencia calorífica directa y la potencia calorífica indirecta (si procede) al funcionar a la potencia calorífica máxima que pueda mantenerse durante un período prolongado, indicada por el fabricante, expresada en kW;

Potencia calorífica mínima» (Pmin): la potencia calorífica de un aparato de calefacción local que incluye la potencia calorífica directa y la potencia calorífica indirecta (si procede) al funcionar a la potencia calorífica mínima, indicada por el fabricante, expresada en kW;

Potencia calorífica nominal máxima» (Pmax,c): la potencia calorífica declarada de un aparato de calefacción local eléctrico al funcionar a la máxima potencia calorífica que pueda mantenerse durante un período prolongado, indicada por el fabricante, expresada en kW;

Modelo equivalente: un modelo comercializado en el mercado con los mismos parámetros técnicos, recogidos en el cuadro 1, cuadro 2, cuadro 3 o en el punto 3 del anexo II, que otro modelo comercializado en el mercado por el mismo fabricante.

A.3. Términos y definiciones básicas EN 16430-2:2014

Aparato de calefacción: dispositivo que tiene por objeto la transferencia de calor con el fin de proporcionar condiciones de temperatura específicas en el interior de los edificios.

Aparato de calefacción independiente: aparato de calefacción autónomo que no necesita estar conectado a una fuente de energía remota (por ejemplo, una caldera), ya que contiene su propia fuente de energía (por ejemplo, aparatos que funcionan con gas, aparatos eléctricos, aparatos con bomba de calor aire-aire).

Radiadores: Aparato de calefacción, fabricado con diferentes materiales (por ejemplo, acero, aluminio, hierro fundido) y con diferentes diseños (por ejemplo, tipo de placa, tipo de columna, tipo de tubo, tipo de tubo con aletas), que emite calor por convección natural y radiación.

Aparatos de calefacción seccionales (principalmente aplicados a radiadores). Aparatos de calefacción fabricados en secciones de idéntico diseño y comercializados en esta forma, que pueden unirse en conjuntos modulares para obtener el rendimiento deseado.

Aparato de calefacción por convección natural: aparato de calefacción que no contiene un ventilador o dispositivo similar para activar el flujo de aire sobre el emisor de calor.

Convector: Aparato de calefacción por convección que emite calor casi totalmente por convección natural.

Tipo de radiadores/convectores. Grupo de aparatos de calefacción de diseño similar cuya sección transversal permanece inalterada mientras varía la altura o la longitud o que presentan una variación sistemática de una sola dimensión.

Modelo: aparato de calefacción de altura, longitud y profundidad definidas dentro de una gama de alturas de un tipo

Rango de alturas: diferencia entre la altura máxima y mínima de los modelos de un tipo

Módulo de aparatos de calefacción: longitud de referencia de la parte útil de un aparato de calefacción Nota 1 a la entrada: El módulo coincide con:

- la sección, en el caso de los aparatos de calefacción por secciones
- una longitud de 1 m, en el caso de los aparatos de calefacción no seccionales;

Muestra. Aparato de calefacción representativo utilizado para la determinación de una o más de las características de funcionamiento.

Temperatura del agua de entrada. Temperatura del agua que entra en el aparato de calefacción

Temperatura del agua de salida. Temperatura del agua que sale del aparato de calefacción

Caída de temperatura: Diferencia entre la temperatura del agua de entrada y la de salida

Temperatura media del agua. Media aritmética de la temperatura del agua de entrada y de salida

Temperatura del aire de referencia. Temperatura del aire medida en la línea vertical situada en el centro de la cabina de ensayo, a 0,75 m por encima del nivel del suelo.

Exceso de temperatura. Diferencia entre la temperatura media del agua y la temperatura del aire de referencia.

Sobretemperatura estándar. Sobretemperatura de 50 °C tal como se determina en las condiciones estándar (Temperatura del agua de entrada de 75 °C, temperatura del agua de salida de 65 °C y temperatura del aire de referencia de 20 °C.)

Sobretemperatura baja estándar. Temperatura de exceso de 30 K al caudal estándar.

Caudal de agua. cantidad de agua que fluye a través del aparato de calefacción por unidad de tiempo

Caudal de agua normal. caudal de agua relativo a las condiciones normales de ensayo

Potencia térmica nominal estándar. Potencia térmica de un aparato de calefacción definida a 50 °C de sobretemperatura

Salida térmica estándar de baja temperatura. Salida térmica de un aparato de calefacción definido a 30 °C de sobretemperatura

Ecuación característica. Función de potencia con un exponente característico específico que da la potencia térmica en función de la sobretemperatura a caudal de agua constante.

Ecuación característica estándar. Ecuación característica válida para el caudal de agua estándar y a partir de la cual puede obtenerse la potencia térmica estándar para la sobretemperatura estándar de 50 °C

Potencia térmica estándar del módulo. Potencia térmica estándar de un modelo dividido por el número de secciones o por la longitud en metros.

Presión de ensayo. presión relativa a la que se somete el aparato de calefacción durante el proceso de fabricación (es decir, presión de ensayo en fábrica)

Presión máxima de operación. MOP presión relativa máxima del sistema al que puede someterse el aparato de calefacción, a elección del fabricante.

Temperatura máxima de funcionamiento. Temperatura máxima del agua de entrada permitida por el fabricante

Instalación de prueba. combinación de cabina de pruebas y otras partes relacionadas, e instrumentos de medida y equipo relacionado

Sistema de ensayo. combinación de instalación de prueba, y radiadores maestros

Pérdida de carga. Diferencia de presión entre la entrada y la salida de agua del aparato de calefacción

Pérdida de carga estándar. Pérdida de carga entre la entrada y la salida del emisor de calor del aparato en el lado del fluido primario, cuando el aparato se alimenta con el caudal de agua estándar.



Emisividad. Relación entre la energía irradiada por un material determinado y la energía irradiada por un cuerpo negro a la misma temperatura

Convectores empotrados. convectores instalados en el suelo, principalmente delante de las fachadas de vidrio.

Radiadores y convectores asistidos por ventilador. radiadores y convectores equipados con ventiladores para aumentar la potencia térmica de convección/capacidad de refrigeración del radiador, convector o empotrado.

Radiadores y convectores de ventilación. radiadores o convectores que, además de calentar normalmente los locales, calientan también el aire entrante (aire exterior)

Unidad de aire primario. unidad conectada al radiador, convector o convector empotrado que suministra aire primario a la sala, precalentado o preenfriado por el radiador, convector o convector empotrado.

Unidades básicas. secciones repetidas regularmente del radiador/convector equipado con ventiladores.

Unidades de extensión. partes del radiador/convector asistido por ventilador además de las unidades básicas que no están equipadas con un ventilador

ANEXO B *GUI INTERACTIVA CON APP DESIGNER EN MATLAB*



Se aprovecha el potencial de Matlab, además de para el desarrollo del modelo, para generar un entorno amigable de interacción con el mismo mediante una interfaz gráfica de usuario, el cual, por carecer de aportación científica se muestra únicamente en este anexo por complementar el alcance del desarrollo realizado. Esta interfaz gráfica desarrollada por medio de App Designer en MATLAB permite crear, gestionar y analizar módulos TEG de modo que sirva de ayuda a la hora de realizar proyectos que integren tecnología termoelectrica.

De esta manera se logra dotar a Centro Stirling de una herramienta polivalente que permita integrarse en el proceso de diseño de aplicaciones en las cuales se emplee la termoelectricidad. Como se ha podido apreciar anteriormente en el modelo desarrollado, los resultados obtenidos son bastante precisos. Sin embargo, la complejidad del método y sus más de 600 líneas código hacen que sea complicado interactuar con él. Por lo que el objetivo de esta GUI es que la interacción resulte amigable con el modelo realizado, de forma que cualquier usuario pueda hacer uso de ella sin dificultad.

Además, se precisa de una base de datos inicial en la que poder almacenar, editar y consultar todos los datos necesarios para realizar un diseño preliminar teórico del módulo TEG. Por lo tanto, la mejor opción ha sido crear una GUI que integre el modelo numérico capaz de simular el comportamiento de un TEG. Desde la GUI se puede acceder a los materiales, módulos u otros elementos de interés para el desarrollo del módulo TEG.

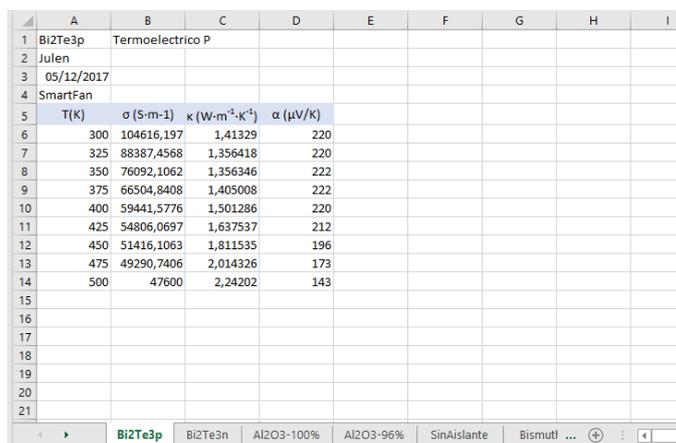
B.1. Base de datos

Existen diversos gestores bases de datos para almacenar información como el uso de Microsoft Access, MySQL, Excel, archivo.csv, etc... Pero se debe tener en cuenta que uno de los principales problemas a la hora de diseñar una BDs es la cantidad de información que ésta va a procesar.

