



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y experimentación de un sistema de refrigeración por
cambio de fase para procesadores de cálculo*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Antonio Segundo Siles

DIRECTORES: Roberto Bellas Rivera
Miguel Ángel Gómez Rodríguez

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y experimentación de un sistema de refrigeración por
cambio de fase para procesadores de cálculo*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

A lo largo de la historia el ser humano ha sentido la necesidad de “refrigerar”. Esta necesidad ha evolucionado desde la preservación de alimentos a través de las largas travesías de ultramar, hasta la obtención de un habitáculo con una temperatura confortable en los meses más calurosos. Sin embargo, hoy en día la refrigeración juega un papel primordial en la guerra librada entre las compañías a la vanguardia tecnológica, buscando día a día la mejora continua en el desarrollo de sus productos y la optimización en sus procesos.

Debido a esta necesidad de obtención de recursos electrónicos de mayor potencia, mayor capacidad, mayor versatilidad y menor tamaño, conseguir reducir la temperatura de trabajo del componente electrónico al mínimo de forma económica supone una ventaja empresarial competitiva.

Por ello, en el presente proyecto se procede a diseñar un sistema de refrigeración por cambio de fase, realizando distintos experimentos y ensayos así como contrastando resultados con el resto de sistemas de refrigeración convencionales del mercado.

Finalmente, se probará la existencia de una alternativa a la refrigeración actual convencional de elementos electrónicos, así como se demostrará la existencia de una línea de investigación futura que permite la optimización y eficiencia del trabajo realizado por sistemas informáticos y procesadores de cálculo.

PALABRAS CLAVE

Refrigeración, Novec, Fase, Electrónico, Futuro.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento a mis tutores D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez y D. Roberto Bellas Rivera, ya que la realización del presente trabajo no hubiera sido posible sin el aporte de conocimientos necesarios para la definición del proyecto, el continuo trabajo diario realizado por ambos tutelándome durante el desarrollo del mismo, así como la estoica dedicación que me habéis mostrado sin reparos a pesar de vuestras otras exigencias docentes.

A mis amigos de siempre, los que nunca me abandonasteis y me apoyasteis durante todos estos años, confiando en que fuera capaz de realizar todo aquello que me propusiera a pesar de las dificultades ajenas encontradas. Gracias por haberme sacado sonrisas de dónde era imposible encontrarlas y por regalarme vuestras visitas cuando más lo necesitaba.

A Diana, por haber sido psicológica, consejera, y mano derecha durante todo este tiempo. Compañera de penas y alegrías. Gracias por el apoyo incondicional aportado y por haberme ayudado a crecer como persona día a día.

A aquellas personas que se fueron durante estos cinco años y que intervinieron en mi vida de manera significativa, velando por mi persona desde allá arriba. Siempre os tengo presentes, sigo vuestro ejemplo diariamente y no os olvido. También, a toda mi familia, en especial mi abuela Victoria, la cual sé que no se leerá todo este documento, pero cuando se lo cuente de boca se le llenarán los ojos de alegría.

Y por último pero más importante, a mis padres, Antonio Segundo del Pino y Josefina Siles Arenas. Vosotros sois el principal motor de mi vida. Sin lugar a dudas no existen suficientes palabras para agradecer el trabajo realizado como padres a lo largo de todo este tiempo. Sin vuestra educación, alegría, ejemplo de superación, consejos, conocimientos, charlas y cuidados, el camino hubiera sido mucho más complicado. Gracias por estar siempre a mi lado, os quiero.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Introducción	9
1.2 Objetivos	11
1.3 Estructura	12
1.4 Teoría aplicada	12
1.4.1 Sistema Termodinámico	13
1.4.2 Equilibrio Termodinámico.....	13
1.4.3 Procesos reversibles e irreversibles	14
1.4.4 Calor	14
1.4.5 Capacidad Calorífica	15
1.4.6 Principio cero de la termodinámica	15
1.4.7 Primer principio de la Termodinámica	16
1.4.8 Segundo principio de la Termodinámica	16
1.4.9 Cambio de fase y calor latente	19
1.4.10 Transferencia de Calor.....	19
1.4.11 Ley de los Gases Ideales.....	22
1.4.12 Ecuación de Estado para Gases Reales.....	24
1.4.13 Mezcla de Gases	25
2 Estado del arte	27
2.1 Definición del Problema	27
2.2 Refrigeración por aire	28
2.3 Refrigeración Líquida	30
2.3.1 Placa fría CoolIt.....	30
2.3.2 Una fase en inmersión con aceite mineral	31
2.3.3 Dos fases en inmersión	33
2.4 Aplicaciones actuales	38
2.4.1 Sistemas de Comunicación	38
2.4.2 Automovilística.....	39
2.4.3 Aplicación Naval	40
3 Desarrollo del TFG.....	45

3.1 Introducción al Desarrollo	45
3.2 Sistema de Refrigeración utilizado	46
3.2.1 Descripción del funcionamiento del Sistema de Refrigeración.....	49
3.2.2 Relación de elementos empleados en el Sistema de Refrigeración	51
3.3 Software	61
3.3.1 Realterm.....	61
3.3.2 Microsoft Excel	62
3.3.3 Core Temp	63
3.3.4 IntelBurn Test	64
3.3.5 NX.....	65
3.4 Ensayos	66
3.4.1 Ensayos realizados con fluidos Novec® 649 y Novec® 7000	66
3.4.2 Ensayos realizados con agua destilada	68
3.4.3 Ensayos realizados mediante refrigeración por aire	69
3.4.4 Ensayos sobre un ordenador convencional.....	70
4 Resultados	74
4.1 Introducción a los resultados.....	74
4.2 Características a evaluar.....	74
4.2.1 Temperaturas registradas por las sondas de temperatura.....	74
4.2.2 Consumo eléctrico	74
4.2.3 Tiempo de convergencia al equilibrio térmico	74
4.2.4 Aplicabilidad.....	75
4.3 Resultados obtenidos.....	75
4.3.1 Ensayos realizados con fluido Novec® 649	75
4.3.2 Ensayos realizados con fluido Novec® 7000	77
4.3.3 Ensayos realizados con agua destilada	80
4.3.4 Ensayos realizados con refrigeración por aire	82
4.3.5 Ensayos sobre un ordenador convencional.....	83
4.4 Comparativa entre sistemas de refrigeración	84
4.5 Modelo de predicción numérico	85
5 Conclusiones y líneas futuras	92
5.1 Conclusiones	92
5.2 Líneas futuras	93
5.2.1 Estudio y optimización de los equipos de climatización y aires acondicionados convencionales	93

5.2.2 Análisis y optimización de los procesos de refrigeración de los equipos electrónicos de la Armada Española	95
5.2.3 Desarrollo de un sistema de refrigeración por cambio de fase en vehículos eléctricos..	101
6 Bibliografía.....	103
Anexo I: Resultados de los ensayos	107
Ensayos realizados sin vacío con fluido Novec® 649	107
Ensayos realizados a vacío con fluido Novec® 649	110
Ensayos realizados sin vacío con fluido Novec® 7000	112
Ensayos realizados a vacío con fluido Novec® 7000	115
Ensayos realizados con agua destilada.....	118
Ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire	119
Ensayos realizados sobre el ordenador convencional utilizando el sistema de refrigeración incluido de serie	120
Ensayos realizados sobre el ordenador convencional utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec® 7000 con vacío	121
Anexo II: Hoja técnica de los fluidos 3M™ Novec® 649 y Novec® 7000	122
Anexo III: Modelado en Siemens NX	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Sistemas aislados, cerrados y abiertos [10].	13
Figura 1-2 Representación de un proceso irreversible y otro reversible entre los estados 1 y 2 [9].	14
Figura 1-3 Explicación principio cero de la termodinámica [12].	15
Figura 1-4 Convenio de signos aprobados por la IUPAC y recomendados por la ASME [13].	16
Figura 1-5 Representación de máquinas térmicas según sentido de trabajo [9].	17
Figura 1-6 Enunciado de Clausius [14].	18
Figura 1-7 Enunciado de Kelvin-Planck [14].	18
Figura 1-8 Explicación del Teorema de Carnot [14].	18
Figura 1-9 Representación gráfica del ciclo de Carnot en una gráfica P-V [9].	19
Figura 1-10 Transferencia de calor por conducción, convección y radiación [16].	20
Figura 1-11 Transferencia de calor por conducción [17].	21
Figura 1-12 Ejemplo Transferencia de Calor por Convección [17].	21
Figura 1-13 Ejemplo de radiación térmica producida por un caballo [18].	22
Figura 2-1 Esquema de los sistemas de refrigeración principales.	28
Figura 2-2 Disipador de calor convencional.	29
Figura 2-3 Ventilador convencional para disipación [24].	29
Figura 2-4 Diagrama del sistema de refrigeración de Placa Fría CoolIt [28].	31
Figura 2-5 Sistema de refrigeración de una fase en inmersión con aceite [29].	32
Figura 2-6 Diagrama sistema de refrigeración de una fase en inmersión en aceite [28].	32
Figura 2-7 Sistema de enfriamiento por dos fases [24].	33
Figura 2-8 Diagrama convencional del sistema de enfriamiento por dos fases con filtro y bomba [27].	34
Figura 2-9 Diferencias fundamentales entre refrigeración por aire y fluido Novec 3M [4].	36
Figura 2-10 Rango de temperaturas de trabajo de los distintos fluidos Novec [30].	37
Figura 2-11 Refrigeración en telefonía móvil mediante tubos intercambiadores de calor [32].	38
Figura 2-12 Sistema de refrigeración líquida en móviles particulares [33].	39
Figura 2-13 Sistema de refrigeración de Tesla Model S [34].	40
Figura 2-14 Convertidor de frecuencia ABB con refrigeración líquida [35].	41
Figura 2-15 Esquema de funcionamiento aire acondicionado común [36].	42
Figura 2-16 Sistema de refrigeración en los motores diésel de las lanchas de instrucción [37].	43
Figura 2-17 Radar de exploración aérea AN/SPS-49(V)4.	44
Figura 3-1 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración	47
Figura 3-2 Elementos utilizados en el sistema de refrigeración.	48

Figura 3-3 Elementos a refrigerar.....	49
Figura 3-4 Contacto directo con el elemento a enfriar y disipador interno.....	50
Figura 3-5 Diferencia de fluidos en el interior del radiador cuando se utilizan los fluidos Novec como refrigerantes.....	50
Figura 3-6 Circulación ascendente de vapor a través del tubo de plástico.....	51
Figura 3-7 Simulador de placa electrónica de procesador de cálculo.	51
Figura 3-8 Resistencias eléctricas utilizadas en los ensayos.	52
Figura 3-9 Sondas de temperatura empleadas.	52
Figura 3-10 Situación inicial y final de las sondas empleadas.	53
Figura 3-11 Aplicación de la pasta térmica WLPK-J3 en los componentes utilizados en los ensayos.	54
Figura 3-12 Elementos ubicados en la fuente de alimentación.	54
Figura 3-13 Ejemplo de funcionamiento del registrador de temperaturas en configuración y obteniendo datos.	55
Figura 3-14 Regulador de tensión I-16 [41].	55
Figura 3-15 Demostración de la inmiscibilidad de los fluidos a pesar de ser removidos.	56
Figura 3-16 Propiedades fluido Novec® 649 [42].	57
Figura 3-17 Resultados de los tests toxicológicos del fluido Novec® 7000 [44].	58
Figura 3-18 Propiedades del fluido Novec® 7000 [44].	59
Figura 3-19 Disipador de calor Reserator1 o ZM-WB2 Gold con sus componentes iniciales [46].	60
Figura 3-20 Elementos modificados respecto al sistema de refrigeración inicial Reserator1.....	61
Figura 3-21 Interfaz del programa Realterm y obtención de resultados.	62
Figura 3-22 Entorno de trabajo de Microsoft Excel.	63
Figura 3-23 Ejemplo real de funcionamiento del programa Core Temp.....	64
Figura 3-24 Ejemplo real de funcionamiento del programa IntelBurn Test.	64
Figura 3-25 Entorno de trabajo programa NX.	65
Figura 3-26 Pieza realizada en el programa NX, impresa en 3D y colocada sobre la placa base.	66
Figura 3-27 Decantación realizada en el cambio de fluidos refrigerantes.	67
Figura 3-28 Realización de vacío del sistema.	68
Figura 3-29 Bomba de agua empleada en los ensayos realizados con agua destilada como único fluido refrigerante.	69
Figura 3-30 Elementos utilizados en los ensayos de refrigeración por aire.	70
Figura 3-31 Elementos utilizados en el ensayo sobre CPU.....	71
Figura 3-32 Sistema de anclaje en la placa base.	71
Figura 3-33 Ejemplo de empleo del conjunto mecanizado del soporte realizado del elemento ZM-WB2 GOLD.	72

Figura 3-34 Vista general durante el ensayo realizado sobre la CPU utilizando el fluido Novec® 7000.....	72
Figura 4-1 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 649 a presión atmosférica a distintas potencias.	76
Figura 4-2 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 649 a distintas potencias con vacío.	77
Figura 4-3 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 7000 a presión atmosférica a distintas potencias.	79
Figura 4-4 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 7000 a distintas potencias con vacío.	80
Figura 4-5 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con agua destilada a distintas potencias.	81
Figura 4-6 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire a distintas potencias.	82
Figura 4-7 Temperaturas máximas registradas en los cuatros núcleos operando a la máxima potencia utilizando los distintos sistemas de refrigeración.	83
Figura 4-8 Definición y numeración de los procesos que intervienen en el sistema de refrigeración.	86
Figura 4-9 Gráfica comparativa ensayo con fluido Novec® 7000 a 300W con vacío.....	90
Figura 4-10 Entorno de trabajo del modelo de predicción numérico.	91
Figura 5-1 Equipo exterior aire acondicionado convencional con sus elementos.....	94
Figura 5-2 Posible aplicación de refrigeración líquida sobre condensador para aumento de eficiencia.	94
Figura 5-3 Refrigeración de los armarios de proceso redundante (ARES).	96
Figura 5-4 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración de los armarios de proceso redundante (ARES).	97
Figura 5-5 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración propuesto para equipos electrónicos en los buques de la Armada.	98
Figura 5-6 Ejemplos de tomas de conexiones de los elementos electrónicos al fluido Novec así como del fluido Novec a los conductos comunes en estado gaseoso y estado líquido del fluido [51] [52].	99
Figura 5-7 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración propuesto para equipos electrónicos en los buques de la Armada manteniendo estanqueidad e ignifugidad (vista posterior). ..	100
Figura 5-8 Posible sistema de refrigeración de vehículos eléctricos.....	102
Figura A1-0-1 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 55W sin realizar vacío.	107
Figura A1-0-2 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 100W sin realizar vacío.	108
Figura A1-0-3 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 150W sin realizar vacío.	108
Figura A1-0-4 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 200W sin realizar vacío.	109
Figura A1-0-5 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 250W sin realizar vacío.	109
Figura A1-0-6 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 300W sin realizar vacío.	110
Figura A1-0-7 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 55W con vacío.	110

Figura A1-0-8 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 100W con vacío.	111
Figura A1-0-9 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 150W con vacío.	111
Figura A1-0-10 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 55W sin realizar vacío.	112
Figura A1-0-11 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 100W sin realizar vacío.	112
Figura A1-0-12 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 150W sin realizar vacío.	113
Figura A1-0-13 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 200W sin realizar vacío.	113
Figura A1-0-14 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 250W sin realizar vacío.	114
Figura A1-0-15 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 300W sin realizar vacío.	114
Figura A1-0-16 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 55W con vacío.	115
Figura A1-0-17 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 100W con vacío.	115
Figura A1-0-18 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 150W con vacío.	116
Figura A1-0-19 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 200W con vacío.	116
Figura A1-0-20 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 250W con vacío.	117
Figura A1-0-21 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 300W con vacío.	117
Figura A1-0-22 Gráfica ensayo con agua destilada a 55W.	118
Figura A1-0-23 Gráfica ensayo con agua destilada a 100W.	118
Figura A1-0-24 Gráfica ensayo con agua destilada a 150W.	119
Figura A1-0-25 Gráfica ensayo con sistema de refrigeración por aire a 55W.	119
Figura A1-0-26 Gráfica ensayo con sistema de refrigeración por aire a 100W.	120
Figura A1-0-27 Registro de temperaturas obtenidas en cada núcleo durante la ejecución del ensayo utilizando el sistema de refrigeración incluido de serie.	120
Figura A1-0-28 Registro de temperaturas obtenidas en cada núcleo durante la ejecución del ensayo utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec® 7000 con vacío.	121
Figura A3-0-1 Primer diseño del mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.	134
Figura A3-0-2 Segundo diseño del mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.	134
Figura A3-0-3 Mecanizado final del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.	135
Figura A3-0-4 Mecanizado del soporte realizado para el ordenador de menor potencia.	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Coeficiente de convección según el tipo de proceso aplicado [26].	30
Tabla 2-2 Tipos de fluidos y propiedades fundamentales [27].	35
Tabla 2-3 Comparación de propiedades entre fluidos Novec [30].	37
Tabla 3-1 Ensayos realizados.	46
Tabla 3-2 Elementos utilizados en el sistema de refrigeración.	48
Tabla 3-3 Elementos a refrigerar.	49
Tabla 4-1 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 649 sin realizar vacío.	76
Tabla 4-2 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 649 con vacío.	77
Tabla 4-3 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 7000 sin realizar vacío.	78
Tabla 4-4 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 7000 con vacío.	80
Tabla 4-5 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias utilizando agua destilada como fluido de trabajo.	81
Tabla 4-6 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire a distintas potencias.	82
Tabla 4-7 Temperaturas máximas registradas en los cuatros núcleos de la CPU operando a la máxima potencia utilizando los distintos sistemas de refrigeración.	83
Tabla 4-8 Análisis multicriterio de los distintos sistemas de refrigeración estudiados.	85

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El ser humano, desde la antigüedad, ha experimentado la necesidad de conseguir mantener alimentos y ambientes a una temperatura considerada. Sin embargo, aunque parezca irreal, antes de la construcción de cualquier máquina térmica, existían procedimientos y técnicas para conseguir estos objetivos.

Existen escritos de China del primer milenio A.C los cuales citan la existencia de pozos o cuevas de hielo aisladas utilizadas en invierno para la conservación del hielo y su posterior utilización en verano. Otras culturas en ser pioneras en la conservación del frío, fueron los griegos y romanos, los cuales procedían a comprimir la nieve en pozos con ramas de árboles y paja. Tras ser comprimida, la nieve pasaba a convertirse en hielo, conservándose también para su utilización en los meses más calurosos. Curiosamente esta técnica ha seguido perdurando a lo largo de los años hasta el siglo XX con diversas variaciones en zonas rurales catalanas donde existían los llamados “pous de glaç” [1].

Otros escritos antiguos citan a civilizaciones como los egipcios, que sin ningún tipo de formación científica o base de conocimiento, conseguían realizar un tipo de refrigeración artificial produciendo hielo. Esta técnica consistía en utilizar vasijas poco profundas y con la porosidad adecuada, colocadas encima de paja para evitar la conducción térmica con la tierra. Por la noche, si las condiciones eran óptimas (sobre todo frío y sequedad) se llegaba a obtener una pérdida de calor por radiación considerable y se facilitaba la evaporación, produciéndose finas capas de hielo en la superficie de las vasijas. Incluso en el libro “Las mil y una noches” [2] se hace referencia a que en la Edad Media se transportaba hielo en camellos desde el Líbano a los palacios de los Califas en Bagdad y Damasco.