En este caso se ha decidido utilizar Excel porque la cantidad de información a almacenar no es grande. Con Excel se puede almacenar la información de cada elemento por hojas, y además es compatible con App Designer de MATLAB, lo que permite leer, escribir, borrar y añadir información en la hoja de cálculo deseada muy fácilmente.

La información requerida para definir un generador termoelectrico se ha dividido en dos documentos Excel diferentes. Una primera que almacena las propiedades del material y otra que almacena las características del generador termoelectrico creado.

Para el caso de los materiales se guardan las propiedades térmicas, eléctricas y termoelectricas dependientes de la temperatura que puede llegar a tener dicho material.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Bi2Te3p	Termoelectrico P							
2	Julen								
3	05/12/2017								
4	SmartFan								
5	T(K)	σ (S-m-1)	κ (W-m ⁻¹ -K ⁻¹)	α (μ V/K)					
6	300	104616,197	1,41329	220					
7	325	88387,4568	1,356418	220					
8	350	76092,1062	1,356346	222					
9	375	66504,8408	1,405008	222					
10	400	59441,5776	1,501286	220					
11	425	54806,0697	1,637537	212					
12	450	51416,1063	1,811535	196					
13	475	49290,7406	2,014326	173					
14	500	47600	2,24202	143					
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									

Fig. 358. Base de datos para materiales

En cambio, para el generador se almacenan los nombres de los distintos materiales que lo componen, así como sus dimensiones (alto, largo, ancho), el número de pares termoeléctricos, ...

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Modulo-TEG(90)%	Convencional						
2	Julen							
3	08/02/2018							
4	SmartFan							
5	Dado	Ceramica A	Ceramica B	Conductores	Soldaduras	Aislante		
6	Bi2Te3n	BeO	Al2O3-96%	Cobre	Sn95%-Sb5%	SinAislante		
7	BismuthTellurideP		1	1	0,1			
8		3	1	1	0,1			
9		3,2	1	1	0,1			
10		0,4						
11		0						
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								

Fig. 359. Base de datos para módulos

Como se puede observar en ambas imágenes, además de las características técnicas, se almacena información adicional, como el nombre de Material/Generador, el nombre de la persona que lo introdujo, la fecha de creación, el tipo de material/módulo y el proyecto para el cual fue creado.

B.2. Componentes

B.2.1 Administrador de componentes



Administrador de Componentes
centro stirling

Elemento:
 Material:

Nuevo Material Editar

Eliminar Confirmar Eliminar

Tipo de Grafico:

Ver Gráficas

Informacion Basica :
 Tipo de Material: Termoeléctrico P
 Valores Promedios
 σ (S·m-1) = 66461.6772
 κ (W·m-1·K-1) = 1.63752956
 S (μ V/K) = 203.111111

Detalles :
 Autor: Julen
 Fecha: 05/12/2017
 Proyecto: SmartFan

Fig. 360. Administrador de componentes

El administrador de componentes es la herramienta encargada de mostrar la información correspondiente del “Elemento” seleccionado. Los “Elementos” se dividen en: Materiales y Módulos. El administrador lleva integrado el modelo de cálculo diseñado, de modo que se pueda aplicar para cualquier modelo de la base de datos.

B.2.2 Materiales

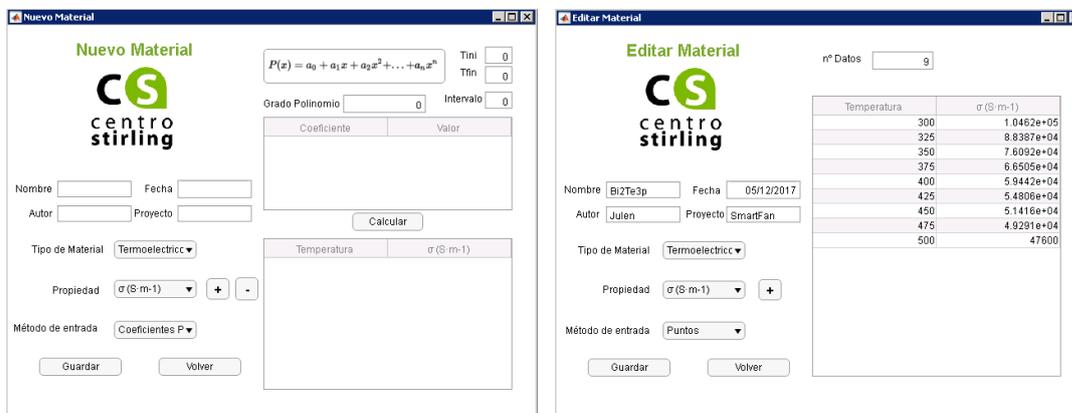


Fig. 361. Ventanas de Nuevo Material y Editar Material

En las ventanas de nuevo material/ editar material, el usuario es capaz de consultar especificaciones técnicas de los materiales almacenados en la base de datos y puede crear o modificar un material. Toda la información correspondiente a una propiedad de dicho material puede ser consultada, graficada, modificada y guardada.

B.2.3 Módulos

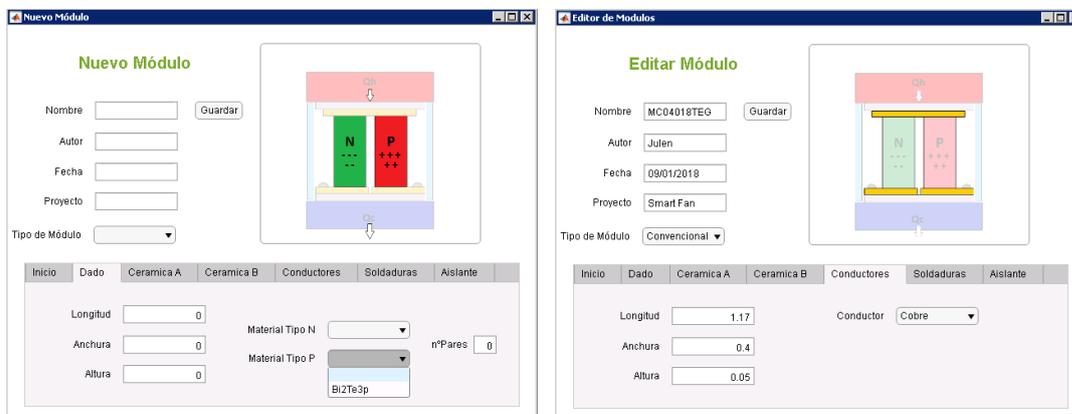


Fig. 362. Ventanas Nuevo Módulo y Editar Módulo

El apartado de módulos muestra las especificaciones técnicas y geométricas de los elementos que componen el prototipo TEG. La GUI realiza un pequeño ensamblaje de un prototipo a estudiar. Para ello el usuario debe seleccionar todos los componentes y sus dimensiones a utilizar en la creación del módulo. Para facilitar el proceso, la imagen superior derecha especifica el componente que se está diseñando.