A lo largo de la historia, entre la refrigeración natural citada anteriormente y la artificial utilizada hoy en día, se ha investigado sobre la utilización de procesos químicos, tales como añadir nitrato sódico al agua, con objeto de disminuir la temperatura. Este método era empleado en el siglo IV D.C en la India. Estos procesos químicos se fueron estudiando a lo largo de todo el siglo XVII, XVIII y XIX llegando a descubrimientos interesantes y transcendentales tales como el cero absoluto de Fahrenheit en 1715 utilizando una mezcla de nieve y nitrato amónico.

En el año 1750, según la literatura anglosajona, William Cullen (1712-1790) se centra en el fenómeno de la evaporación de líquidos, de forma que realizando vacío y evaporando líquidos muy volátiles, se conseguía producir hielo. En 1755 publicaría un trabajo científico titulado “Essay on Cold Produced by Evaporating Fluids”, en el que cita: “*En un experimento hecho con éter nitroso, cuando la temperatura del aire estaba alrededor de los 43°F, colocamos la vasija que contenía éter dentro de otra, un poco mayor, que contenía agua. Después de hacer vacío y que las vasijas hubieran*

permanecido unos minutos en el mismo, encontramos la mayor parte del agua congelada y que la vasija que contenía éter estaba rodeada de una gruesa y firme capa de hielo.” [3] [1]

A lo largo del siglo XIX se consiguen realizar proyectos y reacciones capaces de conservar alimentos mediante refrigerantes así como congelarlos, pero eran procesos discontinuos o de capacidad muy limitada, por lo que no se considerará refrigeración hasta la invención de los métodos continuos. Además, cierta parte de la población era reacia a este tipo de sistema de conservación de víveres, debido a que atentaba contra la duración de vida de los alimentos impuesta por la voluntad divina.

Hasta 1866 todos los proyectos o estudios realizados no pasaron del laboratorio, realizando en ese año Edmond Carré un aparato de uso comercial con el empleo de refrigerantes. Básicamente consistía en realizar un enfriamiento de garrafas de agua consiguiendo congelarlas en un tiempo de 20 o 25 minutos moviendo ácido sulfúrico por medio de un brazo conectado al émbolo de una bomba de vacío. Gracias a estos principios, en 1909, Maurice Leblanc consigue crear la refrigeración en las máquinas de vapor con eyectores de vapor gracias a la evaporación del agua a baja presión.

Durante el siglo XX, se sigue investigando sobre la implantación de los sistemas de refrigeración en aplicaciones industriales, y se produce una necesidad de dicha aplicación en territorios en pleno apogeo industrial tales como Europa, Estados Unidos y Australia. Dichos territorios contemplaban una necesidad de refrigeración en sectores como la destilería, lechería o cervecería.

En 1965, se predice una continua disminución sistemática en el coste y aumento en el rendimiento de los circuitos integrados por parte del Director de I+D de Fairchild (y posteriormente cofundador de Intel) Gordon Moore. Posteriormente se daría a conocer dicha predicción como la ‘Ley de Moore’ la cual se mantuvo durante más de 40 años, siendo testigo de una gran variedad de nuevos productos en el mercado, desde misiles balísticos intercontinentales hasta sistemas de monitorizado ambiental global y superordenadores.

Empresas como 3M se han dedicado al estudio de la refrigeración por inmersión y cambio de fase desde 1950, presentando su primer líquido dieléctrico de transferencia de calor flúor-químico para enfriamiento por contacto directo con aplicación en aviónica militar. Durante la segunda mitad del siglo XX la empresa se esforzaría mayormente en el desarrollo de enfriamiento por contacto directo, permitiendo la creación y desarrollo de equipos como el radar o superordenadores [4].

Debido a la contaminación y problemas derivados de ella, tal y como la destrucción de la capa de ozono, se realizan dos protocolos para uso y limitación de gases y líquidos nocivos con el medio ambiente. Todo comienza en 1982 con 1a “Carta Mundial de la Naturaleza”, la cual comprometía a los países firmantes a mantener el medio ambiente y disminuir la contaminación de grandes industrias, así como idear y promover el desarrollo sostenible. En 1985 se firma el “Convenio de Viena” entrando en vigor en 1988 para la protección de la capa de ozono, actuando como marco de esfuerzo internacional para la colaboración en la protección de la capa de ozono sin ninguna repercusión vinculante.

Con el “Protocolo de Montreal” del 16 de Septiembre de 1987 relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono y siendo revisado posteriormente varias veces, se crea un marco de objetivos y restricciones para la eliminación de las emisiones mundiales de la capa de ozono (SACO), entre ellas, medidas para la eliminación de los CFC (clorofluorocarbonos) y planes de gestión para la eliminación de los HCFC (hidroclorofluorocarbonos) [5].

Posteriormente se celebraría la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)” el 9 de mayo de 1992, entrando en vigor en 1994, en la cual se intentaría concienciar al público mundial sobre las consecuencias del cambio climático entre otras cosas. Esta convención derivaría en 1997 al “Protocolo de Kyoto”, firmado en Japón y entrando en vigencia en 2005, en el cual se diseña un programa específico para desintoxicar al planeta así como reducir la contaminación causada por los gases tóxicos que causan el calentamiento global tales como los gases hexafluoruros o dióxido de carbono [6].

Debido a esta preocupación por el medio ambiente y emisiones perjudiciales para la capa de ozono así como los respectivos tratados en vigor, la empresa 3M crea en 1996 una nueva clase de líquidos sostenibles, con propiedades tales como dieléctricos, no agotadores del ozono, no inflamables, y con baja toxicidad. Estos líquidos fueron introducidos como reemplazos de aquellos que emitían gases de efecto invernadero (CFC, HFC...), permitiendo seguir a la vanguardia de la refrigeración líquida siendo al mismo tiempo sostenible con el medio ambiente. Entre estos fluidos podemos encontrar el Novec 7000 o el Novec 649 con los que se trabajará durante el presente trabajo de fin de grado.

Hoy en día vivimos en una sociedad tecnológica en la cual casi todos los procesos están regidos por procesadores de cálculo y sistemas informáticos. Pensar en la posibilidad de disponer de un elemento de comunicación personal portátil que permitiera estar en contacto constante en casi cualquier parte del mundo parecía inimaginable. Sin embargo, cada vez intentamos realizar más actividades con elementos más limitados, generando un gran consumo de potencia en espacios relativamente pequeños y siendo necesario un sistema de refrigeración apto y capaz de disipar dicha cantidad de calor generado.

Empresas tales como IBM están estudiando este tipo de problemas de consumo y refrigeración. A lo largo de su historia ha incorporado diversos sistemas de refrigeración a medida que comprobaba que los diferentes chips experimentaban un excesivo calentamiento debido a la incorporación de elementos más pequeños y exigirles una mayor demanda funcional. Es por ello que en 1995 se realiza una incorporación de semiconductores complementarios de óxido metálico, o CMOS, los cuales tenían un menor consumo y la refrigeración por aire era suficiente para la disipación del calor generado. Sin embargo, tal y como cita Roger Schmidt, miembro de la IBM a cargo de la investigación sobre eficiencia energética de la compañía, se están replanteando los sistemas de refrigeración por líquido con incorporación de cambio de fase, ya que se considera que la refrigeración por aire está llegando a su fin. También asegura que aquellos que siguen inmersos en la refrigeración por aire es que han crecido en la era CMOS, y predice el ingeniero de IBM que la empresa se cambiará en un futuro no muy lejano casi en su totalidad a la refrigeración líquida debido a sus aportaciones [7].

Debido a la necesidad de creación y desarrollo de un sistema de refrigeración que satisfaga las necesidades actuales y futuras de los sistemas de cálculo e informáticos, permitiéndoles trabajar de forma eficiente y óptima, se realiza el presente trabajo de fin de grado con objeto de diseñar y experimentar con un sistema de refrigeración por cambio de fase para procesadores de cálculo. De esta forma se plantea una alternativa a los sistemas de refrigeración actuales y se abre una línea de estudio de refrigeración futura.

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene un fin fundamental: Probar que existe una alternativa a la refrigeración actual convencional de elementos electrónicos, continuando con el TFG realizado el año anterior [8], mejorando las técnicas empleadas, procedimientos, equipos, fluidos, conocimientos, y corrigiendo los errores observados, al objeto de construir los sistemas que faciliten la apertura de una línea de investigación futura que permitiría la optimización y eficiencia del funcionamiento de los sistemas informáticos y procesadores de cálculo.

Para lograr dicho fin se realizará un diseño y posterior experimentación de un sistema de refrigeración por cambio de fase para procesadores de cálculo, comenzando con la ejecución de pruebas aisladas a diversas potencias y con diferentes líquidos, para finalizar ensayando con sistemas reales.

Entre los objetivos a conseguir se plantean:

- Estudio y explicación de los sistemas de refrigeración por inmersión y cambio de fase.
- Diseño de un sistema de refrigeración por cambio de fase.

- Experimentación con el sistema de refrigeración.
- Realización de ensayos con diversos líquidos dieléctricos y potencia asignada para un mejor entendimiento y contraste entre ambos.
- Desarrollo, análisis y explicación comparativa entre los distintos sistemas y procedimientos empleados en la refrigeración.
- Experimentación sobre sistemas reales así como desarrollo, análisis y explicación de los datos obtenidos.
- Explicación matemática de las ecuaciones que rigen el funcionamiento de los ensayos.
- Creación de un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento del sistema.
- Estudio y explicación acerca de las líneas futuras de la refrigeración por cambio de fase.
- Plantear posibles líneas de investigación y propuestas para un desarrollo futuro.

1.3 Estructura

El presente Trabajo de Fin de Grado se organiza en cinco apartados principales desarrollados a lo largo de la memoria, más un apartado al final de la misma conteniendo todos los anexos adjuntos. Estos cinco apartados principales son:

- Introducción y objetivos: En este apartado se realiza un somero estudio sobre la refrigeración, haciendo un análisis de cómo surge y evoluciona a lo largo de la historia hasta derivar a los sistemas de refrigeración empleados hoy en día, destacando finalmente los objetivos marcados durante la realización del presente trabajo. Además, se explican unos breves conceptos teóricos necesarios con objeto de que cualquier lector comprenda los sucesos y procedimientos desarrollados en los ensayos realizados.
- Estado del arte: Se desarrollan y estudian los distintos sistemas de refrigeración empleados en la actualidad que satisfacen las necesidades de la sociedad, empezando por una clasificación general y descripción de los principales sistemas utilizados, y posteriormente se profundiza en el análisis de las diversas aplicaciones en las que están tomando parte en la actualidad.
- Desarrollo del TFG: Se explica de forma detallada el método empleado para la ejecución del TFG, describiendo los componentes materiales empleados en cada ensayo así como procedimientos y softwares utilizados. Además, se resaltan aquellas vicisitudes particulares de cada ensayo, condiciones de trabajo y distintas configuraciones empleadas para la realización de los mismos.
- Resultados: Se describen las características principales a considerar y evaluar durante el desarrollo de los ensayos, al igual que se analizan los datos numéricos obtenidos, procediendo a efectuar una comparación de los mismos dependiendo del sistema de refrigeración utilizado. Finalmente se procede a desarrollar un modelo de predicción numérico con objeto de comprobar la sintonía entre los resultados teóricos a obtener y los obtenidos.
- Conclusiones y líneas futuras: Se desarrollan los principales resultados obtenidos durante la realización de los diferentes ensayos, proponiéndose finalmente una serie de futuras líneas de aplicación del diseño obtenido que pudieran determinar la creación de una posible línea de investigación sobre el mismo.

1.4 Teoría aplicada

En el siguiente apartado se procederá a explicar ciertos conocimientos de teoría básicos necesarios para interpretar qué ocurre en los ensayos realizados. Se desarrollará dicho contenido teórico de forma sencilla y aplicada para que todo tipo de lector sea capaz de identificar qué ocurre en el sistema y a qué se debe.

1.4.1 Sistema Termodinámico

Se entiende como termodinámica al estudio de cualquier proceso el cual implique intercambio de energía. Explica, de forma racional, el funcionamiento de la mayoría de las máquinas y dispositivos, desempeñando un papel importante en el desarrollo, gracias a la eficiencia y aprovechamiento de los recursos energéticos y optimización de aquellos procesos que suponen transformación en energía utilizable. Las leyes o principios que se enunciarán posteriormente son aceptados ya que no se ha conseguido encontrar ningún sistema o proceso físico que los contradiga, y por lo tanto, no se ha podido demostrar la invalidez de dichas leyes o principios [9] [10].

Para una correcta ciencia experimental se comienza eligiendo una parte acotada o porción limitada del mundo físico o materia, conociéndose como sistema, la cual se aísla de forma imaginaria de todo lo que le rodea, siendo esta entidad objeto de estudio, con existencia propia en el espacio y en el tiempo.

Conceptualmente y asociado al sistema encontramos:

- **SISTEMA:** Cantidad de materia contenido en un límite fijado.
- **FRONTERA o LÍMITE:** Rodea al sistema y supone la zona límite establecida para calcular las interacciones con el entorno.
- **ENTORNO o AMBIENTE:** Cantidad de materia fuera del límite del sistema y que puede llegar a interactuar con él.

A su vez, los sistemas se clasifican de tres formas dependiendo si la materia y energía pueden o no cruzar los límites del sistema:

- **SISTEMAS ABIERTOS:** La materia es capaz de cruzar la frontera o límite así como la energía.
- **SISTEMAS CERRADOS:** La materia no es capaz de cruzar la frontera o límite. Sólo cruza la energía.
- **SISTEMAS AISLADOS:** No puede haber intercambios entre sistema/ambiente de ningún tipo.

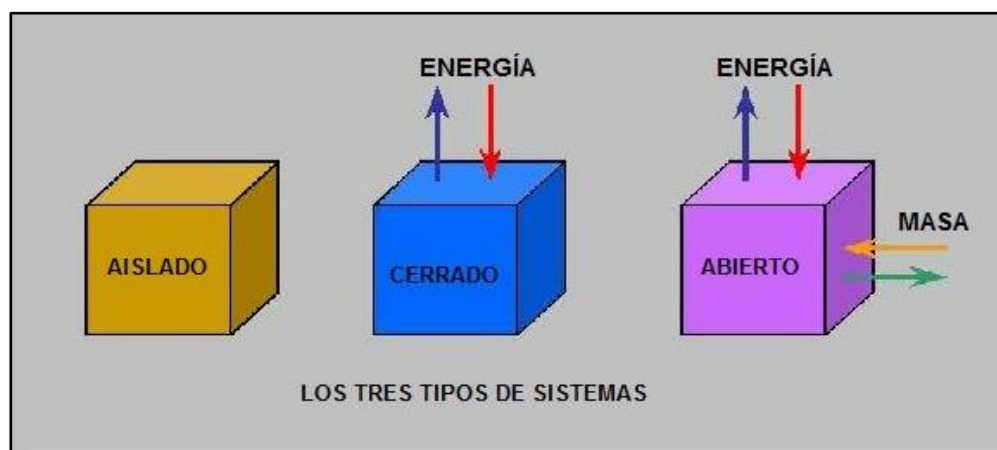


Figura 1-1 Sistemas aislados, cerrados y abiertos [10].

1.4.2 Equilibrio Termodinámico

Se define como equilibrio termodinámico cuando un sistema no experimenta de forma espontánea ningún cambio que modifique el valor de sus coordenadas termodinámicas. Por lo tanto:

- La presión deberá ser la misma en todos los puntos del sistema (equilibrio mecánico).
- La composición no varía con el tiempo (equilibrio químico).
- La temperatura es la misma en todos los puntos del sistema (equilibrio térmico).

Por lo tanto, cuando las coordenadas macroscópicas del sistema tengan valores definidos permaneciendo constantes mientras no cambian las condiciones del ambiente diremos que nos encontramos ante un sistema en equilibrio termodinámico.

1.4.3 Procesos reversibles e irreversibles

Se denominará proceso reversible a aquel en el que el sistema evoluciona entre dos estados de equilibrio inicial y final pasando siempre por estados intermedios también de equilibrio. Ocurre de una manera tal que tanto el medio ambiente como el sistema puedan ser devueltos a sus estados originales.

A su vez, se denominará proceso irreversible a aquel en el que en la evolución del sistema sucede de inicio a final pasando por estados intermedios que no son de equilibrio o no satisfacen las condiciones anteriormente citadas. Es de aplicación saber que un proceso irreversible significa siempre una degradación (por ejemplo debido a efectos de rozamiento) de un potencial energético sin producir la máxima cantidad de trabajo. Por lo tanto, se podrá concluir que un proceso es irreversible al verificarse con una velocidad grande en comparación con la velocidad que ocurre el ajuste molecular del sistema.

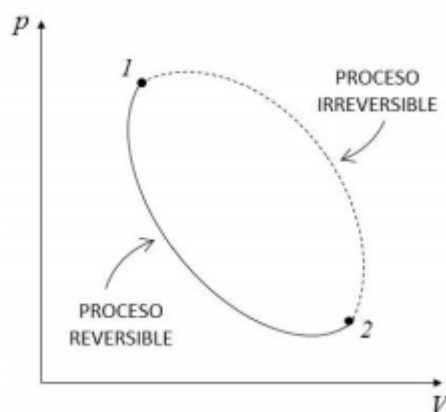


Figura 1-2 Representación de un proceso irreversible y otro reversible entre los estados 1 y 2 [9].

1.4.4 Calor

Se definirá calor como la transferencia de energía ocurrida entre el sistema y el ambiente en forma de diferencia de temperatura, observable en la frontera entre el sistema y el ambiente. Un proceso durante el cual no se realiza transferencia de calor se considerará adiabático.

La ecuación de dimensiones del SI [11] del calor, al ser una forma de energía (denotada por Q) tendrá la siguiente expresión, siendo M (Masa), L (Longitud) y T (Tiempo):

$$[Q] = L^2MT^{-2}$$

Ecuación 1-1 Expresión dimensional del calor [9].

La unidad del calor en el SI será el Julio (J). Sin embargo, existe una unidad de calor definida prácticamente en función del cambio de temperatura asociado a un determinado aporte energético, conocida como la caloría (cal). Se define caloría como la cantidad de calor (energía) necesaria para aumentar la temperatura de 1 g de agua desde 14.5 °C a 15.5 °C a la presión de 1 atmósfera ($1 cal = 4.185 J$). A pesar de todo, se debe utilizar el Sistema Internacional de unidades ya que el calor, como energía, debe medirse en Julios.

1.4.5 Capacidad Calorífica

Experimentalmente se comprueba que para un sistema a una temperatura dada, se necesita una cantidad de calor específica para elevar su temperatura desde T hasta $T + dT$ proporcional a la masa del sistema y a la variación de su temperatura dT .

Si se supone que durante el proceso no varía la masa del sistema se observa:

A presión constante:

$$\delta Q = mc_p dT$$

Ecuación 1-2 Cálculo del calor en función del calor específico a presión cte. [10].

A volumen constante:

$$\delta Q = mc_v dT$$

Ecuación 1-3 Cálculo del calor en función del calor específico a volumen cte. [10].

En la Ecuación 1-2 y Ecuación 1-3 c_p y c_v reciben el nombre de capacidad calorífica específica o calor específico del sistema ($\frac{J}{kg \cdot K}$) a presión constante y volumen constante respectivamente. En el caso de que la masa sea sustituida por el número de moles (n), hablaríamos de calor específico molar ($\frac{J}{mol \cdot K}$).