B.3. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario

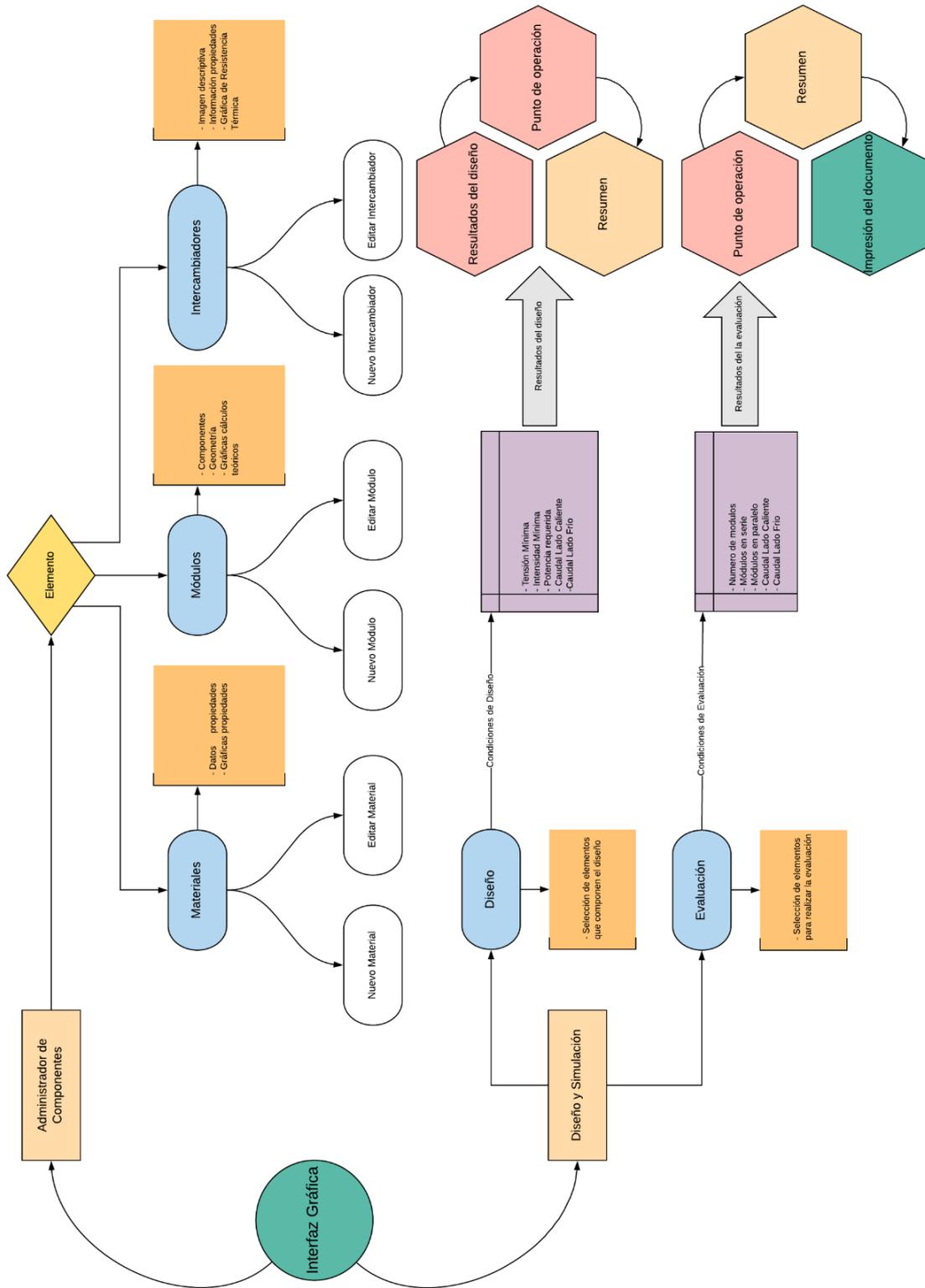


Fig. 363. Diagrama de flujo de la Interfaz Gráfica de Usuario

ANEXO C *SIMULACIÓN DE LA NUEVA ESTRUCTURA EN □ EN ANSYS CON UDF.*



C.1. Cálculos y dimensionado del sistema termoeléctrico

El objetivo de esta tarea ha sido conocer cómo afectan los factores asociados al nuevo diseño, geometría, materiales empleados y condiciones de aplicación de calor, al desempeño del mismo. Para poder establecer una comparación entre la configuración empleada habitualmente y la del nuevo diseño, se ha optado por reducir el problema a la unidad básica de referencia; el par termoelectrico. Al tratarse de un módulo Unileg por disponer solo de un tipo de material semiconductor, este termopar no será par como tal, sino que estará compuesto por un solo dado de material Bi_2Te_3 que será de tipo P.

Este análisis comparará un módulo termoeléctrico unitario, es decir, de un solo dado, convencional con uno que tiene unas dimensiones similares pero la topología del diseño en \square , con un corte y una cara metalizada.

Las simulaciones que se han llevado a cabo para entender el comportamiento de estos módulos se han realizado con el software ANSYS Fluent y una función definida por usuario (UDF) mediante la cual se añaden a las capacidades de Fluent de simulación térmica, la generación eléctrica por el efecto Seebeck. El funcionamiento de esta UDF, escrita en lenguaje C.

C.1.1 Geometrías consideradas

Con el fin de poder comparar el comportamiento de un módulo Unileg convencional y un módulo Unileg de nueva concepción, se han diseñado unas geometrías que permitan ensayar ambos módulos en unas condiciones similares dentro de las diferencias inherentes al diseño.

A Geometría convencional

La denominada geometría convencional es la topología empleada habitualmente a la hora de diseñar y construir módulos termoeléctricos Unileg. Esta se compone de tres elementos básicos. En primer lugar, se encuentra un dado termoeléctrico. El dado empleado es uno de telururo de bismuto Bi_2Te_3 proporcionado por la compañía Crystal Ltd. el cual se encuentra disponible en Centro Stirling



Fig. 364. Datos de material termoeléctrico tomados como referencia y ficha de los mismos.

En la base de estos dados de telururo de bismuto de tipo P se colocará el segundo de los elementos, una pletina de cobre de 3,5 mm de longitud, una anchura de 1,4 mm y 0,5 mm de espesor. Esta pletina será el polo positivo en el análisis por elementos finitos.

En la parte superior del dado se coloca otra pletina, en este caso doblada y de la misma anchura que la anterior, la cual servirá de polo negativo del análisis por elementos finitos. Estas pletinas son similares a las mostradas en la Fig. 365.



Fig. 365. Pletinas de cobre empleadas en la fabricación de los terminales del módulo.

No será necesario emplear componentes cerámicos de soporte para el análisis computacional. Empleando las piezas antes descritas, se conforma un módulo como el representado en la Fig. 366.

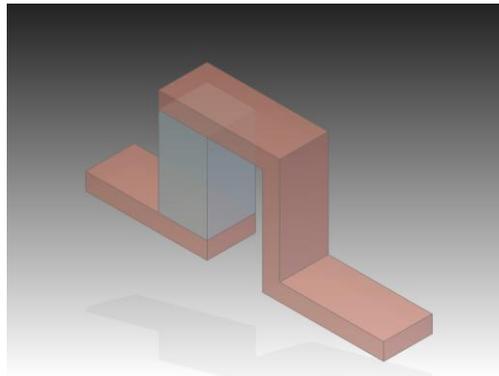


Fig. 366. Geometría CAD empleada en el análisis. Se aprecian los terminales de cobre positivo y negativo (corto y largo) y entre ambos el dado de material termoeléctrico.

B Geometría con corte

La geometría novedosa de este estudio tiene un objetivo principal, eliminar la compleja pletina de cobre que actúa como terminal negativo y reemplazarla por una pletina igual a la empleada en el terminal positivo. El motivo es que esa pletina es costosa en su fabricación (en comparación con la otra) y entraña dificultades en el montaje.

Para lograr este objetivo se siguen dos operaciones, que deberán realizarse en el bloque de material termoeléctrico. Por un lado, se practica un corte en la misma dirección que el flujo térmico. De este modo quedarían dos dados de tipo N unidos por su extremo superior. Así colocados, la corriente no circularía, ya que el efecto de uno contrarrestaría al del otro. Es aquí donde se hace necesaria aplicar la segunda operación. Esta consiste en la metalización de una cara de uno de los dados, de tal modo que este queda cortocircuitado y se espera que su efecto no impida la circulación de corriente.

Aunque en un primer momento pueda parecer que supone una gran pérdida de material operando en las condiciones termoeléctricas óptimas, el bajo coste del material termoeléctrico de alta temperatura que se empleará en este proyecto, así como el futuro estudio de optimización que se realice para determinar el tamaño y ubicación precisa del corte para un rendimiento máximo, hará que las desventajas se vean claramente superadas por los puntos a favor.

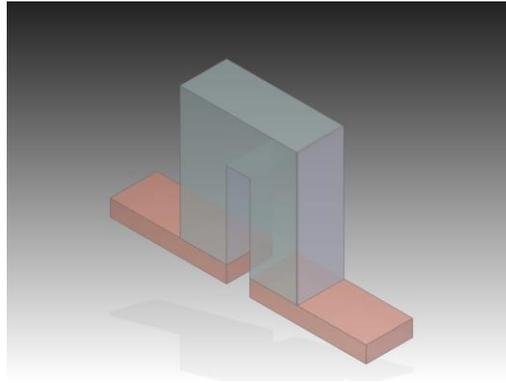


Fig. 367. Geometría del dado con corte empleada en el análisis. Se aprecia una capa de metalización en uno de los laterales, que cortocircuita el dado vertical de la derecha de la imagen.

C.1.2 Propiedades de los materiales empleados

El análisis de un módulo termoeléctrico conlleva tener en cuenta una serie de propiedades de los materiales, como parece lógico, térmicas y eléctricas. Para tener un mayor detalle en el análisis se han empleado, para los materiales de los que ha sido posible conseguirlos o se ha considerado conveniente, propiedades en función de la temperatura.

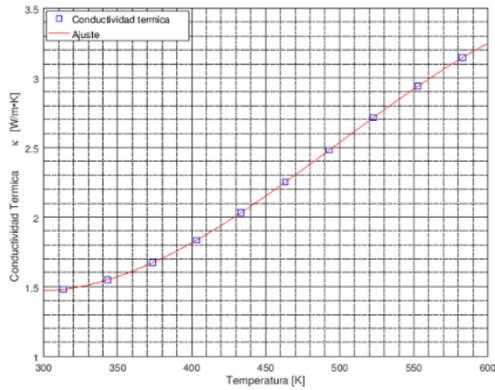
En la siguiente tabla se muestran las propiedades térmicas y eléctricas de los materiales empleados:

Tabla 59. Propiedades térmicas y eléctricas de los materiales empleados.

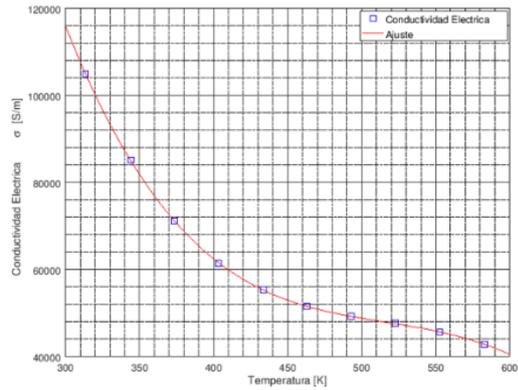
	Cobre	Plata	Bi ₂ Te ₃
Densidad [kg·m ⁻³]	8978	10485	7700 [180]
Conductividad térmica κ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	387.6	418.5	Polinómica [181]
Calor específico C_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	381	235	154 [180]
Conductividad eléctrica σ [S·m ⁻¹]	6·10 ⁷	6·10 ⁷	Polinómica [181]
Coefficiente de Seebeck S [V·K ⁻¹]	N/A	N/A	Polinómica [181]

(*) Los datos sin referencia provienen de [182]

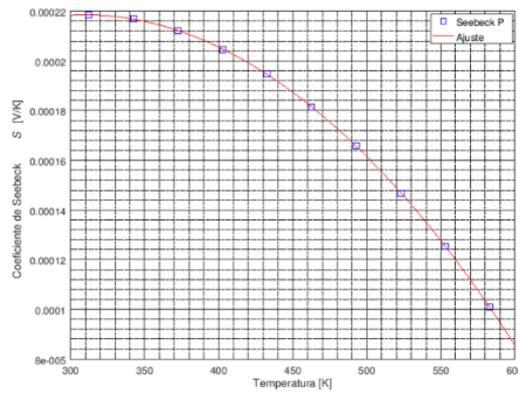
En la Tabla 59 se ve cómo alguna de las propiedades ha sido definida como polinómica. Esto es que, la propiedad en cuestión variará su valor en función de la temperatura conforme a una expresión polinómica. Estas expresiones han sido obtenidas mediante MATLAB, importando los datos de las gráficas y ajustándolos. En la Fig. 368 se pueden ver estas tres familias de datos y sus correspondientes ajustes.



a)



b)



c)

Fig. 368. Puntos obtenidos de las curvas experimentales del material termoeléctrico en [181], con los ajustes para la obtención de los coeficientes polinómicos. a) Conductividad térmica, b) conductividad eléctrica, c) Seebeck.

C.2. Modelo desarrollado

En esta sección se definirá el procedimiento de cálculo que se ha seguido para poder comparar la generación eléctrica de un módulo Unileg y uno convencional.

C.2.1 Descripción del procedimiento de cálculo

El análisis de este estudio consta de dos partes diferenciadas pero que se resuelven al mismo tiempo. Este modelo desarrollado no tiene en cuenta ningún fluido calor-transportador, por lo que no será necesario la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Por un lado está el análisis de la energía, que servirá para determinar la distribución térmica del dado termoeléctrico. Las condiciones de contorno empleadas para ambos análisis son las siguientes:

- Lado caliente: Temperatura fija de 301 K.
- Lado frío: Temperatura fija de 300 K.
- El resto de superficies del análisis se consideran adiabáticas.

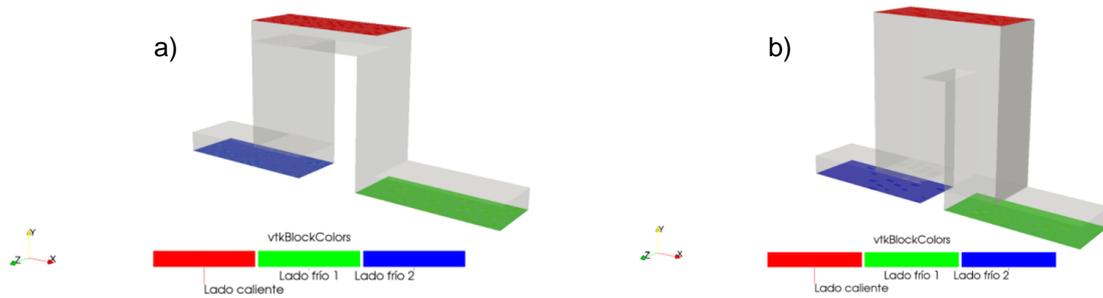


Fig. 369. Visualización de las condiciones de contorno térmicas de la simulación del a) Unileg convencional y del b) Unileg innovador

En la Fig. 369 se muestra la ubicación de estas condiciones de contorno.

Por otro lado está el análisis eléctrico y de generación de energía, que irá acoplado al análisis térmico. Este análisis está tomado según Chen *et al.*[183] de un típico sistema termoeléctrico fluido de potencia, como el mostrado en la Fig. 370, hay una serie de patas semiconductoras de tipo n y p que componen el generador, conectadas en paralelo entre los focos fríos y calientes y eléctricamente en serie junto con la carga. El algoritmo que se ha adaptado a este caso pretende hacer un análisis de multifásicas de un proceso físico caracterizado por su no linealidad.

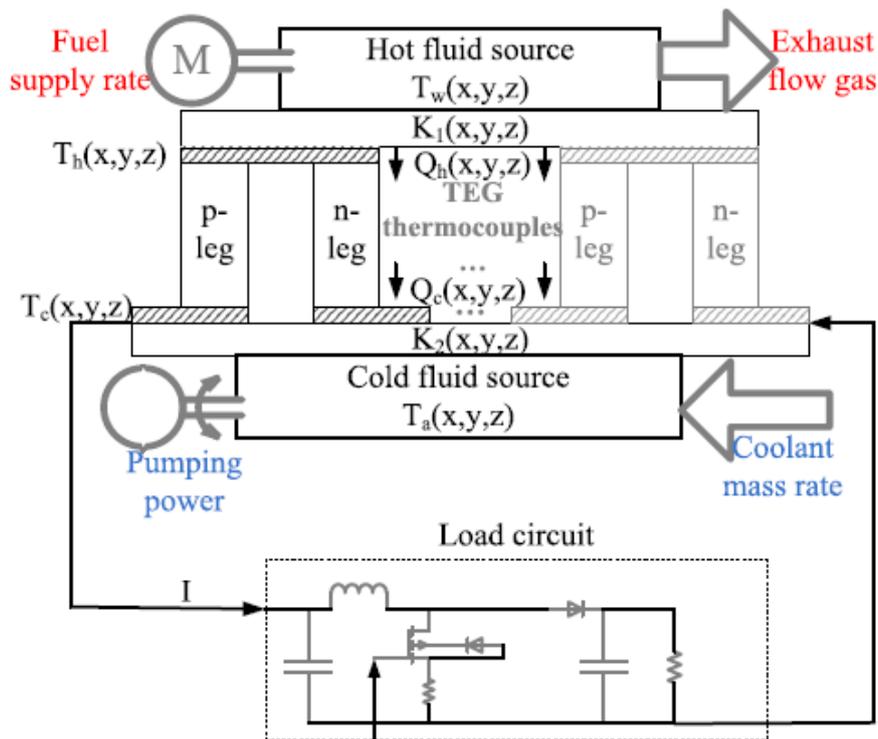


Fig. 370. Representación esquemática del sistema termo-eléctrico-fluido de generación de potencia

Estas ecuaciones serán plasmadas en el software ANSYS Fluent. Para ello se ha hecho uso de las funciones definidas por el usuario (UDF, User Defined Functions). Estas funciones son código escrito en lenguaje de programación C mediante las cuales se manipulan una serie de escalares que se declaran y resuelven en el software de cálculo. Teniendo en cuenta los cálculos de Seebeck y térmicos, el programa asignará un valor de entrada de corriente a una de las patas del generador termoeléctrico, Fig. 371, y un valor de tensión fijo en la otra, en este caso 0 V, usado como referencia.

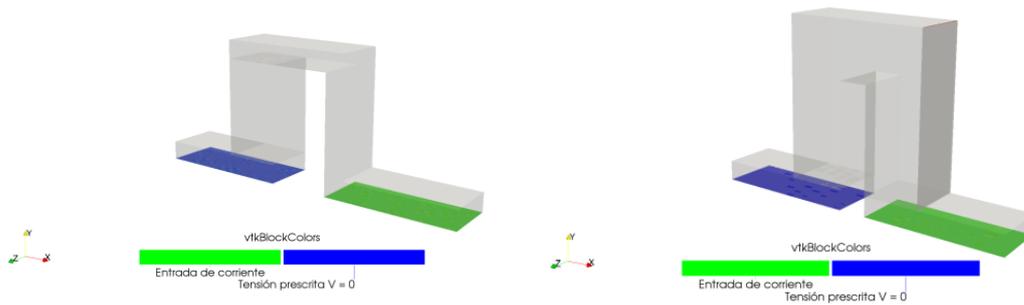


Fig. 371. Asignación de condiciones de contorno eléctricas para el caso clásico (izq) e innovador (der)

En el presente análisis se han realizado unas simulaciones de caracterización básicas para poder comparar ambos diseños. El parámetro que ha sido variado entre las simulaciones de un mismo diseño es la resistencia de la carga, para poder estimar las curvas de tensión y potencia frente a la intensidad. El rango de resistencias de carga se ha determinado mediante unas simulaciones preliminares donde se ha hallado la resistencia interna del conjunto con la distribución de temperaturas existente. Esta resistencia sería la resistencia de una carga adaptada, con la cual la eficiencia del módulo termoelectrico sería la mayor posible.

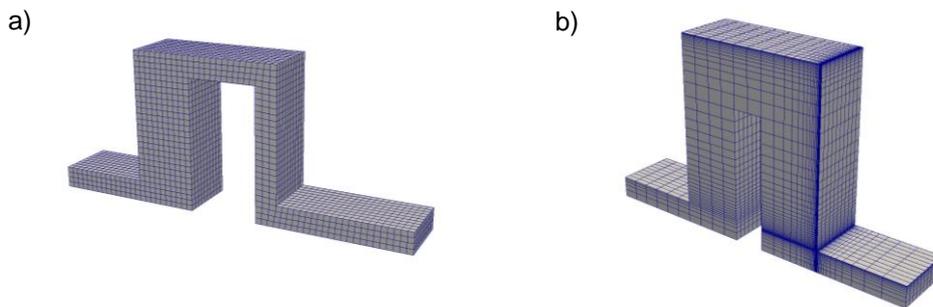


Fig. 372. Mallas generadas para los casos a) convencional y b) con corte

C.2.2 Resultados

Para comenzar con el análisis de resultados de este estudio, se observará la gráfica de resultados de tensión y potencia para las distintas resistencias del circuito ensayadas.