Al producto de la masa por el coeficiente de capacidad calorífica específica o calor específico, recibe el nombre de capacidad calorífica del sistema, por lo que las fórmulas anteriores podrían sobre escribirse en función de:

$$C_p = mc_p \text{ ó } C_v = mc_v$$

Ecuación 1-4 Capacidad calorífica a presión y volumen cte.

Siendo C_p y C_v las capacidades caloríficas del sistema a presión constante y a volumen constante respectivamente, siendo la unidad de medida (JK^{-1}) en el SI [11].

1.4.6 Principio cero de la termodinámica

El principio cero de la termodinámica establece que dos o más sistemas en equilibrio termodinámico están en equilibrio térmico cuando puestos en contacto, los valores de sus coordenadas de equilibrio no se modifican. Dicho de otra forma, si dos sistemas están, por separado en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.

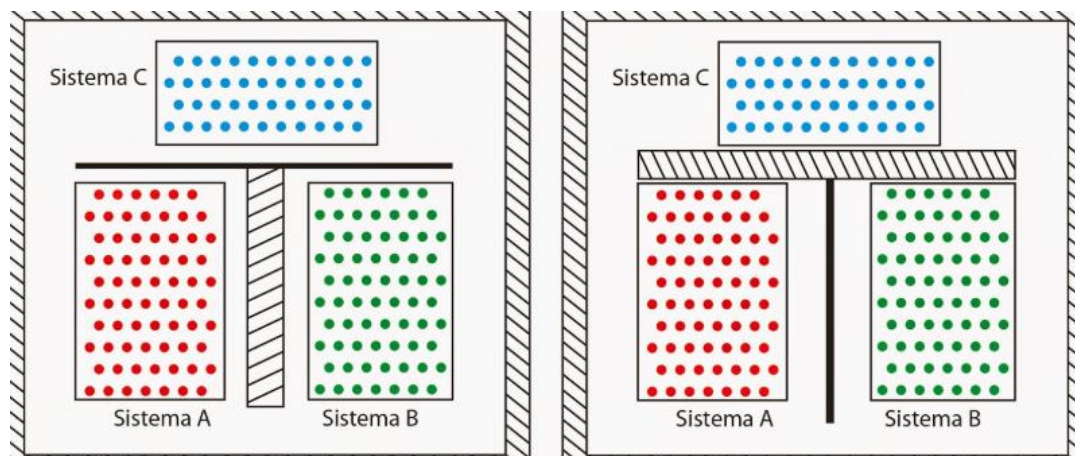


Figura 1-3 Explicación principio cero de la termodinámica [12].

Como se puede observar en la Figura 1-3 (derecha), cuando dos sistemas A y B se ponen en contacto real o se separan por una lámina metálica (pared diatérmica), transcurrido cierto tiempo, alcanzan el equilibrio térmico, es decir, si observamos sus coordenadas de estado, pasado este tiempo, no cambian de valor.

Sin embargo, observando la Figura 1-3 (izquierda), si los sistemas A y B separadamente están en equilibrio térmico con otro sistema C, están en equilibrio térmico entre sí. Esto es, en general, dos sistemas térmicos en equilibrio con un tercero, están en equilibrio entre sí.

1.4.7 Primer principio de la Termodinámica

Primeramente, estableceremos como criterios de signos para los intercambios de energía, en forma de calor y trabajo, entre el sistema y su entorno, los definidos según la Unión Internacional de Química pura y aplicada (IUPAC) y recomendados por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME):

- El trabajo (W) realizado por el sistema tendrá signo negativo, mientras que el trabajo realizado sobre el sistema tendrá signo positivo.
- El calor (Q) aportado al sistema tendrá signo positivo, sin embargo el calor entregado por el sistema al exterior tendrá signo negativo.

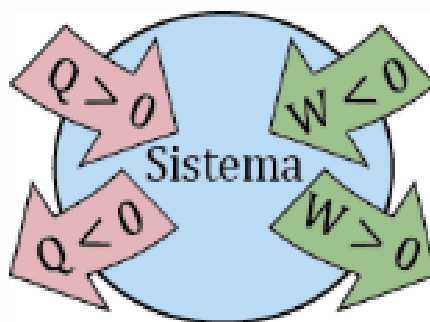


Figura 1-4 Convenio de signos aprobados por la IUPAC y recomendados por la ASME [13].

Entendiendo pues el criterio de signos adoptado, se define que un sistema se relaciona con el entorno variando su energía interna, siendo esta variación a su vez un intercambio de energía en forma de calor (Q) y trabajo (W). Por lo tanto, el primer principio de la termodinámica establece:

$$\Delta U_{\text{interna}} = Q - W$$

Ecuación 1-5 Primer principio de la termodinámica [9].

Suponiendo un sistema sin capacidad de evolucionar de un estado “A” a otro “B” realizando trabajo ($W = 0$), se observa que la Ecuación 1-5 queda de la forma ($\Delta U_{\text{interna}} = Q$), observando que el calor es una forma de fluir la energía a través de las paredes del sistema.

Así mismo, si el sistema es aislado (1.4.1) ($\Delta U_{\text{interna}} = 0$) y equivale a un sistema cíclico que se repite, observando entonces que ($Q = W$). Por lo tanto, la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma.

1.4.8 Segundo principio de la Termodinámica

El primer principio de la termodinámica (1.4.7) no es suficiente para definir si los procesos son posibles o imposibles, por lo que se define el segundo principio creando una condición adicional a los procesos termodinámicos. Por ejemplo, según el primer principio, el motor de un barco podría tomar el calor del mar para moverlo, hecho que se conoce que es completamente imposible. Esta imposibilidad viene expresada por dos enunciados equivalentes.

1.4.8.1 Máquinas Térmicas

Para un mejor entendimiento del segundo principio, se definirán brevemente las máquinas térmicas así como su funcionamiento.

Una máquina térmica es un conjunto de elementos que opera de forma cíclica o continua produciendo trabajo al mismo tiempo que absorbe y cede calor. Para conseguir este proceso, el sistema trabaja utilizando las expansiones de un gas y sus transformaciones de temperatura, presión y volumen. Es necesario realizar una serie de hipótesis para conseguir realizar cálculos:

- Se trabaja con gases ideales en el interior de la máquina.
- El proceso realizado es cíclico, y en el final e inicio el gas tendrá el mismo estado.
- Se analiza un volumen fijo. Será siempre el mismo gas en cantidad el que se calienta, enfría o produce trabajo.

De esta forma, las máquinas térmicas se representarán de la siguiente forma dependiendo del sentido de trabajo, comprobando en la Figura 1-5 a la izquierda, el funcionamiento de un ciclo de potencia como podría ser el de un motor, y a la derecha, el funcionamiento de un frigorífico o bomba de calor. A continuación se citan también las fórmulas asociadas a cada proceso.

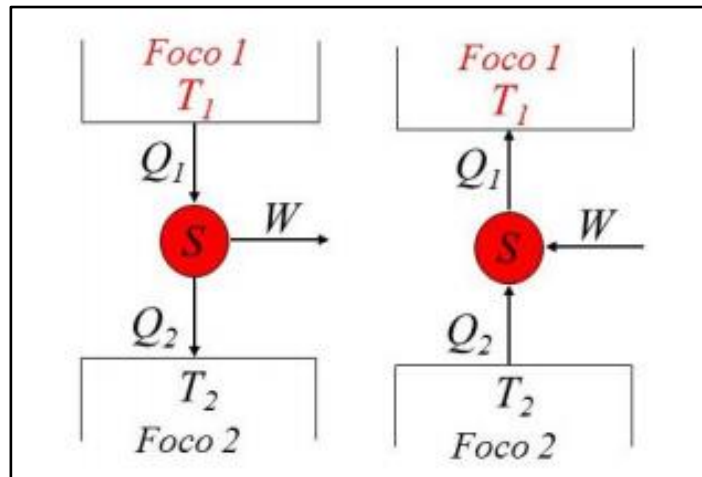


Figura 1-5 Representación de máquinas térmicas según sentido de trabajo [9].

$$\varepsilon = \frac{\text{efecto deseado}}{\text{energía consumida}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

Ecuación 1-6 Rendimiento del ciclo de potencia [10].

$$\gamma = \frac{\text{efecto deseado}}{\text{energía consumida}} = \frac{Q_c}{W_{\text{ciclo}}} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_f}$$

Ecuación 1-7 Coeficiente de operación de las bombas de calor [10].

$$\beta = \frac{\text{efecto deseado}}{\text{energía consumida}} = \frac{Q_f}{W_{\text{ciclo}}} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f}$$

Ecuación 1-8 Coeficiente de operación de los ciclos de refrigeración [10].

1.4.8.2 Enunciado de Clausius

Clausius expone que no es posible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura. Es decir, no se puede realizar un intercambio de calor de un cuerpo más frío a otro más caliente sin realizar trabajo.



Figura 1-6 Enunciado de Clausius [14].

1.4.8.3 Enunciado de Kelvin-Planck

Kelvin-Planck cita que es imposible realizar un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor procedente de un foco y la conversión de este calor en trabajo. Es decir, siempre habrá una pérdida del sistema en forma de calor.

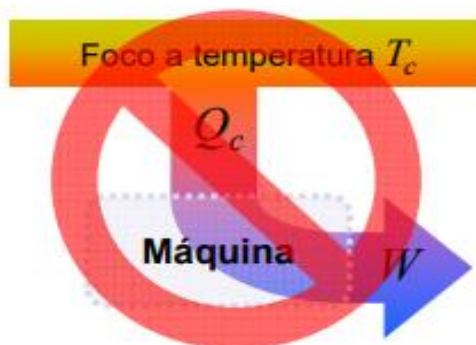


Figura 1-7 Enunciado de Kelvin-Planck [14].

1.4.8.4 Teorema de Carnot

Carnot cita que ninguna máquina térmica que funcione entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible (máquina de Carnot) que opere entre esos mismos focos.

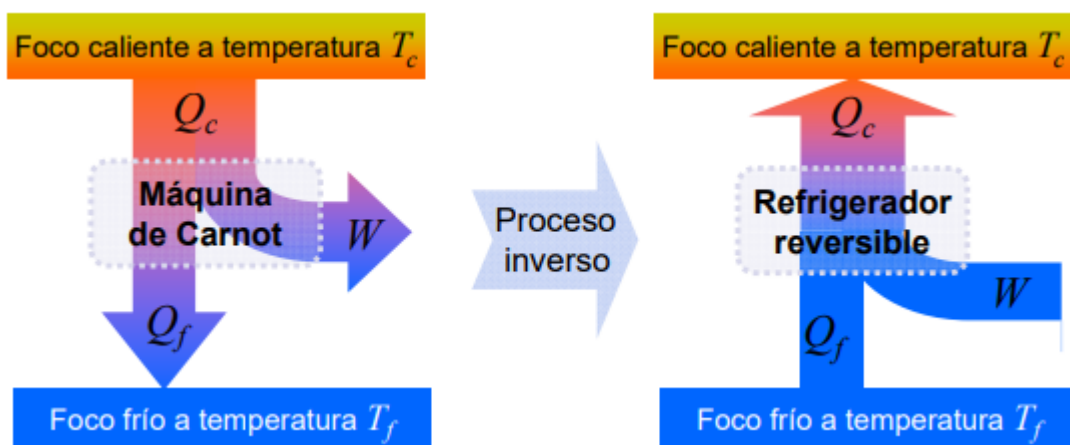


Figura 1-8 Explicación del Teorema de Carnot [14].

Estableciendo finalmente que:

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{|W|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

Ecuación 1-9 Rendimiento del ciclo de Carnot [14].

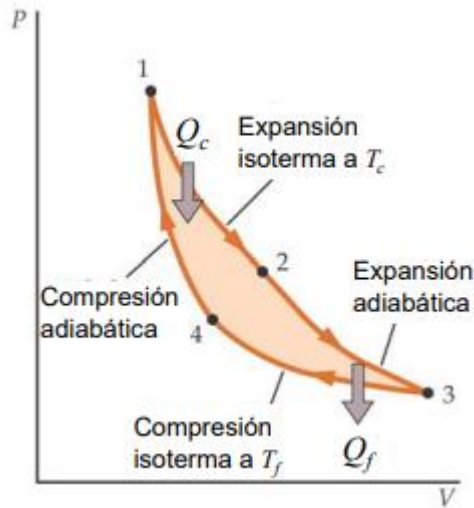


Figura 1-9 Representación gráfica del ciclo de Carnot en una gráfica P-V [9].

Como se puede observar en la Figura 1-9, el ciclo de Carnot consta de 4 procesos:

- Tramo 1-2: Expansión isotérmica a temperatura T_c (no hay cambio de energía interna).
- Tramo 2-3: Expansión adiabática (no se produce transferencia de calor).
- Tramo 3-4: Compresión isotérmica a temperatura T_f (no hay cambio de energía interna).
- Tramo 4-1: Compresión adiabática (no se produce transferencia de calor).

1.4.9 Cambio de fase y calor latente

Se conoce como cambio de fase, al fenómeno ocurrido cuando se produce una transferencia de energía entre una sustancia y su entorno, pero no se experimenta un cambio de temperatura en dicha sustancia. Dos cambios de fase comunes son de sólido a líquido, conocido como fusión, y de líquido a gas, conocido como ebullición.

Previamente, para entender matemáticamente dicho proceso, se definirá el concepto de calor latente. Este calor latente se conoce como la energía que necesita dicha sustancia para realizar el cambio de fase. Este valor dependerá de las propiedades de la sustancia así como de la naturaleza del cambio de fase.

Encontramos pues, definiendo el calor como nuestro mecanismo de transferencia de energía, que la energía necesaria para cambiar la fase de una masa m dada de una sustancia pura, siendo L el calor latente medido en $(\frac{J}{mol} \text{ ó } \frac{J}{kg} \text{ ó } \frac{J}{g})$:

$$Q = mL$$

Ecuación 1-10 Energía necesaria para realizar el cambio de fase [12].

1.4.10 Transferencia de Calor

La transferencia de calor es el proceso por el cual suceden fenómenos cotidianos tales como sentir calor cuando encendemos una chimenea o cuando nos ponemos un termómetro y mide la temperatura.

Esta igualación de temperaturas, fundamentalmente se van a realizar de tres formas (conducción, convección y radiación) desarrollándose a continuación [15].

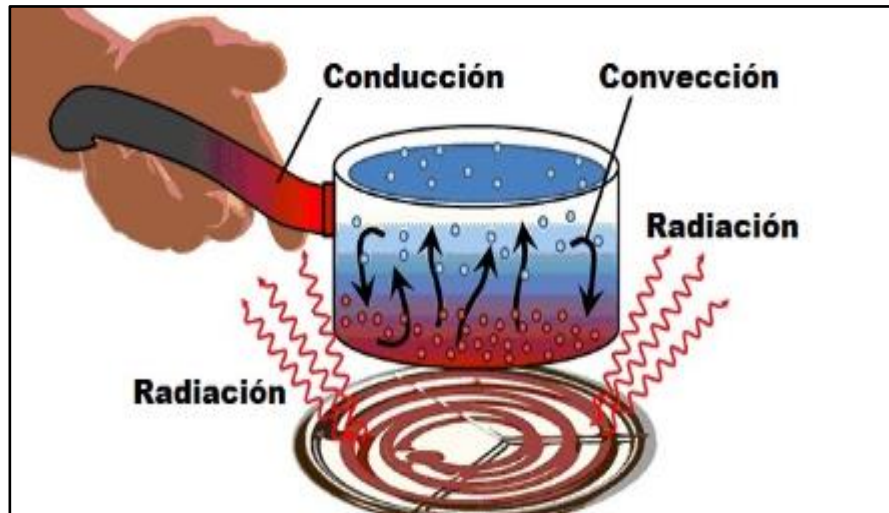


Figura 1-10 Transferencia de calor por conducción, convección y radiación [16].

1.4.10.1 Transferencia de Calor por Conducción

La transferencia de calor por conducción se basa en el movimiento de átomos y moléculas. Cuando se ponen en contacto directo dos cuerpos con distinta temperatura, implica que las moléculas y partículas de cada elemento llevan asociadas distintas energías. Las más calientes tendrán más energía, interactuando con las más frías y con menos energía, produciendo choques y acoplamientos entre las partículas y conllevando a un aumento de la energía térmica y por lo tanto de la temperatura hasta que se igualen ambos cuerpos.

Este fenómeno se produce aunque no haya un movimiento macroscópico de las partículas o los cuerpos sean transparentes a la radiación. Sobre todo, resulta de mucha importancia en los sólidos, pero no tanto en los fluidos debido a la intervención de otros mecanismos de transferencia de calor como es la convección, quedando prácticamente la transferencia de calor por conducción reducida al mínimo.

Para un volumen de espesor Δx (m), área de sección transversal A (m^2), y caras opuestas a distintas temperaturas T_1 y T_2 ($^{\circ}C$) siendo $T_2 > T_1$, se produce una transferencia de calor ΔQ durante un tiempo Δt , desde el foco caliente al frío. Definiendo H (Wattios) como la transferencia de calor durante un incremento de tiempo, según la Ley de Fourier obtenemos la expresión, indicando el signo negativo que se produce en la dirección decreciente de temperatura:

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 1-11 Ley de Fourier de la conducción [15].

Como se ha podido observar, aparece un nuevo concepto en la fórmula representado como k y denominado conductividad térmica k ($\frac{W}{mK}$).

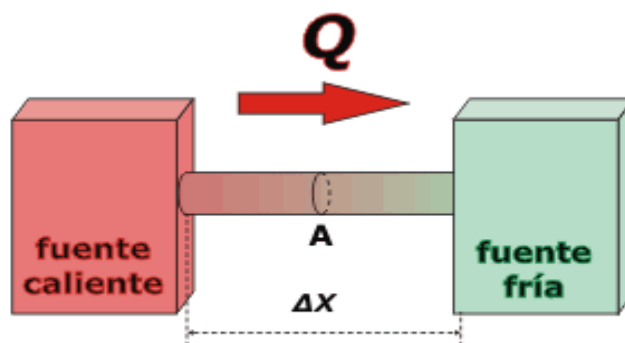


Figura 1-11 Transferencia de calor por conducción [17].

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de los materiales, representando la capacidad que tiene dicho material de conducir el calor. A mayor conductividad térmica se obtendrá por lo tanto una mejor conducción de calor.

1.4.10.2 Transferencia de Calor por Convección

En la transferencia del calor por convección, se produce un movimiento físico de moléculas con una temperatura mayor a zonas con una temperatura menor y viceversa, equilibrándose finalmente las temperaturas. Sobre todo, este tipo de transferencia tiene mucha importancia en fluidos.

Este tipo de transferencia puede ser forzada cuando se ayuda o es forzada por algún elemento para realizar el proceso, o natural, cuando únicamente se produce debido a una diferencia de temperaturas causando una diferencia de densidades.

Un modelo de transferencia de calor por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es aquel en el cual se define H (Wattios) como la transferencia de calor durante un incremento de tiempo, para una superficie A (m^2) entregando calor con una temperatura T_a (K) al fluido adyacente, el cual se encuentra a una temperatura T_f (K), denominándose h al coeficiente de convección.

El coeficiente de convección h ($\frac{W}{m^2K}$), depende entre otros factores la naturaleza del fluido, geometría del contacto y de las propiedades del fluido.

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = hA(T_a - T_f)$$

Ecuación 1-12 Ley de Enfriamiento de Newton [15].

El flujo de convección será positivo si la superficie está a mayor temperatura que el fluido, y con signo negativo al estar el fluido a más temperatura que la superficie.

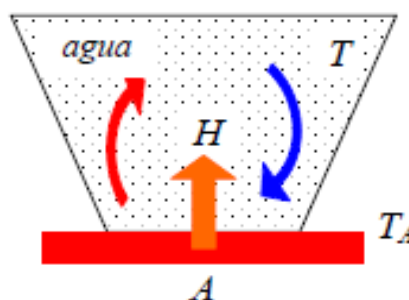


Figura 1-12 Ejemplo Transferencia de Calor por Convección [17].

1.4.10.3 Transferencia de Calor por Radiación

Se define radiación térmica a la energía emitida por la materia al encontrarse a una temperatura dada, produciéndose directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones, sin requerir contacto directo entre cuerpos. Este tipo de energía se produce debido a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, y transportada mediante ondas electromagnéticas o fotones, por eso el nombre de radiación electromagnética, transmitiéndose a la velocidad de la luz (luz de distintas longitudes de onda).

Esta radiación puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura. A diferencia de la conducción o convección, o de otros tipos de onda tales como el sonido, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, siendo la única en poder propagarse en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección sí se ven afectadas por la presencia de materia, por eso estas ondas pueden atravesar el espacio y llegar a la Tierra desde el Sol.

Previamente se definirá como cuerpo negro a un objeto o sistema el cual absorbe toda la radiación incidente sobre él, y re-irradia energía que es sólo característica de este sistema radiante, no dependiendo del tipo de radiación que incide sobre ella.

Según la Ley de Stefan-Boltzmann, la energía radiada por un cuerpo por segundo por unidad de superficie, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, y está dada por:

$$Q_{\text{radiado}} = \sigma A_s (T_r^4 - T_f^4)$$

Ecuación 1-13 Ley de Stefan-Boltzmann [15].

Siendo Q (*Wattios*) la transferencia de calor durante un incremento de tiempo por radiación, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$ Constante de Stefan-Boltzmann, A (m^2) superficie que radia, y temperatura del cuerpo que radia T_r^4 y del entorno T_f^4 , ambos en K . Realmente la Ecuación 1-13 está siendo aplicada directamente a cuerpos reales, multiplicando la expresión anterior por el coeficiente ε (emisividad del cuerpo siendo $\varepsilon = 1$ para cuerpos reales).

Si el cuerpo que radia tiene mayor temperatura que el medio, el cuerpo transferirá calor al medio, y si el cuerpo tiene menor temperatura, absorberá calor en forma de radiación del medio.

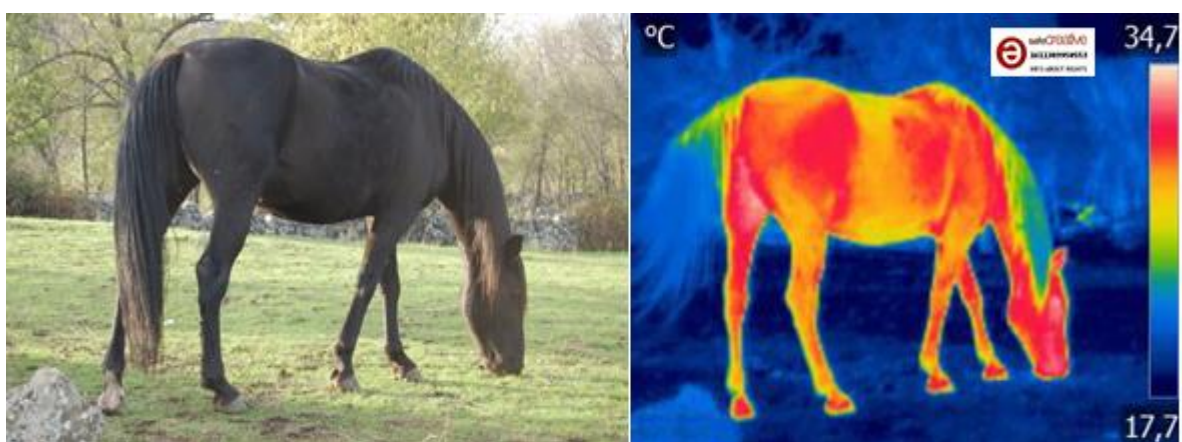


Figura 1-13 Ejemplo de radiación térmica producida por un caballo [18].

1.4.11 Ley de los Gases Ideales

La materia se encuentra generalmente en tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Con objeto de llegar a comprender las variantes de los estados en los que la materia es sometida, es necesario estudiar y comprender entre otras cosas la ley de los gases ideales.

Se define gas ideal a aquel donde las colisiones entre átomos o moléculas son totalmente elásticas, y se carece de fuerzas atractivas a nivel intermolecular. El proceso es similar a considerar esferas rígidas viajando en el espacio y colisionando con otras sin aparente interacción ninguna. Debido a este choque se crea una forma de energía, derivando a cambios de temperatura.

Esta ley deriva de otras leyes tales como la ley de Boyle, ley de Charles o ley de Avogadro, e indica que para asignar una masa gaseosa, se debe asegurar previamente la existencia de una constante directamente proporcional a la presión y el volumen del gas e inversamente proporcional a su temperatura.

Para un mejor entendimiento, se definirán previamente el resto de fórmulas para derivar a la ley general de los gases ideales.

1.4.11.1 Ley de Boyle

La ley de Boyle indica que si un gas ideal mantiene su temperatura constante, la presión del gas es inversamente proporcional al volumen que ocupa dicho gas, conocido también como la ley de Boyle y Mariotte, de esta forma:

$$p_a V_a = p_b V_b = f(T)$$

Ecuación 1-14 Ley de Boyle [19].

1.4.11.2 Ley de Charles

La ley de Charles, o conocida también como la ley de Charles y Gay-Lussac, indica que a presión constante, el volumen que ocuparía un gas es directamente proporcional a la variación de temperatura del mismo, es decir, la temperatura varía linealmente con el volumen que ocupa, de esta forma:

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{T_b}{T_a}$$

Ecuación 1-15 Ley de Charles [19].

1.4.11.3 Ley de Gay-Lussac

La ley de Gay-Lussac, relaciona presiones y temperaturas, llegando a la conclusión de que a volumen constante, la presión a la que estará sometido el gas es directamente proporcional a la variación de temperatura del mismo, es decir, la temperatura varía linealmente con la presión, de la forma:

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{T_b}{T_a}$$

Ecuación 1-16 Ley de Gay-Lussac [19].

1.4.11.4 Ley de Avogadro

Esta ley describe el comportamiento de un gas, y corresponde a la observación de Avogadro tal que a una temperatura y presión dadas, el número de moléculas en un volumen determinado de cualquier gas es constante. De esta forma se concluye que el número de moléculas o moles de un gas es proporcional al volumen del gas, de esta forma, considerando k como la constante de proporcionalidad:

$$n = kV$$

Ecuación 1-17 Ley de Avogadro [19].

1.4.11.5 Ecuación de Estado de los Gases Ideales

Considerando que la masa permanece constante, y juntando las leyes de Charles y Boyle, se obtiene una expresión de la siguiente forma:

$$\frac{p_a V_a}{T_a} = \frac{p_b V_b}{T_b}$$

Ecuación 1-18 General de los gases ideales [19].

Se observa que la expresión anterior podría representarse como:

$$\frac{pV}{T} = k$$

Ecuación 1-19 Propiedad ecuación general [19].

Siendo k una constante específica para cada muestra de gas y que no depende de la presión, volumen y temperatura. El primer miembro de la Ecuación 1-19, es conocido por ser una cantidad extensiva dependiente de la masa y proporcional a ella, por lo tanto el segundo miembro también debe serlo. Así, el coeficiente k :

$$k = mR_m$$

Ecuación 1-20 Dependencia de la masa y coeficiente aplicado para cada gas [19].

Finalmente, la forma común de la ecuación de estado queda en función del número de moles n (mol) y de la constante universal de los gases ideales R ($\frac{atm \cdot L}{K \cdot mol}$) siendo $R \approx 0.082$, en unidades internacionales $R = 8.31$ ($\frac{J}{K \cdot mol}$).

$$PV = nRT$$

Ecuación 1-21 De estado de los gases ideales [19].

Actualmente, las leyes anteriores de los gases (1.4.11.1 y 1.4.11.2) son consideradas condiciones especiales de la ecuación del gas ideal, con una o más de las variables sostenidas constantes.

1.4.12 Ecuación de Estado para Gases Reales

Un gas real se define como aquel que posee un comportamiento termodinámico el cual no sigue la ecuación de estado de los gases ideales (Ecuación 1-21). Este gas, se considerará real si tiene valores de densidad muy grande, sometido a elevadas presiones y bajas temperaturas.

La diferencia principal entre los gases ideales y los gases reales es, que los gases reales, a diferencia de los ideales, no se pueden comprimir indefinidamente, y por lo tanto, no cumplen con la hipótesis de los gases ideales. Esto es debido a que el gas real experimenta diversos comportamientos en las moléculas dependiendo de la presión sometida y temperatura asociada así como el tipo de gas utilizado, siendo más compresibles a bajas presiones que un gas ideal, pero menos compresibles con valores de presión mayores.

Van der Waals, crearía la ley de los gases reales en 1873, tomando su propio nombre, y siendo el autor ganador de un premio Nobel en 1910 por la formulación de ésta ley. La ley de Van der Waals describe el comportamiento de los gases reales, considerándose una mejora de la ecuación de los gases ideales, permitiendo su estudio y descripción del estado gaseoso para presiones altas y próximas al punto de ebullición.

El físico holandés, introduciría dos coeficientes (a y b), conocidos como las constantes de Van der Waals, los cuales dependen de la sustancia susceptible de estudio en cada caso, recogidos en tablas para los gases más comunes.

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

Ecuación 1-22 Ley de los gases reales de Van der Waals [20].

Dónde:

- P = Presión del gas (atm).
- V = Volumen del gas (l).
- n = Número de moles de gas (mol).
- a y b = constante de gases ($\frac{l^2 atm}{mol^2}$), ($\frac{l}{mol}$).
- T = Temperatura del gas (K).
- R = Constante de los gases ($\frac{atm L}{K mol}$).

El modelo de Van der Waals y el de los gases puede concluirse que no difieren mucho cuando la presión de un gas no es demasiado alta. Es por ello que esta fórmula no se aplica en los cálculos posteriores debido a las bajas presiones en las que se opera durante la experimentación.

1.4.13 Mezcla de Gases

El estudio de los gases ideales y sus ecuaciones es tan importante como el estudio de la mezcla de gases. El aire seco es un ejemplo de composición de distintas clases, entre los que se encuentran nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono. También, la mezcla de gases es altamente importante en la industria, permitiendo procesos de combustión entre otros [21] [22].

Antes de comenzar a nombrar las ecuaciones que rigen la mezcla de gases, se deberán definir e introducir algunas nociones de importancia:

- Fracción gravimétrica de un gas (G_i): Es el porcentaje o fracción en masa de cada componente respecto a la masa total de la mezcla.

$$G_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \text{ siendo } \sum m_i = m_1 + m_2 \dots$$

Ecuación 1-23 Fracción gravimétrica de un gas [21] .

- Composición volumétrica de un gas (X_i): Es el porcentaje o fracción en volumen de cada componente respecto al volumen total de la mezcla.

$$X_i = \frac{V_i}{\sum V_i} \text{ siendo } \sum V_i = V_1 + V_2 \dots$$

Ecuación 1-24 Fracción volumétrica de un gas [21].

- Peso molecular de una mezcla (M): Media ponderada de todos los componentes.

$$x_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \text{ siendo } \sum n_i = n_1 + n_2 \dots$$

Ecuación 1-25 Fracción molar de un gas [21].

$$M = \frac{\sum n_i m_i}{\sum n_i} = \sum x_i m_i \left(\frac{kg}{kmol} \right)$$

Ecuación 1-26 Peso molecular de una mezcla de gases [21].

1.4.13.1 Ley de Amagat o ley de los volúmenes parciales aditivos

La ley de Amagat o ley de los volúmenes parciales cita que el volumen total de una mezcla de gases ideales es igual a la suma de los volúmenes que ocuparía cada gas, si cada uno de ellos se encontrase a la presión de la mezcla y a la temperatura de la mezcla.

Es por ello que si se tiene:

$$V_i = \frac{n_i RT}{P}$$

Ecuación 1-27 Volumen del gas i.

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Ecuación 1-28 Volumen total de la mezcla.

De la Ecuación 1-27 y Ecuación 1-28, se obtiene:

$$x_i = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n}$$

Ecuación 1-29 Demostración de la Ley de Amagat [21].

1.4.13.2 Ley de Dalton o ley de las presiones parciales aditivas

La regla de Dalton establece que la suma de las presiones parciales de los componentes es igual a la presión de toda la mezcla.

La regla de Dalton no es una ley termodinámica, así como la ley de Amagat, y por ello no es aplicable a todas las mezclas. Sin embargo, cuando se utilizan gases ideales, obteniendo de la mezcla a la vez un gas ideal, es exacta, siguiendo la misma demostración que la citada con la ley de Amagat, obteniéndose:

$$x_i = \frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n}$$

Ecuación 1-30 Demostración de la Ley de Dalton [21].

1.4.13.3 Propiedades extensivas: Ley de Gibbs

La ley de Gibbs permite calcular las propiedades de las mezclas de gases. Para mezclas que cumplen la ley de Dalton y de Amagat, la entropía, entalpía y energía de una mezcla son iguales a las sumas de las entropías, entalpías y energías de los respectivos componentes individuales.

Como ejemplo y análogo a los otros dos casos se muestra la entropía de una mezcla:

$$S = \sum S_i = \sum m_i s_i \text{ siendo } s = \frac{S}{m}$$

Ecuación 1-31 Aplicación de la Ley de Gibbs [21].

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Definición del Problema

Estamos inmersos en una sociedad la cual actualmente, como ya predijo Moore, aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un microprocesador. Esto conlleva a un avance tecnológico el cual debe adaptarse y actualizarse continuamente, permitiendo entre otros aspectos, una refrigeración eficiente de dichos componentes para un correcto funcionamiento. Esta tecnología de refrigeración por inmersión y cambio de fase está realizándose, entre otros campos, en la automoción, energía eólica, aplicaciones militares, superordenadores HPC, sanidad, así como en dispositivos particulares tales como móviles.

La refrigeración por aire de los centros de datos es ineficiente debido a la gran cantidad de procesadores en un solo equipo. Este método de refrigeración por aire tradicional es sabido que no es tan eficiente como el enfriamiento por líquido debido a su baja capacidad de carga de calor. Aunque no es evidente de inmediato, casi todos los centros de datos se enfrían indirectamente con líquido hoy en día, realizándose ya ciertos proyectos y aplicaciones como las comentadas anteriormente por cambio de fase.

Entre algunos de los problemas que plantea la refrigeración tradicional por aire, podemos encontrar la dificultad de operación, precio de los refrigerantes, ineficiencia del sistema, dificultad de conseguir producir aire lo suficientemente frío como para enfriar los servidores, así como el esfuerzo considerable a realizar para mover el aire a través de los servidores y de los ventiladores. Se observa a primera vista que el uso de refrigeración líquida y con cambio de fase aporta ganancias evidentes, entre otras, eliminando las resistencias térmicas intermedias y reducción del ruido.

Para un mejor entendimiento de los sistemas de refrigeración, se dividirán éstos en sistemas de refrigeración por aire y sistemas de refrigeración por líquido tal y como se presenta en la Figura 2-1. A su vez, subdividiremos la refrigeración por aire en natural, si no se emplea ningún elemento externo al sistema, o forzada. La refrigeración por líquido a su vez, aunque se puede subdividir en diversos campos y según el tipo de fluido a utilizar (agua, Novec, inmersión o no inmersión), en el presente trabajo se realizará un estudio de los tres principales sistemas de refrigeración por líquido, siendo éstos: CoolIt, dos fases en inmersión y una fase en inmersión con aceite.

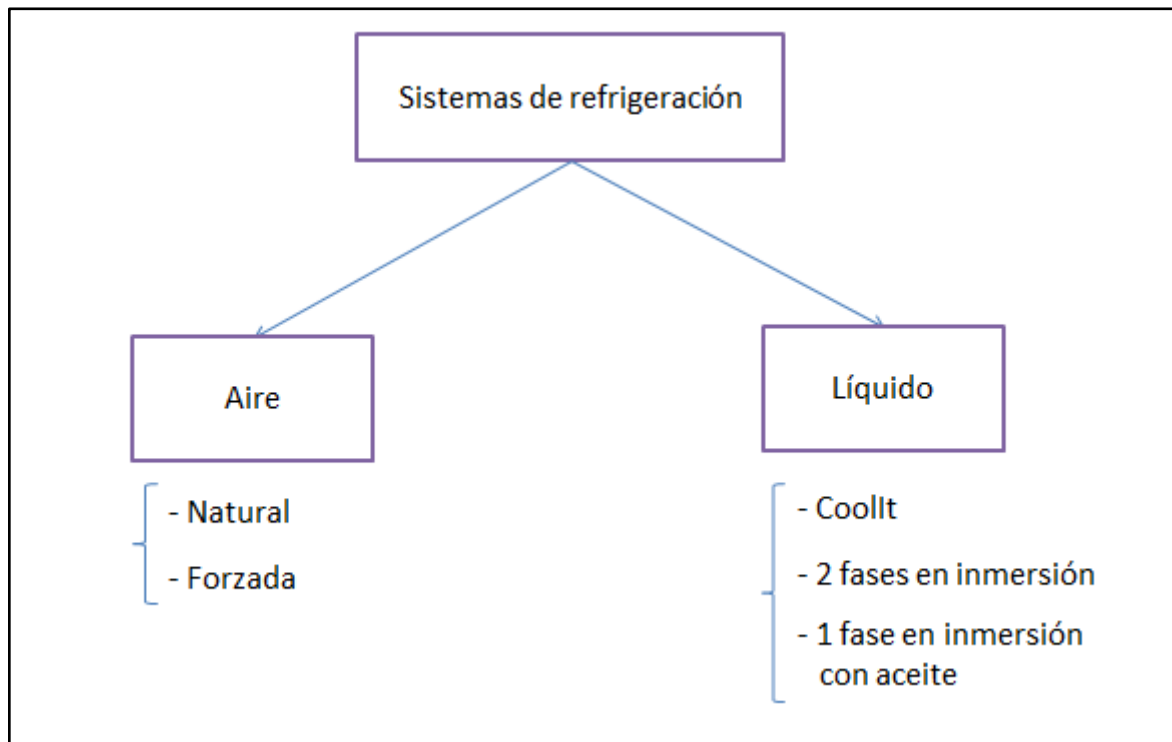


Figura 2-1 Esquema de los sistemas de refrigeración principales.

2.2 Refrigeración por aire

Uno de los métodos empleados como refrigeración en dispositivos electrónicos son los sistemas de refrigeración mediante aire. Generalmente desplazan el aire caliente que envuelven los componentes electrónicos, de forma que así se evita los calentamientos de éstos circulando aire a menor temperatura. Esta circulación de aire se puede conseguir de forma natural o forzada. Se considerará de forma natural cuando se logra mediante un disipador de calor sin ningún elemento que provoque o fuerce el movimiento del aire para producir dicha disipación de calor.