En la Fig. 373 se puede apreciar una diferencia notable en las tres variables analizadas en los módulos termoelectricos. Los sufijos ND y OD indican New Design, nuevo diseño y Old Design, diseño antiguo respectivamente. Por un lado, se aprecia como la tensión generada es mucho menor en el nuevo diseño, del orden de 3 veces en cuanto a la tensión de circuito abierto, que respectivamente es de 0,1041 mV para el caso convencional y 0,03483 mV para el caso con el corte. En cuanto a la potencia generada, se ve también un gran descenso del módulo nuevo respecto al convencional, de unas 18 veces. Esto es una consecuencia de la baja intensidad circulante por el módulo con el corte, que a su vez es consecuencia de la alta resistencia eléctrica que este ofrece.

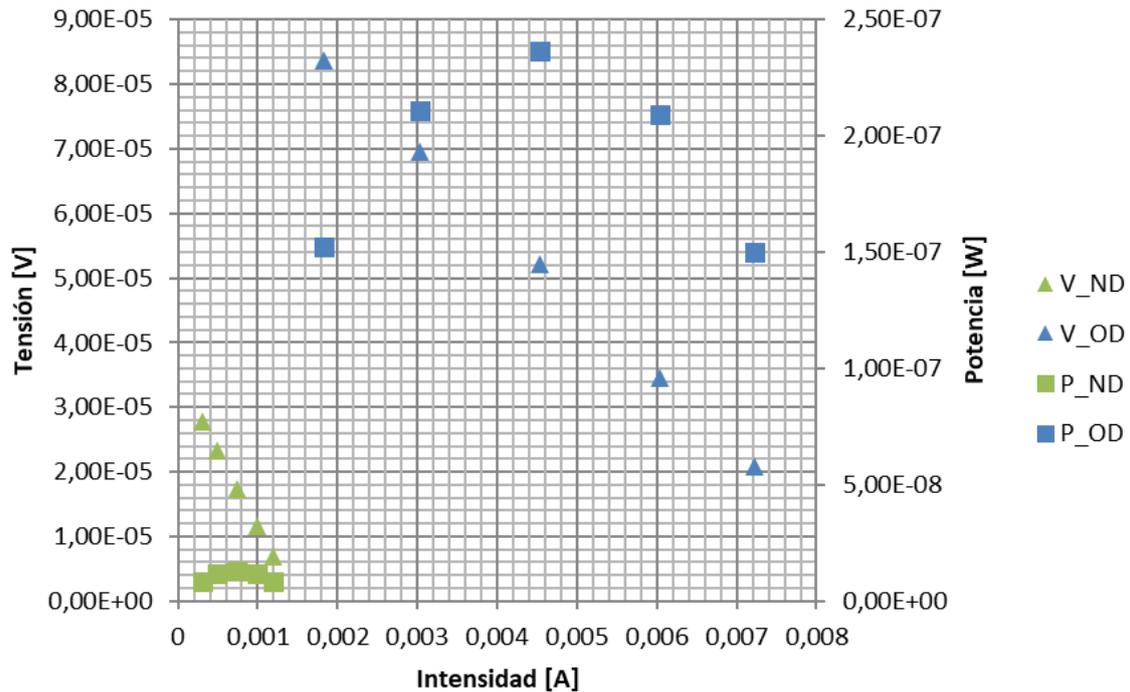


Fig. 373. Potencia, tensión e intensidad para los distintos valores de resistencia empleados

A continuación se pasará a analizar la distribución térmica de ambos diseños visualmente. En la Fig. 374 se compara la temperatura en el caso convencional en el caso con cortes.

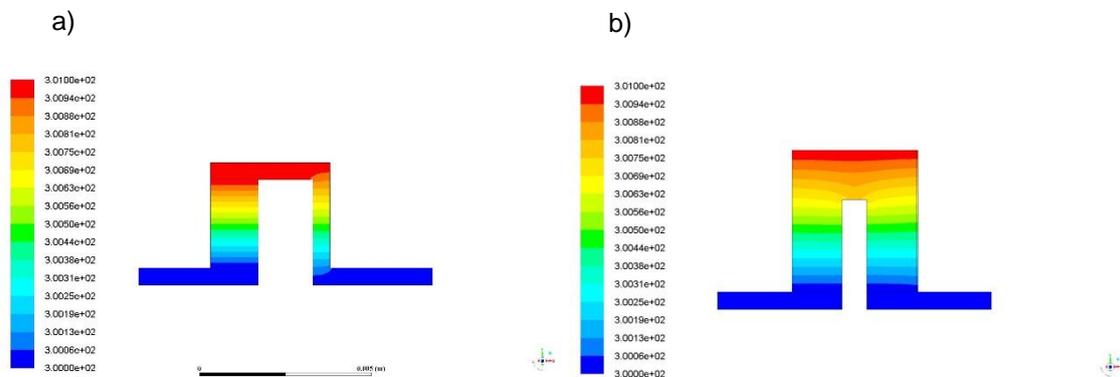


Fig. 374. Distribución térmica de a) módulo convencional y b) módulo con corte

A primera vista se aprecia cómo, en el caso del módulo convencional, la diferencia de temperaturas entre los extremos del dado termoeléctrico es prácticamente la misma que la prescrita en las condiciones de contorno, de 1 K. Sin embargo, en el módulo con corte, la temperatura entre la altura del corte y la base del dado es de en torno a 0.8 K. Esto afecta negativamente a la tensión generada por efecto Seebeck, ya que es directamente proporcional al gradiente de temperatura existente.

El origen de esta variación en las temperaturas de la parte que se presupone activa del dado es el espesor de material termoeléctrico que se ha colocado en la parte superior, cuya conductividad térmica es varias veces inferior a la del cobre del módulo convencional.

A continuación se analiza la distribución de voltaje debido al Seebeck de cada diseño. En el módulo convencional, Fig. 375, se ve la distribución del escalar UDS1.

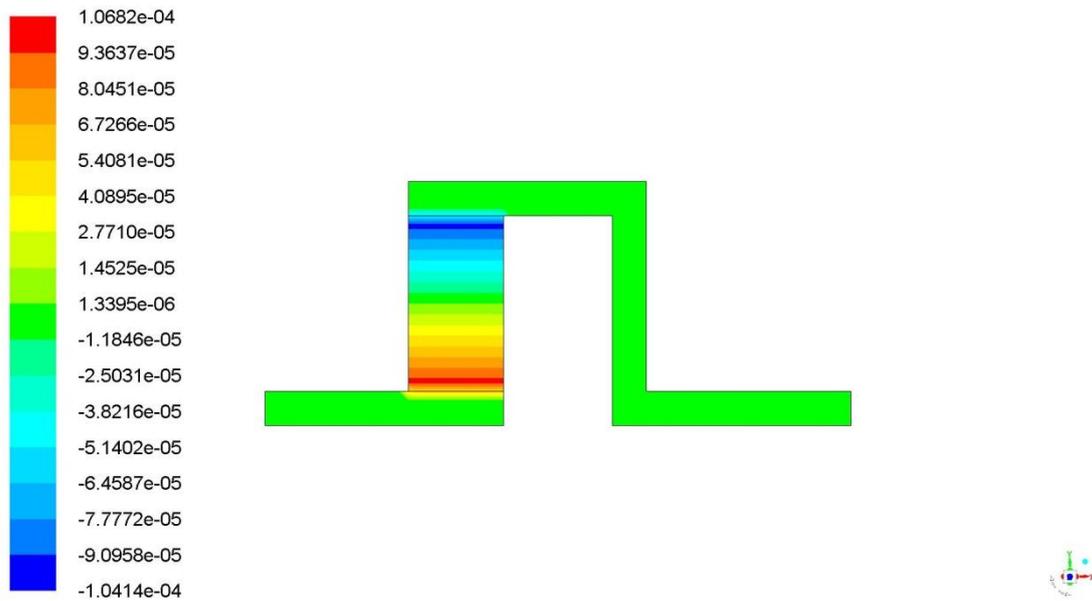


Fig. 375. Distribución de voltaje debido a Seebeck en módulo convencional.

Como se aprecia y es lógico, esta fuerza electromotriz solo tiene lugar en el dado de material termoeléctrico. En la Fig. 376 se observa la distribución de este mismo campo en el módulo con corte.