Un disipador de calor es un elemento el cual extrae el calor del componente a refrigerar y lo evacúa al exterior (véase Figura 2-2). Se utiliza para ello una conducción de calor a través del mismo (Ecuación 1-11), por lo que se suelen fabricar de aluminio debido a la ligereza que aporta, así como de cobre, el cual es un mejor conductor térmico. Además, el disipador aumenta la superficie de intercambio por convección (Ecuación 1-12) mediante el uso de aletas, permitiendo una mejor disipación. La tendencia actual es utilizar disipadores con menos peso y capacidad y con suficiencia para la transferencia de calor al exterior [23].

En los ordenadores y dispositivos electrónicos, los disipadores se utilizan intensivamente, como por ejemplo en tarjetas gráficas o en microprocesadores, para evacuar el calor procedente de la conmutación de los transistores. Sin embargo, en ocasiones el calor generado en los componentes electrónicos es demasiado elevado, de forma que los disipadores tendrían que ser de dimensiones considerables para lograr la disipación de calor, hecho el cual se evita debido a una tecnología que intenta minimizar cada día todos los elementos y componentes. Es por ello que llega a ser necesario emplear otras formas de refrigeración como la refrigeración forzada por aire o líquida.



Figura 2-2 Disipador de calor convencional.

La refrigeración por aire forzada se utiliza generalmente mediante un ventilador. Dicho ventilador crea una corriente de aire que, gracias al aumento de la velocidad del aire, produce un aumento del coeficiente de convección, realizándose así la refrigeración de los componentes. En un coche convencional, por ejemplo, el ventilador se encuentra detrás del radiador, tratándose de un pequeño abanico el cual, mediante un motor eléctrico que recibe señales para encenderse o apagarse al subir o bajar respectivamente la temperatura, realiza dicha refrigeración [24].

El ventilador movido por el motor dirige una corriente de aire frío sobre las aletas. El ventilador es necesario porque los motores enfriados por aire requieren un flujo de aire muy grande. La forma y el tamaño de las aletas y del ventilador son cuestiones fundamentales para la eficacia del motor, así como la separación de las aletas. La separación amplia proporciona un flujo de aire fácil, y por consiguiente, con poco soplo del ventilador funciona, pudiendo utilizar ventiladores pequeños. Si las aletas están muy juntas dispersarán más calor, pero exigirán un ventilador más poderoso para mantener el proceso de enfriamiento que, a su vez absorberá más energía del motor.

La gran ventaja de la refrigeración por aire es su sencillez; por esta razón se usa mucho en motocicletas, bombas estacionarias y maquinaria para carreteras. La refrigeración por aire se puede aplicar a motores de pequeña capacidad. El hecho que los motores enfriados por aire no requieran radiador, cámaras de agua, bomba de agua y todos los componentes asociados con la refrigeración por agua, supone que los costos de fabricación y mantenimiento son menores.



Figura 2-3 Ventilador convencional para disipación [24].

Entre los problemas que se pueden encontrar utilizando dicho sistema de refrigeración se encuentra el ruido que producen los elementos y el aire, así como debido a los distintos principios de la termodinámica, dicho sistema de refrigeración se encuentra limitado y con una capacidad escasa de operación. Es decir, según la aplicación y disipación necesaria a realizar, harían falta muchos ventiladores o disipadores grandes.

2.3 Refrigeración Líquida

La refrigeración líquida consiste en la extracción de calor de un componente mediante el empleo de un fluido en estado líquido, circulando por el interior del dispositivo a refrigerar, empleándose normalmente para ello líquidos con propiedades refrigerantes. Debido a que los fluidos en estado líquido presentan mayor densidad y mayor calor específico que en estado gaseoso, se aumenta la capacidad de refrigeración, reflejado en el coeficiente h de convección, véase el punto 1.4.10.2 (Transferencia de Calor por Convección). Cuando el líquido pasa a través de los componentes, extrae el calor generado y lo lleva hasta el radiador o elementos con el fin de disipar dicho calor [25].

PROCESO	COEFICIENTE DE CONVECCIÓN $h(W/m^2K)$
Convección libre Gas	2-25
Convección libre líquido	50-100
Convección forzada gas.	25-250
Convección forzada líquido.	50-20000
Convección con cambio de fase	2500-100000

Tabla 2-1 Coeficiente de convección según el tipo de proceso aplicado [26].

Los sistemas de refrigeración líquida tradicionales utilizan un sistema de conductos que deben montarse con delicadeza para asegurar una total estanqueidad, por lo que la pericia y experiencia son elementos necesarios para garantizar un montaje eficiente.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado sistemas de refrigeración líquida sin mantenimiento destinados a refrigerar elementos concretos. Estos sistemas integran generalmente un radiador, bomba y el líquido refrigerante en un circuito cerrado que se instala sobre el elemento o elementos a refrigerar [27].

Entre los sistemas de refrigeración líquida se puede realizar una distinción dependiendo del tipo de líquido utilizado, ya sea agua o aceites refrigerantes por ejemplo. También incluye refrigeración por inmersión o no, así como con cambio de fase o sin ella. Debido a que ya se han realizado diversos estudios sobre dichos procesos y sistemas en otros TFG [8], en el presente trabajo se analizarán detalladamente los tres métodos principales de refrigeración líquida. Diversos estudios comparan estas tres tecnologías diferentes de refrigeración líquida para determinar cuál de los tres métodos es capaz de enfriar, entre otros, los elementos de procesadores de alta potencia.

2.3.1 Placa fría CoolIt

La solución CoolIt consiste en una configuración de hardware de alto rendimiento que incluye una placa fría y bomba de micro-canales. Consiste esencialmente en bombear un líquido a través de una placa en contacto con el elemento a refrigerar.

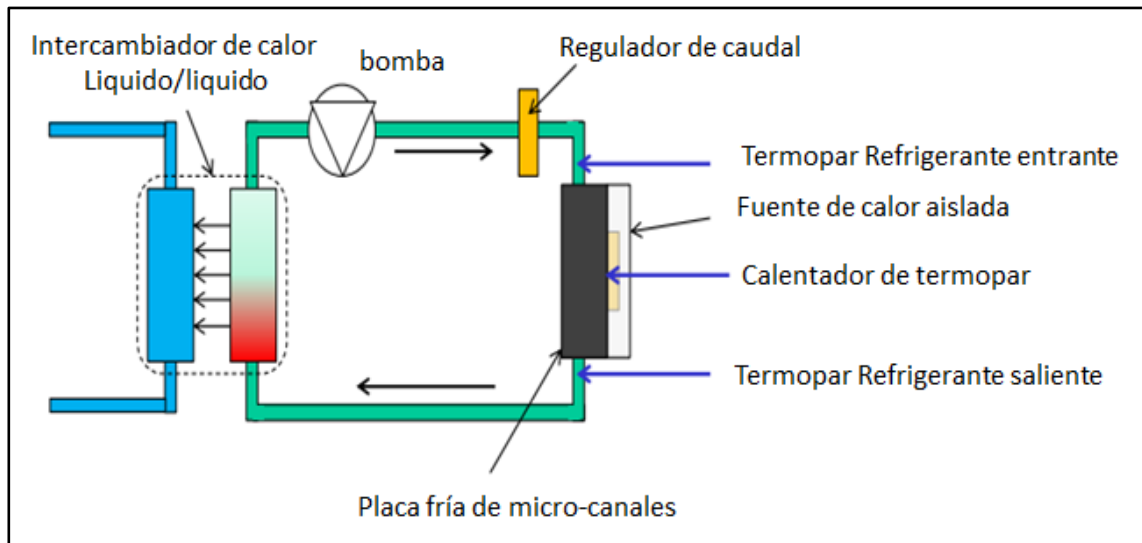


Figura 2-4 Diagrama del sistema de refrigeración de Placa Fría CoolIt [28].

Como se puede observar en la Figura 2-4, por el interior de todo el circuito circula un líquido refrigerante el cual es impulsado por una bomba y regulado, según la necesidad de refrigeración, mediante el regulador de caudal al sistema a refrigerar.

Se utiliza una placa fría de micro-canales anejada a la fuente de calor para conseguir una mejor distribución del líquido refrigerante y conseguir una mayor superficie de transferencia de calor y eficiencia. Consiste esencialmente en una serie de micro-tubos los cuales realizan dicha distribución del líquido refrigerante.

Dicho líquido saliente se redirige al intercambiador de calor líquido/líquido donde se produce la refrigeración, empleando para ello un líquido distinto apropiado para la finalidad requerida. El intercambiador de calor actúa de forma que traspa dicho calor, mediante un intercambiador simple, desde el refrigerante (en contacto con la fuente de calor) a otro líquido con las propiedades adecuadas y analizadas en el ensayo.

Dicho sistema consigue una muy baja resistencia térmica teniendo como únicos inconvenientes la necesidad de un sistema estanco y una bomba que suministre y mueva el líquido a lo largo de todo el circuito. Para el citado sistema se puede emplear cualquier tipo de refrigerante al igual que en el intercambiador líquido/líquido, según la aplicación a realizar y finalidad. Normalmente el intercambiador de calor contendrá agua destilada y no se emplea cambio de fase en el líquido [27].

2.3.2 Una fase en inmersión con aceite mineral

El enfriamiento por aire de los centros de datos, según quedó expuesto en el apartado 2.2 anterior del presente trabajo, es ineficiente debido a la gran cantidad de procesadores en un solo armario o equipo. Es por ello que el enfriamiento por aire tradicional no es tan eficiente como el enfriamiento por líquido debido a su baja capacidad de carga de calor.

Todavía puede llegarse a lograr una mayor eficacia de enfriamiento si el líquido refrigerante es mejor conductor térmico, de forma que así se eliminan las resistencias térmicas intermedias. Es por esta necesidad por la que se comienza a experimentar sobre una refrigeración por inmersión en la cual el dispositivo a refrigerar se encuentra sumergido en el refrigerante.



Figura 2-5 Sistema de refrigeración de una fase en inmersión con aceite [29].

En un sistema de refrigeración por inmersión de una fase se emplea generalmente aceite mineral o un sistema a base de agua desionizada. El fluido de trabajo nunca hierve o se congela, es decir, permanece en una sola fase líquida, bombeándose el fluido más allá de la fuente de calor, donde la energía térmica se transfiere al fluido mediante conducción, elevándose así la temperatura del fluido. El fluido calentado se bombea a un intercambiador de calor donde se enfría y se bombea de nuevo a la fuente de calor. La bomba de refrigerante es la que entrega el aceite mineral a un colector de boquilla, lo que crea un choque de chorros en un disipador de calor. Como inconveniente se plantea el alto coste de la infraestructura con refrigeración líquida monofásica.

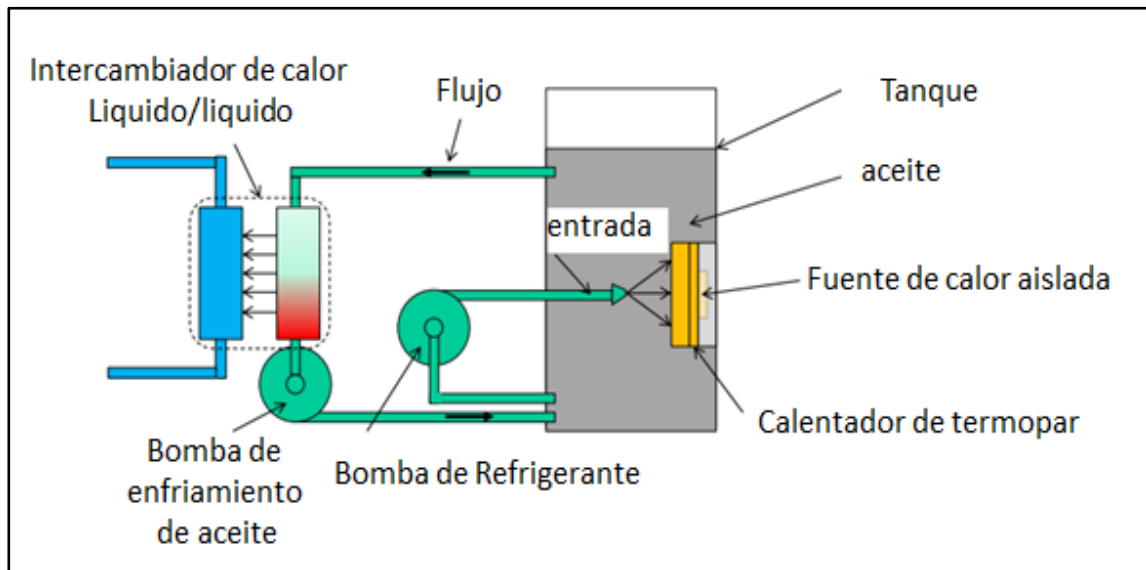


Figura 2-6 Diagrama sistema de refrigeración de una fase en inmersión en aceite [28].

Resultados de diversos estudios muestran que la temperatura del aceite mineral aumenta con la disipación de energía, consiguiéndose mantener temperaturas en los elementos a enfriar en torno a 60°. Las disipaciones máximas de potencia rondan los 140 W si se orienta horizontalmente y de 160 W en caso vertical.

Entre los inconvenientes que encontramos en el sistema se observa que hace falta el empleo de dos bombas (una de impacto y otra para eliminar el calor del fluido a granel), así como una infraestructura completa para lidiar con el aceite mineral, siendo esta compleja y costosa.

2.3.3 *Dos fases en inmersión*

En el enfriamiento en inmersión de dos fases, la diferencia fundamental es que el fluido de trabajo hierve, y, por lo tanto existe tanto en fase líquida como en vapor. La energía que se transfiere desde la fuente de calor al fluido de trabajo causará un aporte de energía suficiente para que el líquido se vaporice.

El gas, se eleva por encima del fluido todavía en estado líquido donde entra en contacto con un condensador, el cual tiene una temperatura menor que la de saturación del fluido. Esto hace que el gas se condense de nuevo y vuelva a caer al tanque [27].

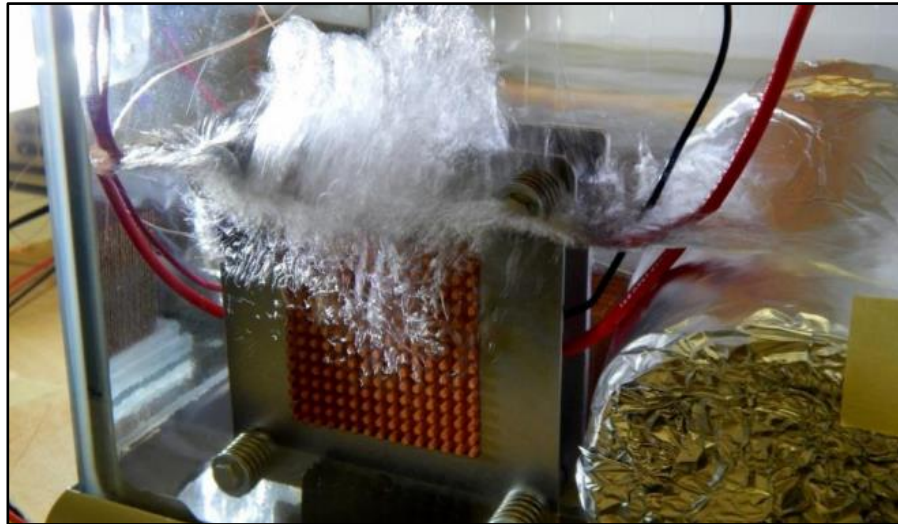


Figura 2-7 Sistema de enfriamiento por dos fases [24].

Al adoptar el enfriamiento por inmersión de dos fases, gran parte de los costes son asociados a la infraestructura. Sin embargo este sistema de refrigeración, entre sus aportaciones, incluye la disminución de ruido de forma considerable así como previene la contaminación de los servidores con polvo. Este sistema es utilizado, entre otros, por gigantes industriales como Facebook que ya han intentado eliminar el calor generado de sus centros de datos mediante este sistema de refrigeración.

En comparación con el enfriamiento monofásico, el enfriamiento por dos fases proporciona una disipación de calor mejorada para un mismo volumen o masa de fluido, debido al hecho de que el calor latente de un fluido tiene un orden de magnitud mayor que el calor específico. A mayor líquido vaporizado, mayor será el efecto observado. Además, se generan grandes corrientes en el interior del fluido, con lo cual mejora la convección de calor con respecto a los líquidos monofásicos (ver Tabla 2-1), también la fase líquida nunca se elevará por encima de la temperatura de ebullición, produciéndose un mayor salto térmico desde el sólido hasta el líquido en contacto con éste.

El enfriamiento de dos fases también tiene los beneficios de una mayor transferencia de calor, reducción del caudal necesario, reducción de la salida de presión, mejora de la uniformidad de la temperatura y mejora del orden de magnitud de la disipación de calor para una potencia de bombeo fija.

Sobre la base de estos beneficios, este sistema se encuentra a la vanguardia de los sistemas de refrigeración actuales y es objeto de motivación para la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

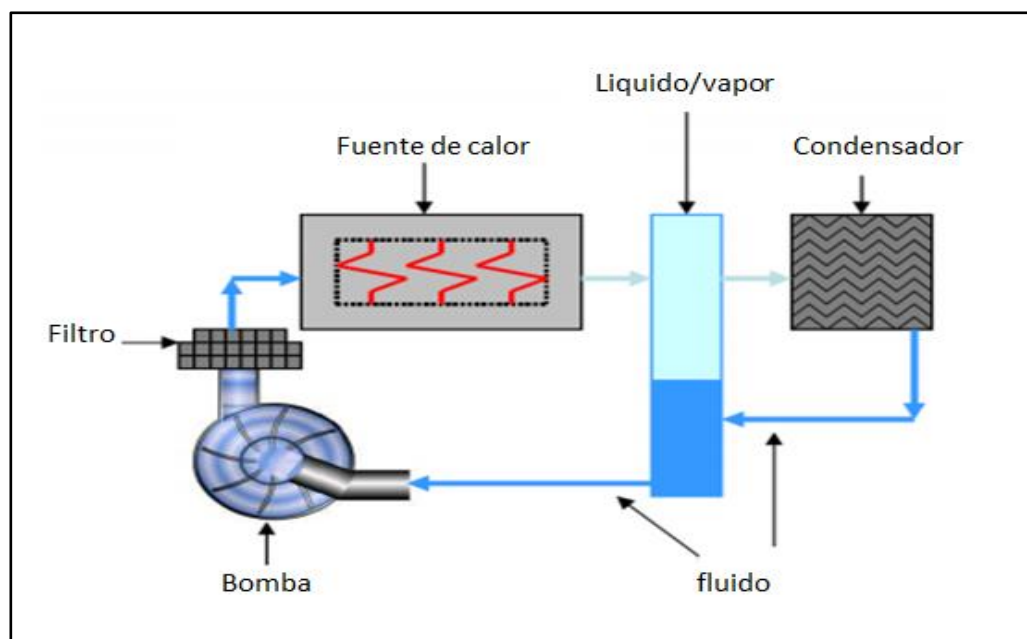


Figura 2-8 Diagrama convencional del sistema de enfriamiento por dos fases con filtro y bomba [27].