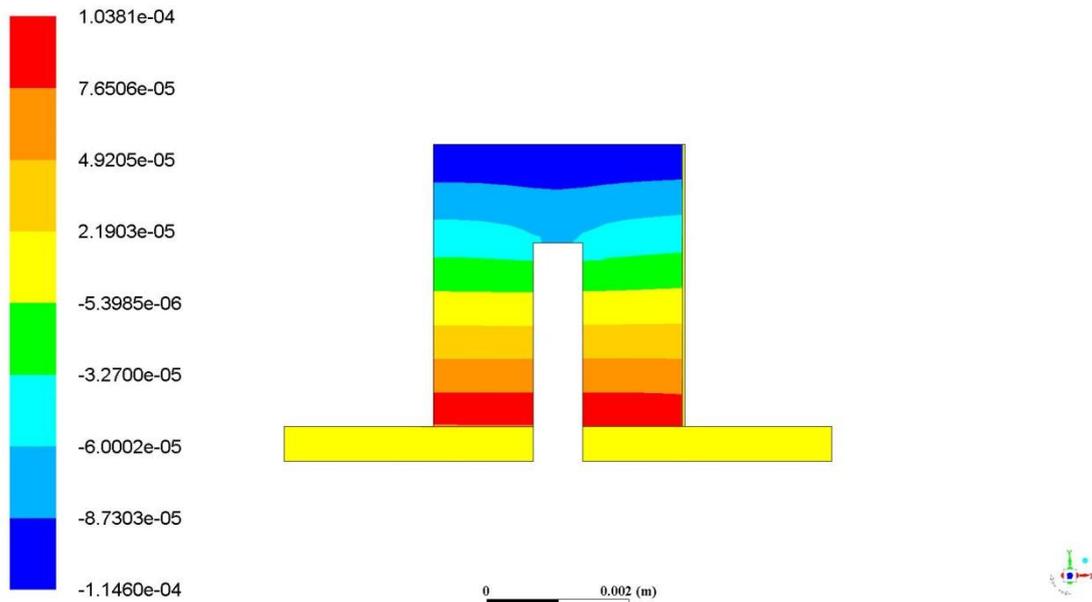


Fig. 376. Distribución de voltaje debido a Seebeck en módulo con corte.

En este caso, a las partes que no generan tensión de Seebeck hay que incluir la metalización de plata visible en el lado derecho. Existe una correlación entre la distribución de temperaturas de la Fig. 374 y la tensión por el Seebeck generado en Fig. 375 y Fig. 376.

Por último, se observará la diferencia de distribución de tensión debida al paso de corriente, la cual a su vez está inducida por el Seebeck del dado.

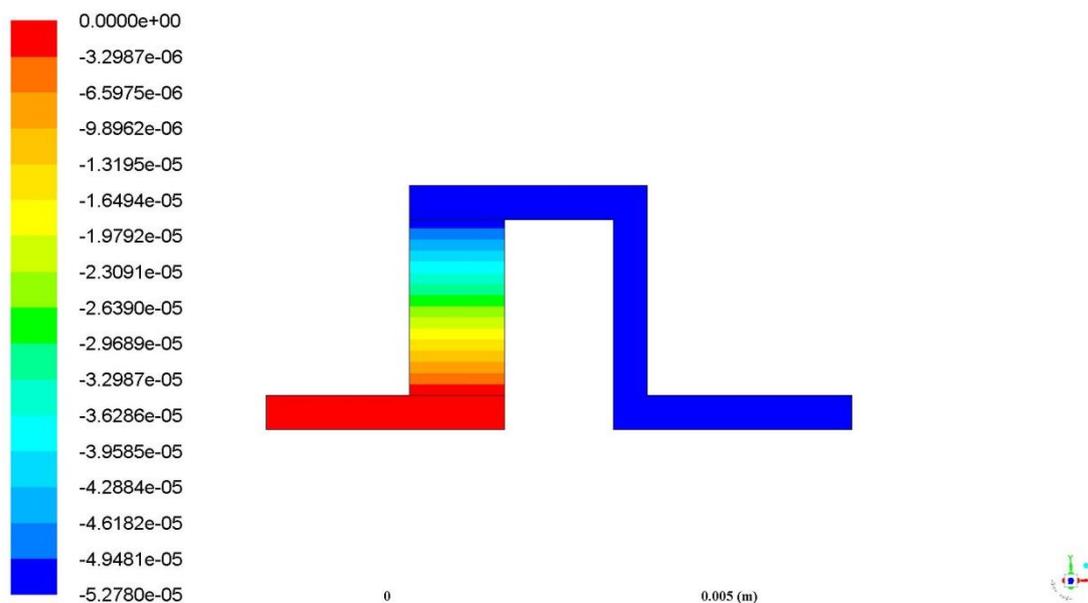


Fig. 377. Distribución de voltaje debido al paso de corriente en módulo convencional.

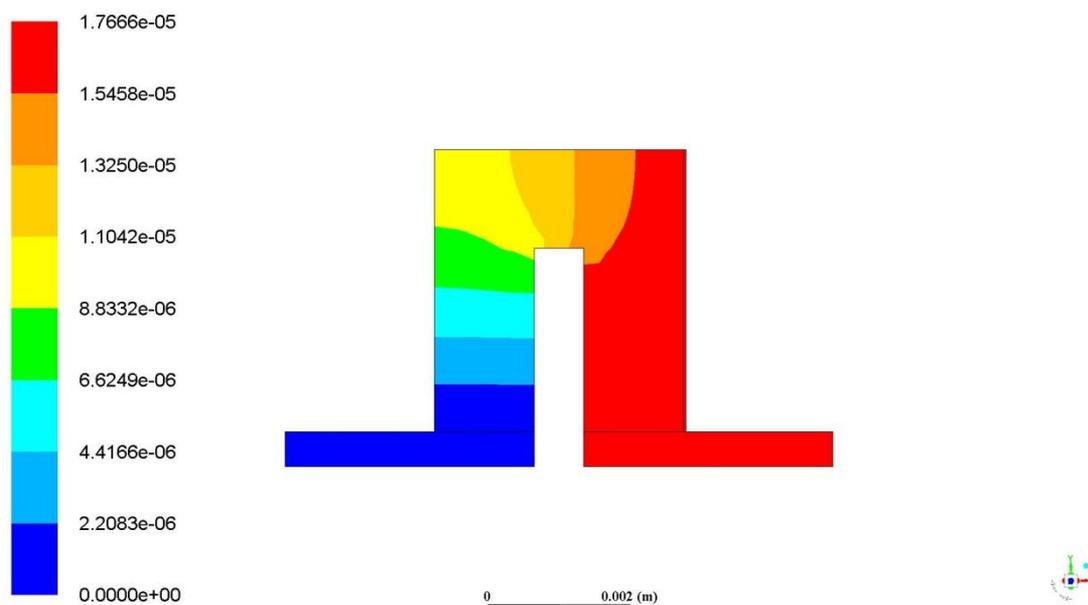


Fig. 378. Distribución de voltaje debido al paso de corriente en módulo con corte.

Como se puede ver, en ambos casos y según las condiciones de contorno comunes impuestas, la tensión en la pata izquierda de ambos montajes es igual a cero, siendo la referencia.

C.2.3 Conclusiones

En esta fase del estudio se han comparado dos tipos de construcciones de módulos Unileg, uno siguiendo una topología convencional y otra novedosa basada en la realización de un corte y una metalización lateral mediante Fluent utilizando las UDF

El análisis realizado combina los procesos térmicos y eléctricos en el mismo cálculo, por lo que dota a los resultados de gran interés, al conocer no solo los valores finales sino el cómo o porqué se han producido.



La primera conclusión, a nivel térmico, es que el hecho de tener material termoeléctrico por encima del corte disminuye la diferencia de temperatura efectiva entre los extremos de la parte activa de la pata.

En cuanto a la distribución de tensiones dentro del dado de material termoeléctrico se extraen tres conclusiones.

La primera es que la corriente, al tener que atravesar una gran cantidad de material en el caso del módulo con corte, genera un incremento notable de resistencia en el mismo. Esto da pie a pensar que es necesario extender la metalización o alterar su ubicación para disminuir la resistencia interna.

La presencia de esta metalización genera un desbalanceo en el Seebeck generado que provoca la diferencia de potencial total del conjunto. Esta falta de balance estaba prevista en el diseño, sin embargo, no se previó que la tensión y a consecuencia de ella la corriente verían alterada su sentido o polaridad.

Por último, la tensión generada en este módulo es tres veces inferior a la del módulo convencional, lo que puede hacer que se requieran más dados para conseguir proporcionar la tensión necesaria para cada aplicación.

A consecuencia de lo arriba expuesto, se genera finalmente una diferencia de 18 veces en potencia generada entre módulos, a favor del módulo convencional.

Siendo el objetivo del proyecto obtener una geometría de módulo con un coste bajo y robusta, el deterioro de las propiedades de conversión de energía está compensado.

Por esto, para los siguientes análisis se observa la necesidad de verificar y avanzar en una serie de cuestiones:

- Implicaciones de geometría auxiliar (sobrante superior y pata cortocircuitada) en la generación eléctrica. Modificación de espesores, longitud del corte...
- Aplicación de propiedades del material termoeléctrico óxido de este proyecto.
- Utilización de condiciones de contorno que permitan un mayor desbalanceo térmico en el módulo, como convección o flujo térmico prescrito.
- Se ha observado la necesidad de paralelizar el código de la UDF para poder acelerar los cálculos, ya que los tiempos actuales no permitirían la realización de cálculos en régimen transitorio con operatividad.

C.3. Prototipo y sistema de medida

C.3.1 Desarrollo del sistema de medida del módulo TE

Para conocer y tener completamente caracterizado el comportamiento de un módulo termoelectrico se han de obtener una serie de curvas y datos de funcionamiento. Estos datos ayudan al técnico que vaya a dimensionar un sistema compuesto por módulos termoelectricos a seleccionar aquel que cumpla con los requisitos de tensión y potencia generada.

Se ha hecho una revisión de hojas de especificaciones de distintos fabricantes de módulos termoelectricos, Custom Thermoelectrics, Laird y RMT, y se ha escogido como referencia la hoja de especificaciones la del último fabricante por ser la más práctica y que más información aportaba en relación a la extensión del documento. A continuación, se muestra un ejemplo de Datasheet de un módulo de RMT el cual muestra sus características básicas en dos caras de A4.

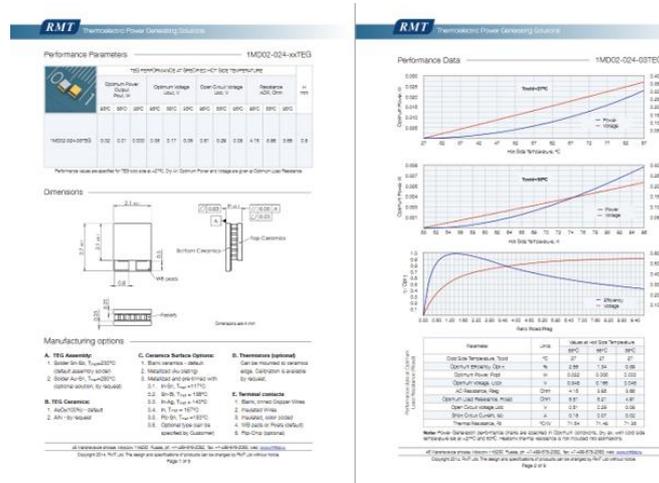


Fig. 379. Datasheet de un módulo termoelectrico de la empresa de RMT

La hoja de especificaciones muestra la siguiente información:

- Tabla a tres temperaturas de lado caliente con una temperatura de lado frío y datos de:
 - Tensión óptima
 - Potencia óptima
 - Resistencia eléctrica de corriente alterna del módulo
- Dimensiones del módulo y tolerancias dimensionales y geométricas.
- Opciones de fabricación relativas a materiales y acabados.
- Curvas de rendimiento
 - Potencia y tensión frente a temperatura de lado caliente
 - Para dos temperaturas de lado frío fijas
 - Con carga eléctrica igual a la resistencia óptima
 - Rendimiento / Rendimiento óptimo y tensión frente al ratio entre la resistencia de carga y la resistencia del módulo termoelectrico.

A la vista de las curvas y datos que ofrece la hoja de especificaciones, el sistema de medida de las propiedades del módulo debe cumplir los siguientes requisitos:



C.3.2 Parte térmica

Los resultados en cuanto a la parte térmica se dan en base a las temperaturas del foco frío y foco caliente, independientemente del flujo térmico que pasa a través del módulo y de la resistencia térmica de disipadores. Por ello, será necesario tener monitorizada la temperatura de ambos extremos del módulo. Previendo que se desee evaluar las propiedades en transitorios, parece óptimo el uso de termopares para realizar esta medición, en concreto de tipo K por su amplio rango de medición, el cual incluye altas temperaturas. Debido a su baja masa, afectan poco a la medición y responden rápido a los cambios de temperatura. Estos termopares serán insertados en sendos bloques de un material que uniformice la temperatura en los extremos del módulo. De este modo se garantizará un buen contacto térmico y se asegura que no existen zonas de mayor flujo térmico. Este bloque ha de ser de un material que soporte temperaturas elevadas, como acero inoxidable.

Por otro lado, será necesario tener las temperaturas de estos bloques controladas. Para ello se emplearán dos controles PID, uno para cada lado del módulo. Mediante el software de control Labview se programarán rutinas de ensayo de tal modo que se ensayen los puntos (Temperatura de foco caliente) que conforman las curvas de la hoja de especificaciones denominada curvas de rendimiento. Los controles PID tendrán dos variables en su control, la potencia aplicada en la zona de calentamiento y la disipación del circuito de refrigeración. Ajustando ambas variables se conseguirán las temperaturas deseadas en ambos lados.

Conocida la potencia térmica aplicada o disipada se puede calcular con precisión la resistencia térmica del módulo termoeléctrico. Este es un parámetro esencial en el dimensionamiento de futuros sistemas donde se integren los módulos termoeléctricos, por lo que se ha puesto especial atención al diseño de un sistema donde se conozca en todo momento la potencia térmica circulante. Para ello habrá que tener en cuenta también las temperaturas en los extremos del módulo.

C.3.3 Parte eléctrica

La parte eléctrica de este sistema es la encargada de simular las cargas que se alimentarán con el módulo termoeléctrico y medir cómo está entregando esa potencia.

Para la carga, dado que en la hoja de especificaciones se usan cargas variables, se empleará una resistencia electrónica de corriente continua programable. De este modo, al igual que con la temperatura, se podrá hacer un barrido en la resistencia de carga. Estas cargas van en relación a la resistencia de alterna del módulo TE, por lo que habrá que añadir un sistema de medición de resistencia interna.

En cuanto a la tensión e intensidad, se emplearán módulos específicos del hardware de National Instruments CompactDAQ para el registro de estas variables. Durante el postproceso se tratarán para obtener la potencia que ha desarrollado el módulo.

C.3.4 Postprocesado

Muchas de las variables, como la eficiencia y la determinación de cargas óptimas se obtendrán operando las variables principales que han sido tomadas en los apartados térmico y eléctrico. Se pueden considerar variables derivadas.

C.3.5 Ensayos y resultados.

Se ha desarrollado un banco de ensayo a escala donde verificar el concepto descrito y caracterizar un módulo de material termoeléctrico óxido. En la Fig. 380 se ve una imagen de la configuración experimental.

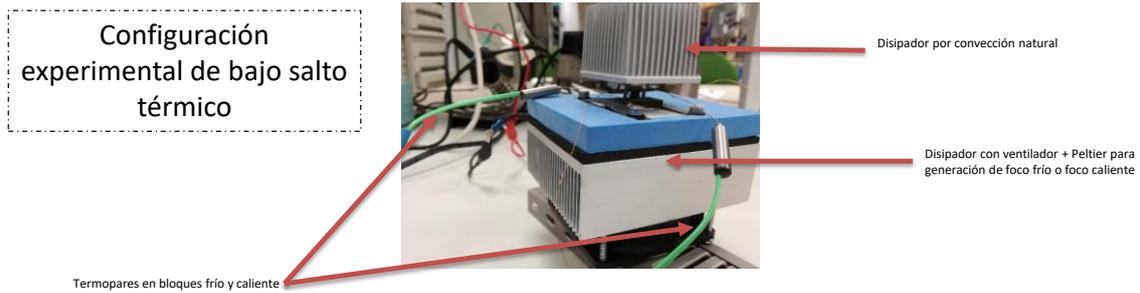


Fig. 380. Configuración experimental de bajo salto térmico para ensayo de estructuras en □

Este *setup* tan solo tiene un foco de calor/frío, siendo el otro foco el ambiente del laboratorio donde se han desarrollado las pruebas. El foco controlado cuenta con un módulo termoeléctrico comercial empleado como bomba de calor, de modo que invirtiendo su polaridad se ha logrado hacer circular el calor en un sentido y en el inverso. Este conjunto cuenta también con un disipador de aletas y un ventilador para incrementar el flujo térmico para una misma potencia aplicada. La resistencia térmica de disipador de aletas es conocida, lo que permite calcular el flujo térmico que atraviesa todo el conjunto conociendo su temperatura.

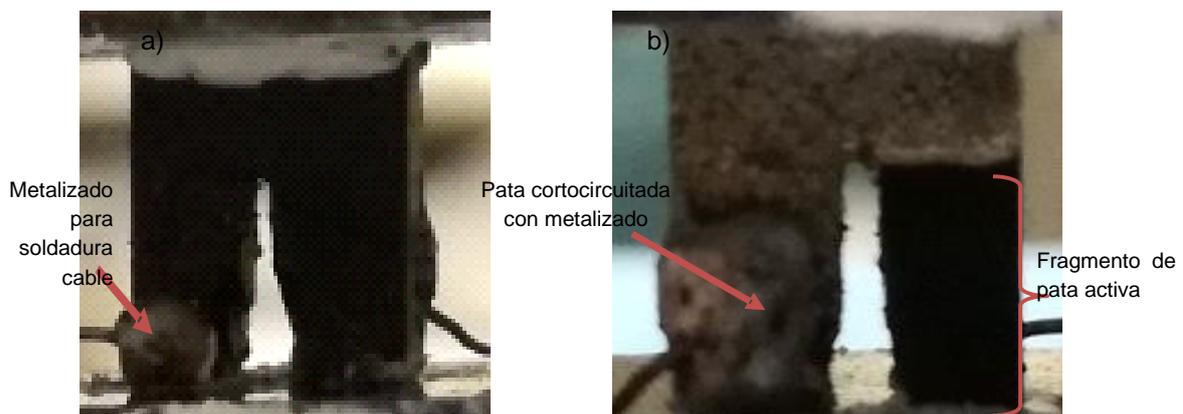


Fig. 381. Prototipo de estructura en □ con a) lado no metalizado y b) lado metalizado

El módulo termoeléctrico, que en este caso está compuesto por tan solo un dado, se encuentra entre dos bloques de aluminio de masa suficientemente mayor a la del módulo como para garantizar la uniformidad térmica. Mediante unos termopares insertados en unos agujeros practicados a estos módulos, se tomará la temperatura inferior y superior, como se ve en la siguiente imagen.

En la Fig. 381 se aprecian las conexiones eléctricas realizadas en el dado, así como las partes metalizadas, no metalizadas y la parte activa del dado.