Se muestra en la Figura 2-8 esquemáticamente los componentes utilizados generalmente en este tipo de sistema de refrigeración. Por lo general, la bomba realiza el movimiento del fluido a la fuente de calor con objeto de disipar dicho calor. Luego se produce el cambio de fase, pasando el vapor al condensador para volver a estado líquido. Cabe decir que tanto la bomba como el filtro son opcionales, ya que si el elemento a refrigerar es pequeño, como puede ser un móvil, no serían necesarios.

2.3.3.1 Elección del fluido para refrigeración por cambio de fase

Es importante comprender los beneficios y limitaciones de los líquidos refrigerantes cuando se diseña cualquier tipo de sistema de refrigeración, pero sobre todo en un sistema de enfriamiento por cambio de fase. El conocimiento y empleo de un líquido adecuado conducirá a opciones de diseño más informadas y específicas, o bien modificar sistemas ya existentes.

Un líquido puede ser inducido a vaporizarse en un rango de temperaturas, dependiendo de la presión del medio, donde el aumento de la presión del sistema aumentará la temperatura de ebullición nominal del fluido. Esto hecho proporciona un beneficio adicional para un sistema que utiliza refrigeración de dos fases, porque la temperatura de ebullición y condensación de los circuitos se pueden adaptar controlando la presurización del sistema [25].

2.3.3.1.1 Fluidos estándares

Se define como fluidos estándares aquellos que se utilizan hoy en día asiduamente. Se analizan, entre otros, los siguientes: argón, dióxido de carbono, etano, metano, nitrógeno, oxígeno, propano, propileno, R115, R116, R12, R124, R125, R13, R134a, R143a, R153a, R218, R22, R227ea, R23, R236fa, R32, R41, RC318, R401A, R401B, R401C, R402A, R402B, R403A, R403B, R404A, R405A, R406A, R407A, R407B, R407C, R407D, R407E, R408A, R409A, R409A, R409B, R410A, R410B, R411A, R411B, R412A, R413A, R414B, R500, R501, R502, R503, R504, R507A, R508A, R508B y R509A.

Es importante resaltar que la densidad de un gas depende de las condiciones de presión y temperatura, por ello, las siguientes mediciones se indican en condiciones normales de presión y temperatura ($T = 0^{\circ}\text{C}$ y $P_{\text{atmosférica}}$).

FLUIDO	Densidad Líquido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Densidad Vapor $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor Latente $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Tensión superficial $\left(\frac{kg}{m^3 N}\right)$
Agua	958	0.6	2256	0.0589
R11	1275	43.3	147	0.0087
R113	1369	29.9	125	0.0091
R114	1170	109.1	88	0.0032
R123	1247	46.9	134	0.0068
R141b	1073	29.7	185	0.0095
R142b	869	101.7	131	0.0029
R236ea	1128	109.7	103	0.0031
R245ca	1165	50.3	151	0.0070
R245fa	1093	71.9	135	0.0047
Amoníaco	456	56.1	716	0.0051
Butano	467	39.3	258	0.0038
Isobutano	430	56.8	211	0.0023

Tabla 2-2 Tipos de fluidos y propiedades fundamentales [27].

Cabe destacar que la información y datos fueron comprobados para una temperatura de 100°C y presión estándar, obteniéndose así una idea de las características de los distintos refrigerantes y diferencias entre ellos.

2.3.3.1.2 Fluidos de gestión térmica 3M

Es importante darse cuenta del hecho que hay una gran variedad de fluidos refrigerantes dieléctricos alternativos disponibles.

La Compañía Multinacional Estadounidenses 3M tiene una posición de liderazgo en refrigeración por inmersión. En la década de 1950, dicha empresa presentó su primer dieléctrico, desarrollándose y evolucionando para el enfriamiento de contacto directo que ayudó a permitir el desarrollo del Radar y superordenadores.

Se denominará como “dieléctrico” a un material con una baja conductividad eléctrica, es decir, un aislante, el cual tiene la propiedad de formar dipolos eléctricos en su interior cuando es inducido por un campo eléctrico. Así se observa que todos los materiales dieléctricos son aislantes pero no todos los materiales aislantes son dieléctricos [4].

En la década de 1980, la empresa comenzaría a comercializar con la revolucionaria gama de fluidos 3M™ Fluorinert™, obteniendo una refrigeración de equipos electrónicos tales como la supercomputadora Cray-2, permitiendo realizar una refrigeración por inmersión de una fase o dos fases, y derivando a la producción de una gran variedad de líquidos de la misma familia pero con propiedades distintas, sobre todo puntos de ebullición y características dieléctricas, como por ejemplo el fluido Fluorinet FC-43 o el fluido Fluorinet FC-3284. Sin embargo, este tipo de fluidos presentaban

una toxicidad alta, resultando ser dañino si se inhalaban o en contacto con ojos y piel, limitándose su uso a sistemas cerrados o volúmenes reducidos. Además, estos fluidos presentaban un potencial de calentamiento global muy alto, y eran dañinos para la capa de ozono. De hecho, durante la realización de los sistemas de enfriamiento líquido de las supercomputadores Cray-2, se descubrió que el fluido se descompuso durante el servicio prolongado, produciendo componentes tóxicos para el medio ambiente y trabajadores.

En 1996, 3MTM NovecTM Engineered Fluids introduce una nueva clase sostenible, la cual fue introducida debido a la reducción de la capa de ozono por cause de, entre otros, los gases de efecto invernadero. Es por ello que los fluidos de Novec tienen una gran cantidad de características que los diferencian, como su característica dieléctrica, no ser perjudiciales para la capa de ozono, baja toxicidad, no inflamables y con bajo riesgo de potencial de calentamiento global. Es por ello que en los últimos años se reconoce como uno de los mejores líquidos para su aplicación electrónica y aporte de eficiencia energética [30].

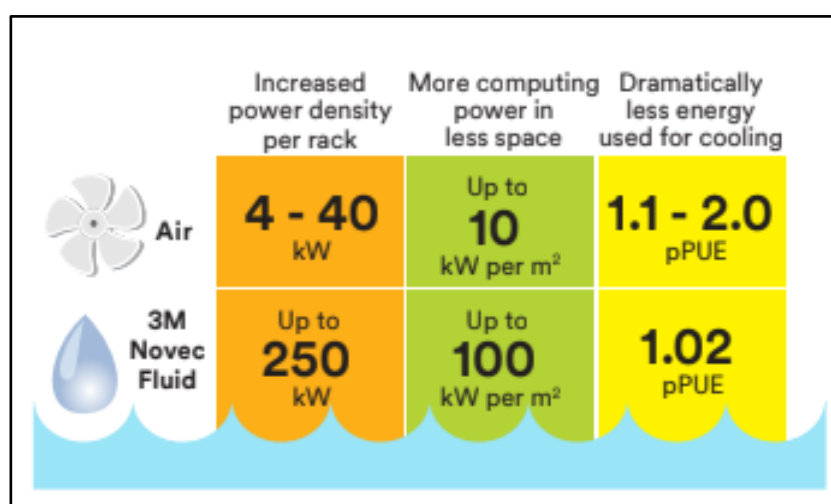


Figura 2-9 Diferencias fundamentales entre refrigeración por aire y fluido Novec 3M [4].

Esta nueva tecnología implica colocar el hardware en un tanque accesible con el fluido dieléctrico refrigerante con un punto de ebullición bajo, por ejemplo, el fluido Novec 7100 se evapora a 61°C (142°F). Como el hardware o componente electrónico se calienta en el tanque, evapora el Novec y se produce el cambio de estado. El Novec se convierte en vapor, se eleva, se condensa generalmente sobre un condensador de agua refrigerada y cae de nuevo en el tanque sin el uso de bombas, llegando a entregar hasta un 95% de energía de refrigeración y suponiendo un ahorro con mínima pérdida de fluidos. Disipadores de calor voluminosos y platos fríos pueden ser utilizados también en el proceso, creando un nuevo camino de rendimiento previamente inalcanzable e impensable con otros sistemas de refrigeración.

Entre las aplicaciones de dicho fluido podemos encontrar la utilizada por los ordenadores que minan (generan) Bitcoins. Bitcoin es una criptomoneda y red de consenso la cual permite un nuevo sistema de pago, siendo el primero “de pares descentralizado” y que se alimenta por sus usuarios. La cadena de bloques de Bitcoin comienza desde 2009 con un software abierto, donde los aficionados podían utilizar su PC de escritorio con CPUs convencionales para realizar el hashing requerido para verificar transacciones y publicarlas al público. Es por ello que la creación de tablas de circuitos compactos emparejados con alto rendimiento genera una necesidad de procesamiento que podría desencadenar un alto consumo y temperatura en sus elementos, y por ello la utilización como sistema de refrigeración del líquido previamente definido [31].

Equilibrar la demanda de rendimiento de la gestión térmica garantizando la seguridad de los trabajadores y el bajo impacto ambiental cada vez es más importante. 3M reconoce la necesidad de un

fluido de transferencia de calor a largo plazo con un bajo nivel de gases de efecto invernadero y emisiones, y es por ello que diseña meticulosamente una cartera completa de 3M™ Novec™ fluidos, consiguiendo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta un 99% en su aplicación al reemplazar el perfluorocarbono.

FLUIDO Novec	Punto de ebullición (°C)	Calor específico (J/kgK)	Temperatura Crítica (°C)	Presión de Vapor (kPa a 25°C)	Densidad del líquido (kg/m³)
7000	34	1300	165	65	1400
649	49	1103	169	40	1600
7100	61	1183	195	27	1510
774	74	1130	195	15.7	1660
7200	76	1220	210	16	1420
7300	98	1140	243	5.9	1660
7500	128	1128	261	2.1	1614
7700	167	1040	290	<0.1	1797

Tabla 2-3 Comparación de propiedades entre fluidos Novec [30].

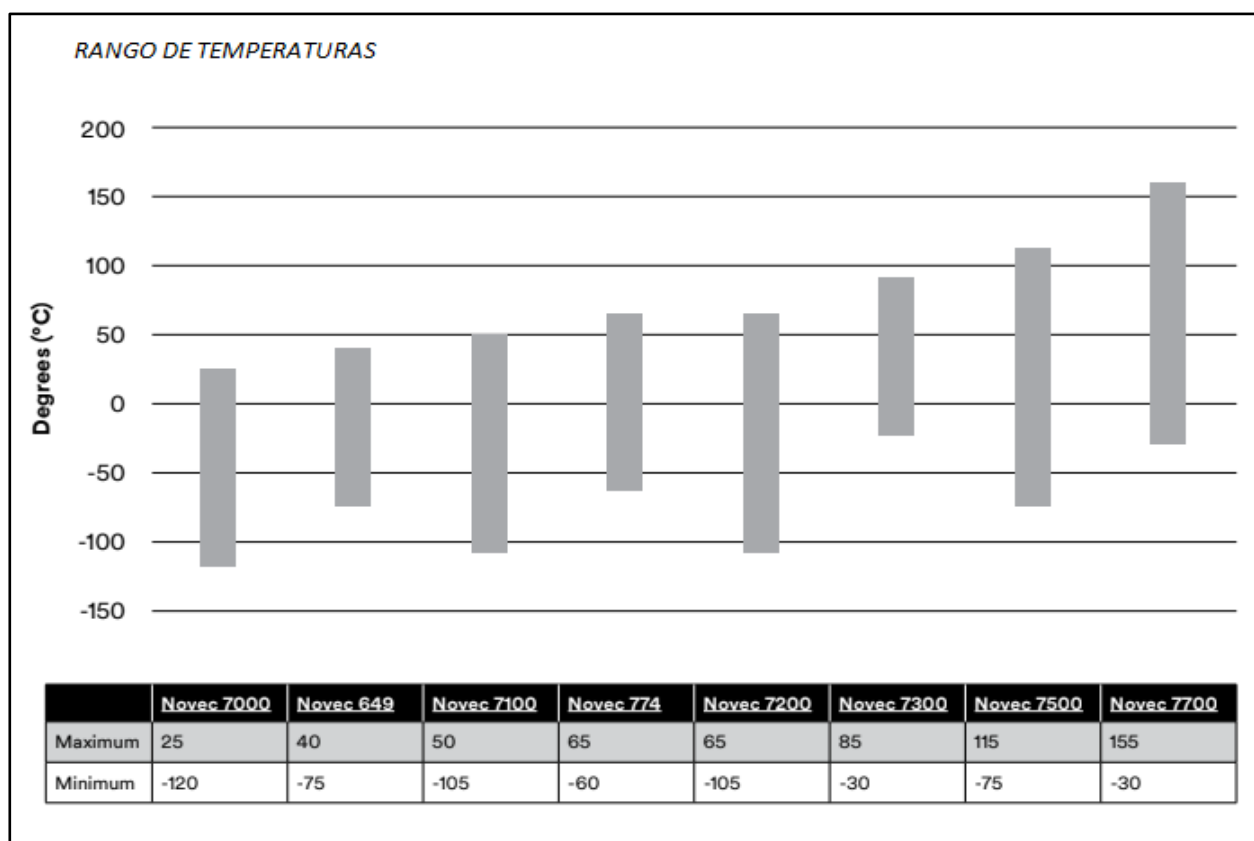


Figura 2-10 Rango de temperaturas de trabajo de los distintos fluidos Novec [30].

2.4 Aplicaciones actuales

Debido a las propiedades definidas anteriormente sobre los líquidos Novec (2.3.3.1) y la refrigeración por inmersión por cambio de fase (2.3.3), la tendencia actual es utilizar dicho sistema de refrigeración con este tipo de líquidos los cuales poseen un punto de ebullición bajo.

La tendencia actual es de utilizar componentes electrónicos cada vez más pequeños y numerosos en un mismo equipo, creando una necesidad de refrigeración y eficiencia de vanguardia. Es por ello que se están creando líneas de investigación y propuestas, las cuales están produciendo una innovación y estudio de estos sistemas de refrigeración.

2.4.1 Sistemas de Comunicación

Hoy en día en nuestros dispositivos móviles se están empleando sistemas de refrigeración innovadores. Con el paso de los años los móviles cada vez tienen mejores procesadores y son más rápidos, pero también disponen de disipadores más eficientes para que el calor generado no afecte al rendimiento y no moleste al usuario durante el uso del dispositivo.

Anteriormente, la refrigeración de dichos sistemas se realizaba por aire, sin embargo no hace mucho, ciertas empresas como Samsung [32], o Xiaomi [33], empezaron a emplear un sistema que hoy en día es muy importante en los móviles de gama alta. Este sistema consiste en tubos intercambiadores de calor, los cuales son unos tubos de termosifón bifásico que ayudan al móvil a que los componentes funcionen correctamente y no sufran altas temperaturas.

Funciona utilizando un conducto de metal en el cual hay un líquido encargado de disipar el calor. El líquido pasa a estado gaseoso al recibir la energía del calentamiento y entonces se desplaza hasta una zona, normalmente de magnesio debido a sus propiedades, en la cual se vuelve a enfriar y a pasar a estado líquido.

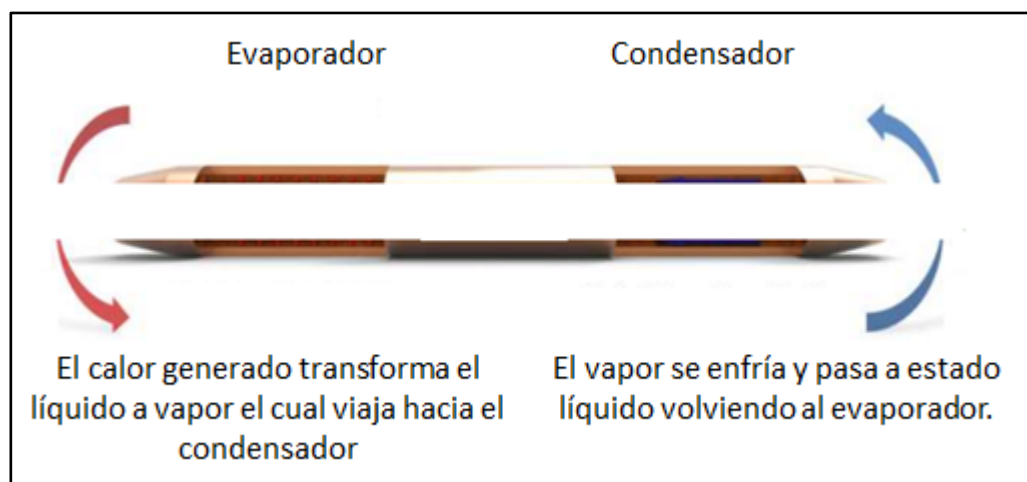


Figura 2-11 Refrigeración en telefonía móvil mediante tubos intercambiadores de calor [32].

Entre otros de los elementos empleados para la disipación de calor encontramos la pasta térmica con una gran conductividad térmica, la cual se describirá posteriormente en el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado. Para mejorar el contacto de dos superficies, la pasta rellena los huecos que pueden quedar entre elementos y que empeoran la transmisión térmica.

Sin embargo, actualmente la tendencia está evolucionando y deriva a un sistema de refrigeración líquida, la cual demuestra ser hasta un 30% más eficaz que los tubos de enfriamiento estándares. Este sistema no sólo enfría más rápido, también permite alcanzar velocidades de reloj más altas y mantenerse al máximo durante más tiempo. La velocidad de reloj es aquella que otorga choques eléctricos para que el procesamiento funcione, sucediéndose estos choques en milésimas de segundos y permitiendo más de un procesamiento a la vez.



Figura 2-12 Sistema de refrigeración líquida en móviles particulares [33].

2.4.2 Automovilística

La utilización de coches eléctricos e híbridos en alternativa a los coches que emplean como combustible diésel o gasolina está permitiendo ser más cuidadosos con el medio ambiente, reduciendo las emisiones perjudiciales y gases tóxicos.

Este cambio genera también una necesidad de innovación en los sistemas que acompañan al motor tales como los sistemas de refrigeración. No tiene nada que ver refrigerar un motor que funciona por gasolina que una batería eléctrica de gran capacidad. Es aquí donde el sistema de refrigeración juega su papel resultando ser hoy en día la alternativa que puede mejorar la eficiencia y refrigeración de dichos automóviles.

El flujo de corriente en las baterías de los coches eléctricos produce el calentamiento de sus celdas. Cuanto mayor es el flujo de la corriente eléctrica, se produce un mayor calentamiento. Es sabido también que el rendimiento de las baterías, sobre todo de Ion-litio, depende de la temperatura a la que se mantiene, y no funcionan bien cuando están sometidas a demasiado frío o calor. Exponerlas a temperaturas demasiado elevadas o demasiado bajas puede generar un daño irreversible en los componentes, por lo tanto se necesita de un sistema de control que mantenga la batería en unas temperaturas óptimas de trabajo, ni demasiado altas ni bajas [34].

La mayoría de las baterías no se pueden cargar rápidamente cuando se encuentran a temperaturas menores de 5° C, y sus celdas comienzan a degradarse cuando la temperatura aumenta por encima de los 45° C.

Entre los sistemas y técnicas utilizadas de gestión térmica de la batería encontramos:

- Por aire (ya sea de forma natural o forzada).
- Utilizando como refrigerante un aceite dieléctrico que se bombea a un sistema intercambiador de calor.
- Enfriamiento por circulación de un refrigerante a base de agua a través de unos conductos de refrigeración ubicados dentro de la estructura de la batería.

El enfriamiento por aire no es ideal para la mayor parte de las aplicaciones de alto rendimiento, debido a la incapacidad para hacer frente a las altas temperaturas del ambiente. Conlleva por lo tanto a ser un sistema incapaz de eliminar el calor generado en la batería con eficacia.