Los experimentos destinados a validar este *setup* han ido acompañados de termografías para comparar con las simulaciones computacionales.

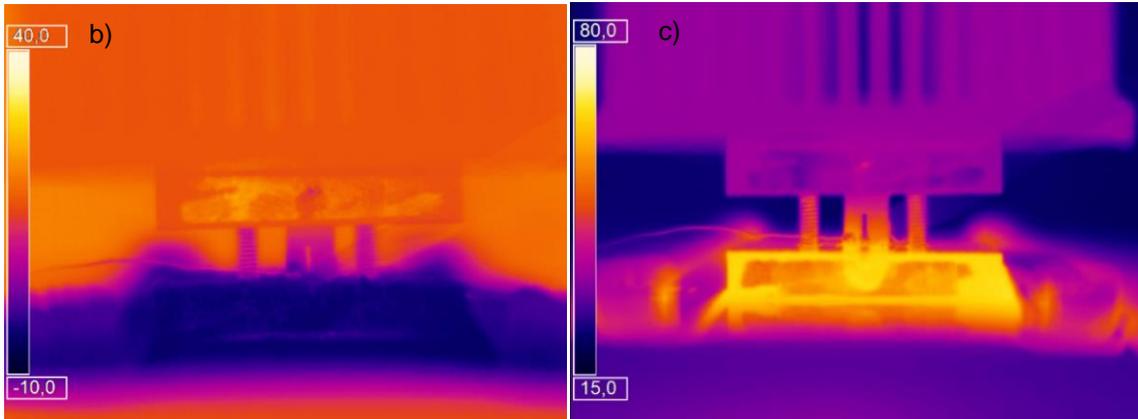
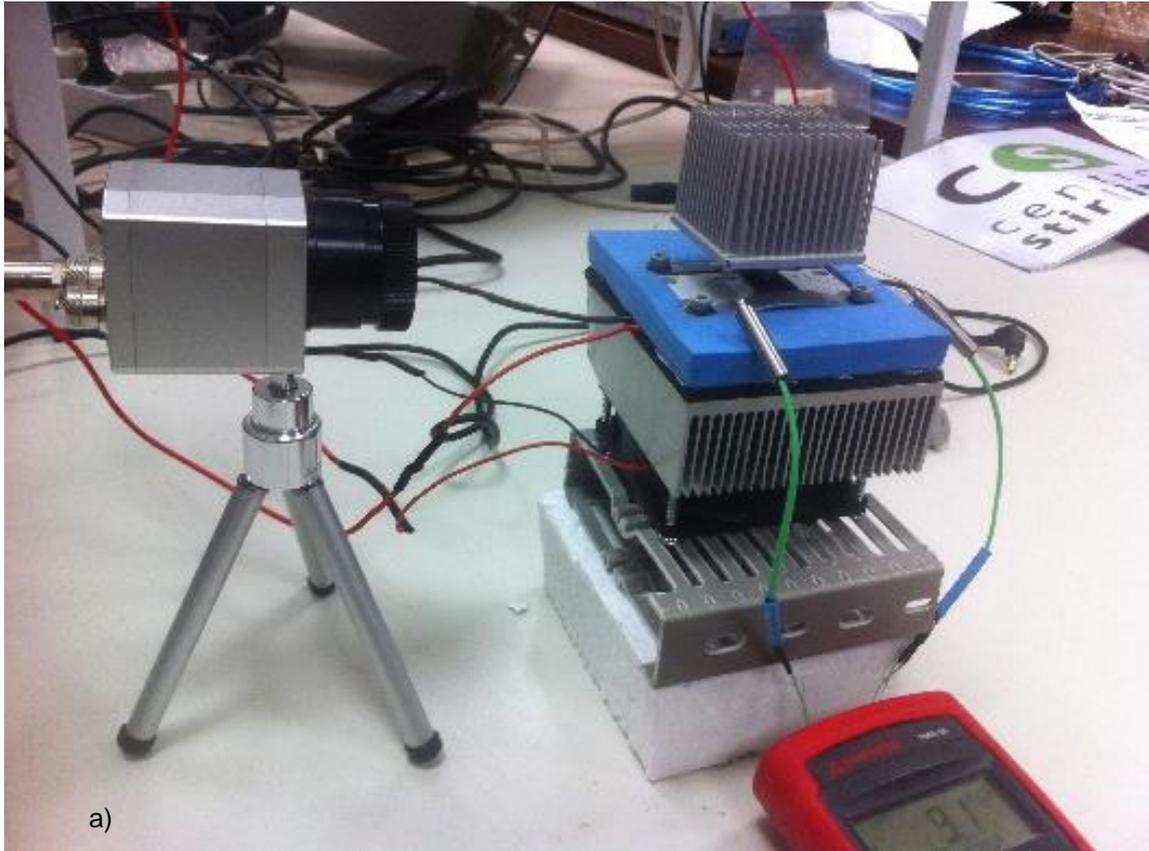


Fig. 382. a) Banco de caracterización de baja temperatura completo, b) termografía con foco frío regulado y c) termografía con foco regulado.

Se han empleado dos temperaturas distintas de foco frío y foco caliente, en función de la dirección del flujo térmico. En el caso donde menor diferencia de temperatura existía entre caras, 8 °C, la potencia desarrollada máxima ronda los 0.3 mW y en el caso donde existe mayor diferencia, 18 °C, esta potencia se multiplica prácticamente por cinco. En cuanto a la tensión, el incremento a lo largo del rango ronda los 0.4 mV.

Como resultado se muestra la curva característica V-I en la Fig. 383 y la curva característica P-I en la Fig. 384.

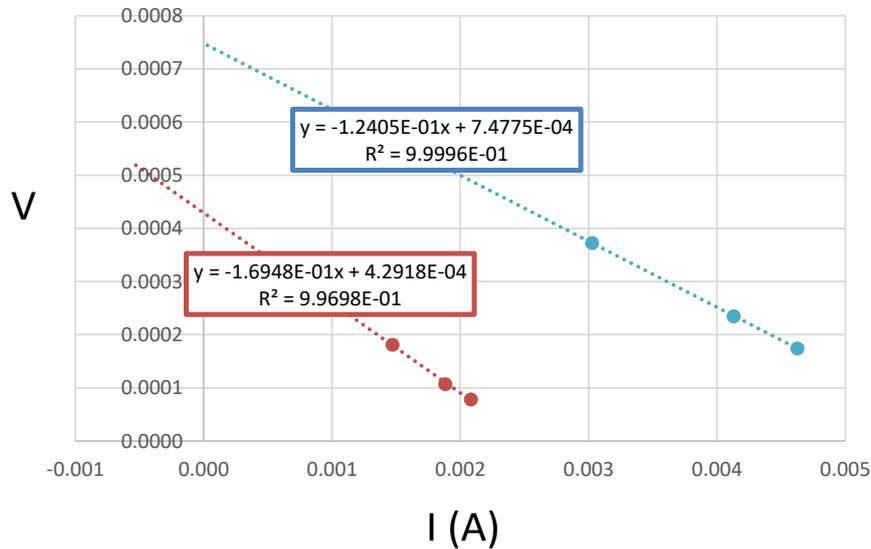


Fig. 383. Curva característica V-I de las estructuras en □ para 8°C (rojo) y 18°C (azul) de diferencia de temperatura.

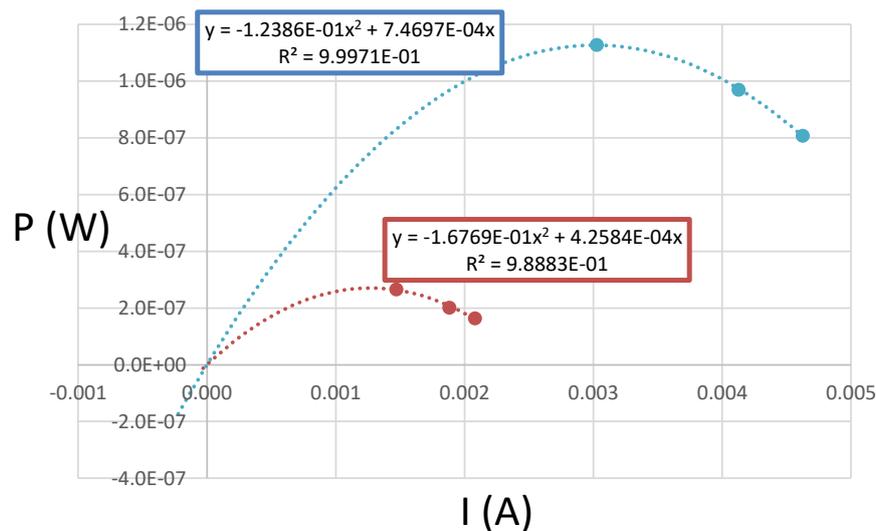


Fig. 384. Curva característica P-I de las estructuras en □ para 8°C (rojo) y 18°C (azul) de diferencia de temperatura.

Se han empleado dos temperaturas distintas de foco frío y foco caliente, en función de la dirección del flujo térmico. En el caso donde menor diferencia de temperatura existía entre caras, 8 °C, la potencia desarrollada máxima ronda los 0.3 mW y en el caso donde existe mayor diferencia, 18 °C, esta potencia se multiplica prácticamente por cinco. En cuanto a la tensión, el incremento a lo largo del rango ronda los 0.4 mV.