El enfriamiento utilizando como refrigerante un aceite dieléctrico que se bombea a un sistema intercambiador de calor, normalmente enfría extrayendo calor de la superficie de las celdas. Dicho enfriamiento todavía mejora su rendimiento si se utiliza un refrigerante de base de agua o un refrigerante orgánico. El refrigerante se puede emplear para el eliminar el calor de la batería así como para proporcionar calefacción durante una recarga rápida a baja temperatura [27].

Cabe resaltar que la ubicación de los sistemas de refrigeración es muy importante. Modelos como el Tesla Model S y Model X incluyen un sistema que consiste en un tubo de enfriamiento patentado que serpentea a través de las baterías, conteniendo un líquido refrigerante de glicol con base de agua, consiguiendo el contacto directo con las células mediante el material de transferencia térmica.

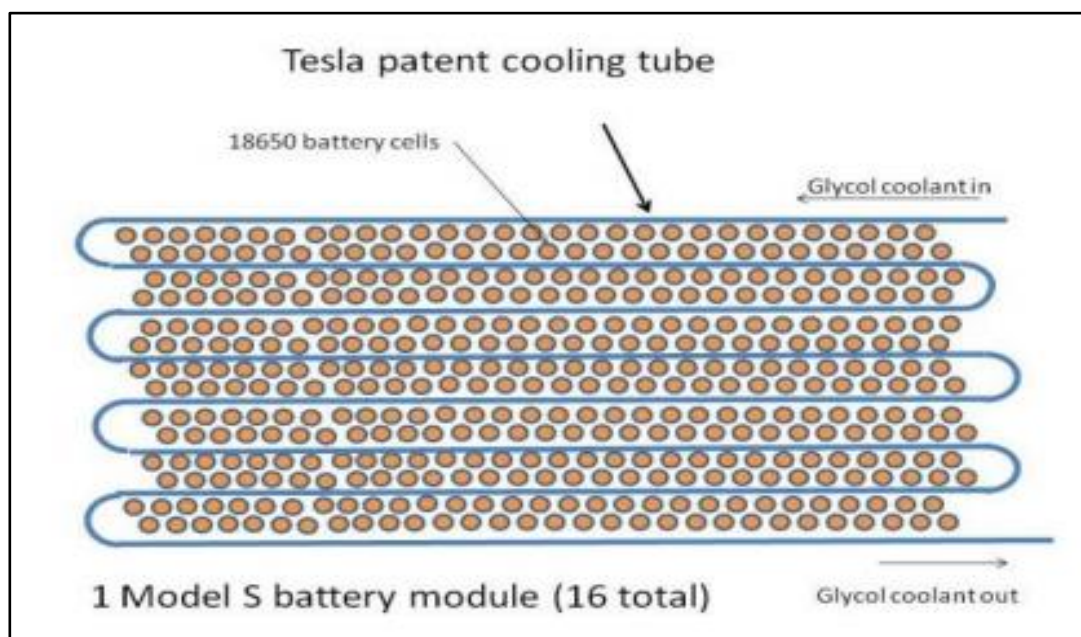


Figura 2-13 Sistema de refrigeración de Tesla Model S [34].

Se plantea por lo tanto que el sistema más eficaz de enfriamiento consiste en hacer circular el refrigerante por la batería, el cual una vez que pase por la batería será forzado a pasar por un intercambiador de calor para conseguir el efecto térmico deseado. Allí el calor se transfiere al ambiente gracias a un ventilador.

Es necesario un enfriamiento de dos fases para conseguir que la batería se mantenga a una temperatura óptima de funcionamiento, y debido a la alta eficiencia de estos sistemas, se reduce el consumo total de energía del sistema. Sin embargo como inconvenientes, supone una investigación y desarrollo de componentes aislados que contengan el líquido y el empleo de líquidos de coste elevado.

2.4.3 Aplicación Naval

Ahorro energético y cuestiones medioambientales y de seguridad son el enfoque principal en las líneas actuales y futuras en el segmento marino. Durante los últimos años, las exigencias de la legislación y otros requisitos han derivado a un incremento en el desarrollo de elementos y sistemas innovadores en la industria naviera. Con el alto precio del combustible, propietarios y operadores están cada vez más centrados en las tecnologías que traen soluciones seguras, efectivas y eficientes a bordo.

En los últimos años se ha comprobado un aumento dramático en el nivel de automatización y, en particular, el uso de variadores de velocidad, específicamente variadores de corriente alterna. La automatización conduce a menos errores en la producción, optimizando procesos y haciéndolos más rápidos, resolviendo problemas generados tales como la demanda de mayor confiabilidad en el proceso, controlar los niveles de emisión cada vez más estrictos y reemplazar la maquinaria existente por una con mejor control y flexibilidad.

Los convertidores de frecuencia se utilizan principalmente para ajustar la velocidad así como el par de los motores de corriente alterna. Este accionamiento supone reemplazar muchas técnicas tradicionales para controlar máquinas individuales o procesos utilizados en todo el buque. Durante más de 30 años, la empresa ABB es la que ha estado suministrando convertidores de frecuencia para la industria marina, con aplicación de inducción e imán permanente. Hoy en día se utilizan estos accionamientos de corriente alterna ampliamente, de forma principal en la propulsión, dirección, cabrestantes, bombas, ventiladores y muchos otros sistemas de a bordo [35].

Los beneficios de los convertidores de frecuencia son ampliamente admitidos. Incluye beneficios como la suavidad, el control, el ahorro de energía y arranque suave. Suponen una capacidad de servicio en un tamaño físico compacto proporcionando una alta funcionalidad del sistema e integridad, dando beneficios a largo plazo. En concreto encontramos los accionamientos industriales ABB refrigerados por líquido de 2000 a 5600 kW.



Figura 2-14 Convertidor de frecuencia ABB con refrigeración líquida [35].

Estos accionamientos refrigerados por líquido ofrecen un diseño robusto para aplicaciones de potencia, con estructura compacta y aislada, optimizado para condiciones severas.

Esta unidad utiliza refrigeración líquida directa lo que hace que el convertidor sea extremadamente compacto y silencioso. Esta refrigeración reduce la necesidad de alta potencia que se requería con la refrigeración por aire filtrado en la instalación. Junto a la eficiencia, la refrigeración por líquido directa ofrece poco ruido y realiza de forma sencilla la transferencia de calor sin aire. El accionamiento refrigerado por líquido se ofrece en versiones simples o configuraciones múltiples con amplias soluciones de software.

2.4.3.1 Refrigeración en el ámbito naval militar

La refrigeración en las unidades de la Armada española se contempla en la mayoría de procesos y equipos que podamos encontrar a bordo. Es por ello interesante destacar que cada unidad poseerá distintos sistemas de refrigeración dependiendo de sus necesidades, por ejemplo, si hay propulsión diésel o eléctrica. A continuación se analizarán aquellos sistemas de refrigeración comunes a todas las unidades.

2.4.3.1.1 Cámaras frigoríficas y aire acondicionado

En primer lugar, se debe considerar la necesidad de transporte de víveres para las largas campañas en la mar. Se necesitan cámaras frigoríficas de gran tamaño y capacidad para conseguir el traslado de alimentos a lo largo del mundo sin que se estropeen y sigan estando aptas para el consumo.

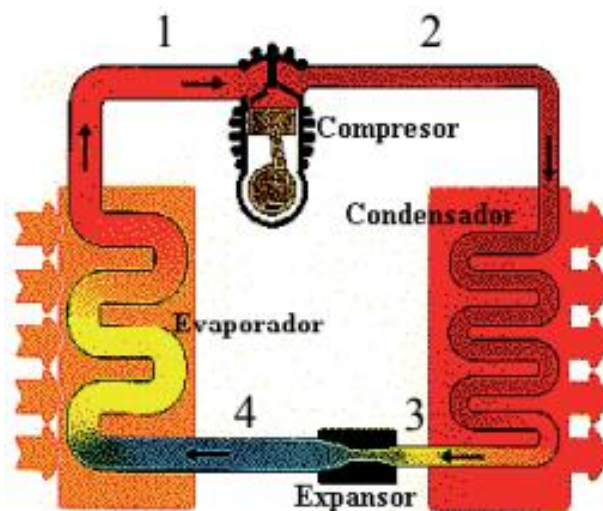


Figura 2-15 Esquema de funcionamiento aire acondicionado común [36].

Dentro del ciclo de refrigeración usual, ver Figura 2-15, se encuentra un componente fundamental que es el fluido refrigerante. Este fluido circula por el interior del equipo, comenzando en un estado, y a medida que se suceden las distintas etapas, va cambiando su condición inicial hasta que finalmente vuelve a su estado original. Existen diversos tipos de fluidos y la normativa del Parlamento Europeo regula su uso con el fin de proteger el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero (GFEI). Este gas refrigerante suele ser el R410A compuesto al 50% por R32 y por R125.

Se distinguen a su vez 4 componentes principales, los cuales son el evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión (regulador). En base a ellos se realiza el ciclo en 4 etapas [36]:

- **Expansión.** El refrigerante está inicialmente en estado líquido y se encuentra a alta temperatura y alta presión produciéndose un flujo hacia el evaporador. La presión del líquido se reduce a la presión del evaporador cuando el líquido pasa por el regulador, de forma que parte del líquido se evapora al pasar por el regulador con el fin de reducir la temperatura del refrigerante líquido hasta el valor de temperatura de evaporización.
- **Evaporización.** Gracias al calor latente suministrado por el refrigerante, en el evaporador el líquido se evapora a una temperatura y presión constante. Destacar que todo el refrigerante se evaporará en el evaporador.
- **Compresión.** El evaporador aspirará el vapor resultante de la evaporación hasta la entrada del compresor. Debido a la propia compresión, la temperatura y la presión del vapor en el compresor aumentará.
- **Condensación.** El vapor fluye hacia el condensador donde expulsará el calor hacia el exterior. Cuando el vapor libera su calor hacia el aire más frío, su temperatura se reduce a la nueva temperatura de saturación y el vapor se condensa, volviendo al estado líquido. Resaltar que antes de que el refrigerante alcance el fondo del condensador se condensa todo el vapor y se enfría.

A modo de resumen, con el ciclo de refrigeración se consigue que la unidad interior de un equipo de climatización absorba el calor del ambiente y lo libere posteriormente a través de la unidad exterior.

Dependiendo del compresor, equipos a utilizar y gases se consigue un mayor o menor enfriamiento, utilizándose tanto en cámaras frigoríficas como en el acondicionamiento de la dotación, así como para el enfriamiento del ambiente donde se encuentren instalados equipos electrónicos.

2.4.3.1.2 Motores diésel

En los motores convencionales que utilizan diésel, como por ejemplo las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar, generalmente se utiliza como sistema de refrigeración un sistema de circulación de agua salada, refrigerando de forma indirecta los dos motores principales.

El agua salada, se aspira por el costado directamente desde el mar y enfría el sistema de agua dulce que contiene el motor en un circuito cerrado. Este intercambio de calor se produce en el enfriador de agua dulce. Normalmente, la misma agua salada enfría el colector de evacuación de los gases de combustión del motor y los turbos.

Entre los elementos y componentes que influyen en el sistema podemos encontrar la bomba de agua dulce, que es accionada generalmente por el motor, y bombas auxiliares de agua salada también accionadas por el motor. Estas bombas auxiliares se emplearían en caso de un fallo en la bomba principal de agua salada, la cual, como se comentó anteriormente, absorbe el agua salada directamente del mar. También serán necesarios diversos filtros a lo largo de todo el proceso así como el enfriador de agua dulce para conseguir el intercambio de calor.



Figura 2-16 Sistema de refrigeración en los motores diésel de las lanchas de instrucción [37].

2.4.3.1.3 Refrigeración de componentes electrónicos.

Las unidades de la Armada española poseen distintos sistemas y equipos electrónicos con diferentes consumos de potencia y sistemas de refrigeración aplicados.

El radar AN/SPS-49(V)4 es un radar de exploración aérea embarcado bidimensional, de largo alcance y alta precisión de detección utilizado en las fragatas FFG clase Santa María. Su alcance es de 256 millas náuticas, con una potencia de pico empleada de 360 kW. Suministra información de distancia y demora al blanco al sistema de presentación en forma de vídeo, disparos de distancia y datos de demora de antena. El radar provee información de detección de blancos automática al sistema.

El sistema de refrigeración no es nada sencillo o convencional, incluyendo desde controles e indicadores a distancia para el correcto funcionamiento del sistema, hasta un desmineralizador de agua con objeto de extraer las impurezas disueltas y las partículas en suspensión.

El sistema funciona gracias a dos bombas centrífugas, aportando la presión necesaria para el sistema refrigerante de 100 psi y caudal de 44 gpm. Como fluido se utiliza agua desmineralizada, la cual realiza el proceso de intercambio de calor en el enfriador del líquido refrigerante del equipo electrónico. En dicho enfriador circula agua de mar, y mediante unas válvulas termostáticamente controladas, regulan el caudal de agua por el enfriador con objeto de mantener constante la temperatura del refrigerante. El sistema de refrigeración está duplicado, con objeto de poder realizar el mantenimiento de una unidad mientras está en servicio la otra.



Figura 2-17 Radar de exploración aérea AN/SPS-49(V)4.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción al Desarrollo

En este apartado se efectuará un completo análisis de la metodología empleada en el presente TFG, describiendo los componentes materiales empleados (3.2), así como los procedimientos y softwares (3.3) utilizados en cada experimento.

En los todos los ensayos generalmente se ha utilizado el mismo sistema de refrigeración que el empleado en el ensayo final aplicado al ordenador. Sin embargo, se han cambiado los componentes y refrigerantes empleados en las distintas pruebas, al igual que se han realizado variaciones de potencia de alimentación con objeto de obtener un margen más amplio de resultados y un estudio detallado del proceso. También se han efectuado distintas pruebas con diferentes condiciones de presión de trabajo, buscando alcanzar la optimización del proceso.

Los ensayos realizados se detallan en la Tabla 3-1, debiendo destacar que se han empleado en el sistema de refrigeración los siguientes fluidos refrigerantes: Novec[®] 649 (0), Novec[®] 7000 (3.2.2.6.2), agua destilada (3.2.2.6.3) y aire convencional impulsado por ventiladores.

Se ha empleado un sistema de refrigeración por cambio de fase en la mayoría de los ensayos, y se han aportado adicionalmente dos ventiladores convencionales para mejorar las condiciones de refrigeración y obtener una convergencia más rápida. Igualmente cabe destacar que los ensayos se realizaron en el laboratorio de máquinas, el cual no posee ningún regulador de temperatura ambiente, no pudiéndose establecer una misma temperatura inicial para comenzar los ensayos, pero siendo ésta despreciable entre los mismos.

En la Tabla 3-1, se entiende por sistema a refrigerar “Resistencia eléctrica”, aquel que consiste en la utilización de una pastilla de aluminio como componente electrónico a refrigerar (3.2.2.1), siendo alimentada por una resistencia eléctrica (3.2.2.2) para variar la potencia de alimentación. El sistema a refrigerar “CPU” será aquel en el cual el componente a refrigerar es la torre de un ordenador convencional. Citar también, que en los ensayos realizados con los fluidos Novec[®] 649 y Novec[®] 7000, se ha utilizado agua destilada en el interior del radiador con objeto de realizar una mejor transferencia de calor al exterior. Mediante el término “fluido utilizado”, se definirá a aquel fluido en contacto con el elemento a refrigerar en la terminación del sistema de refrigeración.

Finalmente, se plasmarán los resultados a lo largo de todo el apartado 4, que permitirán desarrollar una serie de conclusiones que se comentarán en el apartado 5.

Sistema a Refrigerar	Fluido utilizado	Presión inicial	Rango de potencias (W)
Resistencia eléctrica	Novec [®] 649	Atmosférica	55, 100, 150, 200, 250, 300
Resistencia eléctrica	Novec [®] 649	Vacío	55, 100, 150
Resistencia eléctrica	Novec [®] 7000	Atmosférica	55, 100, 150, 200, 250, 300
Resistencia eléctrica	Novec [®] 7000	Vacío	55, 100, 150, 200, 250, 300
Resistencia eléctrica	Agua destilada	Atmosférica	55, 100, 150
Resistencia eléctrica	Aire	Atmosférica	55, 100
CPU	Aire	Atmosférica	Max ($\approx$ 85W)
CPU	Novec [®] 7000	Vacío	Max ($\approx$ 85W)

Tabla 3-1 Ensayos realizados.

3.2 Sistema de Refrigeración utilizado

Al objeto de mejorar los sistemas de refrigeración empleados en otros TFG, así como los procedimientos utilizados anteriormente [8], en el presente trabajo se ha empleado un sistema de refrigeración por cambio de fase, el cual posee en su terminación un elemento de cobre y además realiza un contacto directo entre el componente electrónico a refrigerar y el sistema de refrigeración, produciéndose en el sistema de refrigeración los cambios de fase y disipación de calor necesarios con objeto de mantener una temperatura del componente electrónico óptima para su empleo. El objetivo final es crear un sistema de refrigeración accesible y real que permita al usuario emplear equipos electrónicos con la confianza suficiente de que no sufran sobrecalentamientos por demanda exigida, así como experimentar con dicho sistema para verificar la existencia de una alternativa a los sistemas de refrigeración convencionales actuales.

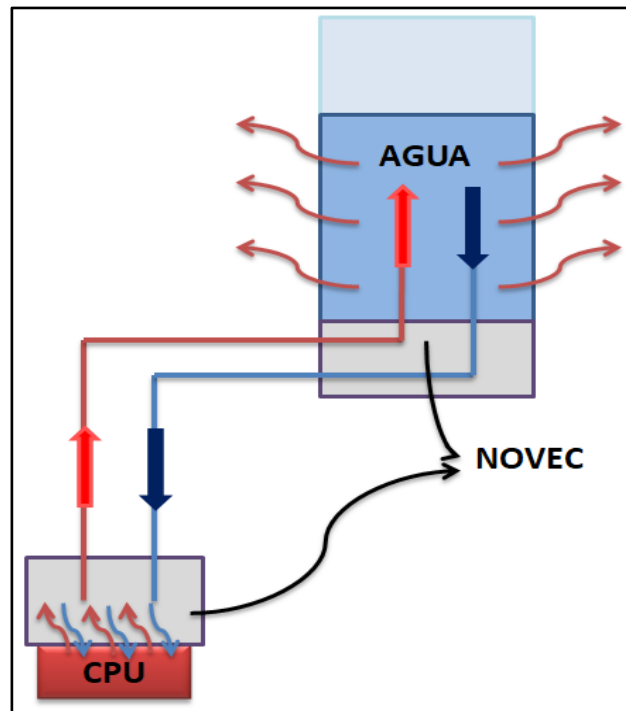


Figura 3-1 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración

En la Figura 3-1 se puede observar el diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración común utilizado. El sistema procede de forma que al calentarse el componente electrónico situado en la parte inferior del diagrama, se produce un flujo de calor ascendente hacia el refrigerador con cambio de fase del fluido Novec, en el cual están contenidos el fluido Novec utilizado y agua destilada, desarrollándose un equilibrio térmico entre ambos fluidos y una posterior disipación de calor al exterior a través de la superficie del refrigerador. De esta forma, se consigue disminuir la temperatura de los fluidos contenidos en el refrigerador, produciéndose así la condensación y flujo descendente a menor temperatura del fluido Novec hasta el dispositivo electrónico, produciéndose la refrigeración deseada.

El sistema de refrigeración empleado está formado por diversos elementos con diversos coeficientes de convección y conducción de calor. Principalmente utiliza materiales con alta conductividad térmica, con el fin de realizar la mejor transferencia de calor posible entre elementos, evitando saltos térmicos que aporten inexactitud a los cálculos e ineficiencia en la refrigeración.

Se han agrupado los elementos utilizados en el trabajo en dos bloques. Un primer bloque representado en la Tabla 3-2 y Figura 3-2, en la que se nombran los elementos utilizados en el sistema de refrigeración (elementos utilizados), y un segundo bloque representado en la Tabla 3-3 y Figura 3-3, donde se citan los elementos que van a ser refrigerados (elementos a refrigerar) donde se nombran los elementos utilizados para ser refrigerados y obtención de resultados y conclusiones.

Los elementos a refrigerar a su vez se han subdividido en dos grupos, dependiendo del uso realizado en los ensayos. Un primer grupo susceptible de refrigeración compuesto por los elementos 1 y 2 de la Tabla 3-3 (parte izquierda de la Figura 3-3), los cuales se han utilizado en los ensayos simulando un componente electrónico común a refrigerar, y un segundo grupo compuesto por el elemento 3 de la Tabla 3-3 (parte derecha de la Figura 3-3) para los ensayos que han sido realizados sobre una CPU real.



Figura 3-2 Elementos utilizados en el sistema de refrigeración.

ELEMENTOS UTILIZADOS		FUNCIÓN
NUMERO	NOMBRE	
1	ZM-WB2 GOLD	Contacto directo con elemento a enfriar
2	TUBOS DE SILICONA	Transporte del fluido refrigerante
3	RADIADOR	Almacenamiento del fluido refrigerante y disipación de calor
4	VENTILADOR	Disipación de calor por convección
5	SONDAS DE TEMPERATURA	Medición resultados
6	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	Alimentación del dispositivo a enfriar
7	FLUIDOS	Transmisores de calor y cambio de fase
8	BOMBA DE AGUA	Impulsar el fluido (sólo empleando agua destilada como fluido de refrigeración)
9	ORDENADOR	Obtención de resultados

Tabla 3-2 Elementos utilizados en el sistema de refrigeración.



Figura 3-3 Elementos a refrigerar.

ELEMENTOS A REFRIGERAR		FUNCIÓN
NUMERO	NOMBRE	
1	PASTILLA DE ALUMINIO	Simula el elemento electrónico a refrigerar
2	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	Transmisión de calor a la pastilla de aluminio
3	ORDENADOR CONVENCIONAL	CPU real

Tabla 3-3 Elementos a refrigerar.

3.2.1 Descripción del funcionamiento del Sistema de Refrigeración

El objetivo del sistema de refrigeración es conseguir que el dispositivo electrónico opere a una temperatura menor a la cual trabajaría si no existiera dicho sistema de refrigeración, permitiendo así reducir el consumo del equipo y realizar un trabajo óptimo en todo momento. Por ello, la clave del proceso está en primer lugar en el cambio de fase realizado por el fluido Novec al estar en contacto con el elemento a refrigerar (puesto que la evaporación del fluido Novec se produce a baja temperatura y el coeficiente de convección de un líquido en evaporación es muy elevado) y en segundo lugar en la transferencia de calor al agua destilada contenida en el disipador de calor.

El sistema opera de forma que, en contacto directo con el elemento a refrigerar (3.2.2.1), se sitúa un elemento perteneciente al sistema de refrigeración con superficie de cobre (3.2.2.7), utilizándose en el contacto pasta térmica (3.2.2.4) para una mejor y más uniforme transmisión de calor. Esta base de cobre, a su vez está conectada a un cilindro en el cual va contenido el líquido refrigerante, y un pequeño disipador de calor de aletas para producir una mejor distribución de calor entre el cobre y el fluido, encontrándose por lo tanto el disipador totalmente sumergido en el fluido refrigerante.



Figura 3-4 Contacto directo con el elemento a enfriar y disipador interno.

De dicho cilindro parten dos tubos de plástico por los que circulará el fluido refrigerante (Figura 3-4). Los tubos a su vez, en su terminación, están conectados al disipador de calor principal o radiador, el cual contiene líquido Novec y agua destilada. El Novec, por ser más denso, se encontrará abajo en el disipador, y no se mezclará con el agua, permitiendo así que nunca el agua pase por los tubos y sea la que realice la refrigeración del elemento electrónico. En el interior del disipador se produce la transmisión de calor entre el fluido Novec y agua aumentándose la presión del sistema cuando se aumenta la potencia exigida al elemento electrónico, derivando a un aumento en la temperatura de trabajo y de convergencia.

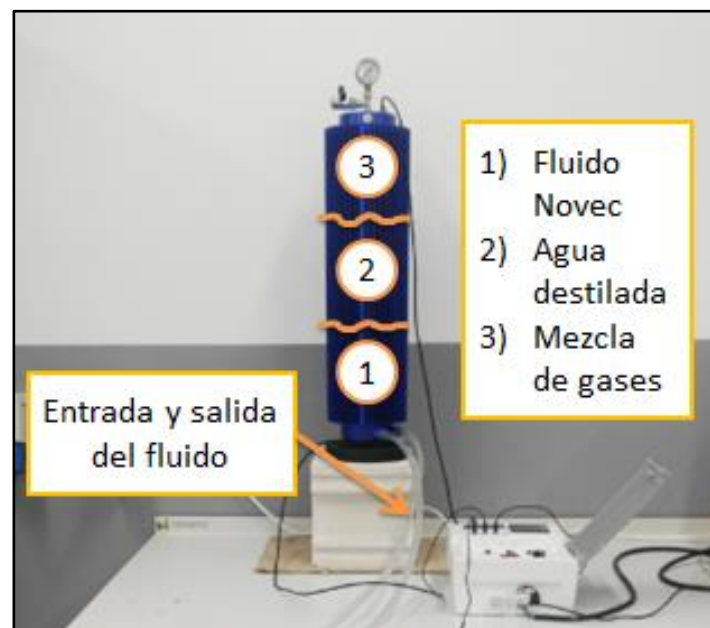


Figura 3-5 Diferencia de fluidos en el interior del radiador cuando se utilizan los fluidos Novec como refrigerantes.

El fluido Novec, al poseer un punto de ebullición relativamente bajo, menor que el del agua, cambiará de fase en cuanto el elemento electrónico alcance la temperatura de ebullición del fluido. En cuanto se alcance esta temperatura, sumando el salto térmico entre elementos, comenzará a evaporar el Novec (Figura 3-6), y a aumentar a su vez la temperatura del agua contenida en el disipador de calor. Este proceso ocurrirá durante todo el ensayo, produciéndose en el interior del intercambiador de calor un flujo de fluidos que mejorará la transmisión de calor. Finalmente, se produce el intercambio y disipación de calor entre los fluidos contenidos en el disipador de calor con el exterior, ayudándose de dos ventiladores para realizar dicha disipación de una manera más rápida y óptima.



Figura 3-6 Circulación ascendente de vapor a través del tubo de plástico.

3.2.2 Relación de elementos empleados en el Sistema de Refrigeración

Para entender correctamente el funcionamiento del sistema de refrigeración y la procedencia de los resultados obtenidos, así como el margen de errores, es necesario conocer los elementos empleados en el proceso. En el siguiente apartado se explicarán todos los elementos empleados durante los ensayos, características, modo de empleo y problemas derivados durante su uso.

3.2.2.1 Simulador de placa electrónica de procesador de cálculo

Con objeto de simular la placa electrónica de un procesador de cálculo convencional, se utiliza para su uso una pastilla de aluminio perforada. Esta pastilla se utilizará como mera transmisora de calor, recibiendo a través de una resistencia eléctrica alojada en su interior (3.2.2.2), como se puede observar en la Figura 3-7, a la cual se le aplicarán las distintas potencias para obtener un margen distinto de temperaturas. A su vez, poseerá otra cavidad en la superficie superior para el alojamiento de la sonda de temperatura (3.2.2.3) para la correcta medición en todo momento. La pasta térmica (3.2.2.4) se utilizará para obtener una mejor conducción del calor y eficiencia en la transmisión.

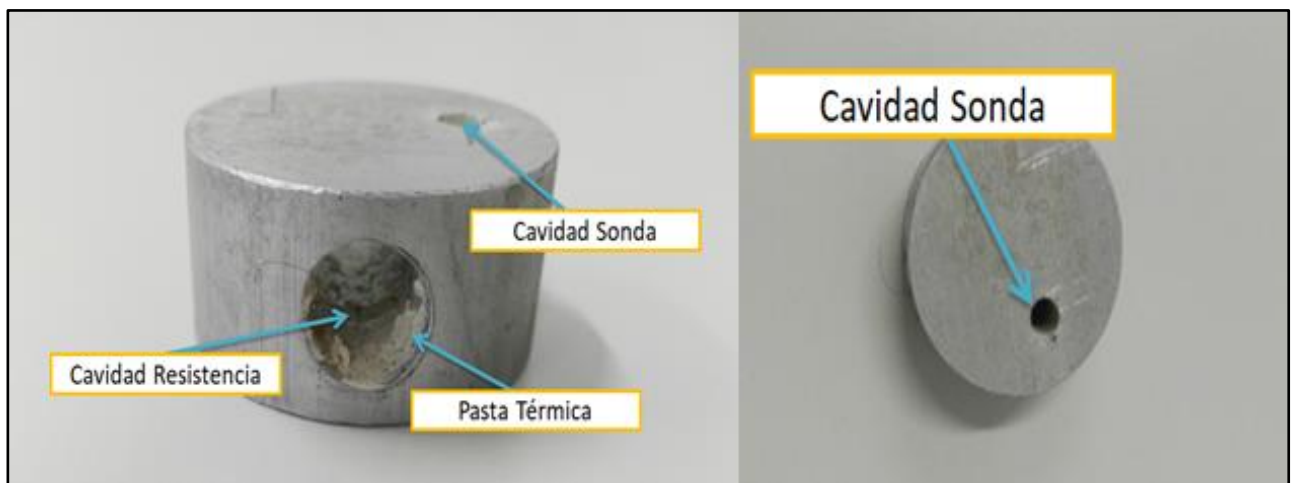


Figura 3-7 Simulador de placa electrónica de procesador de cálculo.

Se elige de aluminio debido al alto coeficiente de conductividad térmica que posee, $k (\approx 209 \frac{W}{mK})$ en comparación con otros materiales como por ejemplo el acero con $k (47 - 58 \frac{W}{mK})$.

3.2.2.2 Resistencias eléctricas

El objetivo de las resistencias eléctricas utilizadas en los ensayos es transferir calor mediante contacto directo a la pastilla de aluminio la cual simula ser un componente electrónico (3.2.2.1) objeto de refrigeración. A medida que se aumenta la tensión generada en la fuente de alimentación (3.2.2.5) mediante el regulador de tensión (3.2.2.5.2), la resistencia eléctrica transmitirá una cantidad mayor de calor a la pastilla de aluminio, simulando al mismo tiempo un aumento en la demanda de operaciones del usuario en el procesador de cálculo.

Se utilizan dos tipos de resistencias térmicas, siendo la utilizada en la mayoría de ensayos de 325W y la utilizada solo para los ensayos donde se requiere menor potencia de 200W. Ambas resistencias son de tipo cartucho, pudiendo recibir un voltaje de hasta 220Vca.



Figura 3-8 Resistencias eléctricas utilizadas en los ensayos.

3.2.2.3 Sondas de temperatura

Con objeto de realizar una medida fiable durante todo el ensayo, se utilizan 4 sondas de temperatura digitales basadas en el chip DS18B20. Estas sondas están fabricadas para usos en ambientes químicos, minas o condiciones ásperas de terreno. También son resistentes al agua, idóneas para la realización de los ensayos, y pueden medir temperaturas desde los -55°C hasta los 125°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, siendo capaces de realizar una medición cada 750 ms. Cada sensor es independiente del resto, pues posee una única toma a la unidad de control primaria (en este caso el sistema registrador de temperaturas), por lo que el empleo de este tipo de sondas es muy recomendable cuando se necesita medir diferentes temperaturas en distintas condiciones y ambientes, como es el caso del presente TFG, sin afectar sus mediciones entre ellas [38].



Figura 3-9 Sondas de temperatura empleadas.

Debido a su resistencia al agua, estas sondas son idóneas para la realización de los ensayos, puesto que se desean medir distintas temperaturas en distintas condiciones. Se utilizará una sonda en la parte superior del intercambiador de calor con objeto de medir la temperatura del agua contenida, una segunda sonda en la base del intercambiador de calor para medir la temperatura del fluido Novec utilizado, una tercera sonda midiendo la temperatura ambiente, y una última sonda ubicada en el simulador de la placa electrónica para medir la temperatura a la que estaría operando el equipo en caso real.

En su inicio, la sonda venía con tres tomas en su extremo final, siendo dos para la alimentación en la fuente continua y la restante para la señal. Sin embargo, su medición se realiza mediante un registrador de temperaturas de 4 canales (3.2.2.5.1), por lo que finalmente se conectan las 3 tomas a un cableado similar hembra con terminación tipo Jack para acceder directamente al registrador de temperaturas, realizando las 2 operaciones a la vez, registro de datos y alimentación.



Figura 3-10 Situación inicial y final de las sondas empleadas.

3.2.2.4 Pasta térmica

La pasta térmica es un compuesto termoconductor utilizado en unión de elementos electrónicos debido a su alta conductividad térmica. De esta forma, se consiguen eliminar aquellas porosidades y vicisitudes encontradas en las superficies de contacto, obteniendo una conductividad plena y eficiente entre ambos componentes. En concreto, se utiliza la pasta termoconductora WLPK-J3, de color plateado, sin silicona y rellena de cerámica, compuesta de un polímero sintético permitiendo una rápida disipación efectiva del calor. Esta pasta es especialmente adecuada en aplicaciones sensibles al silicio [39].

La pasta termoconductora WLPK-J3 no tiene una vida útil especial, de forma que se puede almacenar en ambientes con climas normales hasta 12 meses. En condiciones normales, la pasta no se endurece ni se funde. En cuanto a sus propiedades destacar que su resistencia térmica es de ($R_t = 0,006 \frac{K}{W}$), su conductividad térmica es de ($k = 10.0 \frac{W}{mK}$) y es conductora eléctrica.

Este compuesto, como se puede mostrar en la parte izquierda de la Figura 3-11, será utilizado durante los ensayos para la aumentar la conductividad entre la resistencia eléctrica (3.2.2.2), así como de la sonda de temperatura (3.2.2.3) dentro de la pastilla de aluminio simuladora del componente electrónico a refrigerar (3.2.2.1). A su vez, en dicha Figura 3-11 se observa cómo se aplica la pasta térmica en las zonas de contacto directo entre el disipador de calor y la superficie de la pastilla de aluminio.



Figura 3-11 Aplicación de la pasta térmica WLPK-J3 en los componentes utilizados en los ensayos.

3.2.2.5 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación se utiliza para aplicar tensión a la resistencia eléctrica (3.2.2.2) ubicada en el componente electrónico simulado a refrigerar (3.2.2.1). Esta tensión será regulada mediante un regulador de tensión (3.2.2.5.2) el cual se analizará posteriormente.

En un principio, la fuente de alimentación y su soporte sólo incluía dos sondas para realizar mediciones de temperatura (3.2.2.3), por lo que se hizo necesaria la instalación de otras dos sondas de temperatura para obtener un rango de valores en cada área susceptible de medición y poder comparar entre ellas. Una diferencia a destacar con respecto al anterior TFG es que la medición de la temperatura mediante las 4 sondas se realizaba utilizando Arduino, creando un termómetro el cual reflejaba de forma poco exacta las mediciones observadas en los procesos. En el presente Trabajo, sin embargo, se sustituye dicho Arduino incluyendo un registrador de temperaturas (3.2.2.5.1) el cual permite obtener parámetros más específicos y aproximados a los teóricos, mejorando el estudio, desarrollo, y conclusiones obtenidas.



Figura 3-12 Elementos ubicados en la fuente de alimentación.

3.2.2.5.1 Registrador de temperaturas

El registrador de temperaturas 4 Channel Temperature Data Logger, es un componente electrónico preconfigurado medidor de 4 temperaturas, con un margen de error de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y resolución de 0.1°C . Este registrador va conectado en el interior de la fuente de alimentación (3.2.2.5), mediante un circuito interno, a las sondas digitales de temperatura, obteniendo 4 distintos parámetros simultáneos.

El dispositivo, representado en la Figura 3-12, es capaz de obtener un registro preciso de temperaturas desde los -55°C hasta los 125°C , siendo sus características óptimas para la realización del presente TFG debido a la necesidad de precisión en las mediciones y operar en un rango de temperaturas tolerables según el fabricante [40]. La alimentación del dispositivo se realiza mediante conexión USB a un elemento externo, el cual, mediante el programa Realterm (3.3.1) que se describirá posteriormente, permite obtener una captura periódica programable de los resultados y datos obtenidos por el registrador, permitiendo convertir dichos resultados en archivos Excel (3.3.2) con objeto de realizar una presentación y análisis coherente de los resultados.



Figura 3-13 Ejemplo de funcionamiento del registrador de temperaturas en configuración y obteniendo datos.

3.2.2.5.2 Regulador de tensión

Al igual que ocurrió con la fuente de alimentación (3.2.2.5), el regulador de tensión I-16 (representado en la Figura 3-12) tampoco cumplirá en el presente TFG el fin para el cual fue creado. En este caso, aunque es cierto que sigue siendo un regulador de tensión, fue definido como un regulador de luz, cumpliendo el mismo esquema con el que fue diseñado o que recomendaba el fabricante [41], pero sustituyendo la alimentación de las bombillas por la alimentación de la resistencia (3.2.2.2). De esta forma, se consigue variar la tensión de alimentación de las resistencias, obteniendo distintas mediciones de temperatura en el registrador de temperaturas (3.2.2.5.1) por el calentamiento general del sistema en cada ensayo, y permitiendo posteriormente realizar un estudio adecuado sobre la capacidad de refrigeración del sistema para una potencia requerida supuesta por un elemento electrónico.

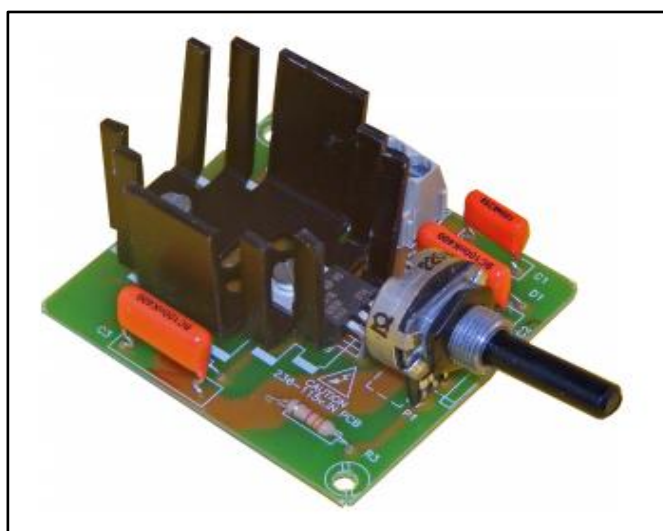


Figura 3-14 Regulador de tensión I-16 [41].

3.2.2.6 Fluidos utilizados

Durante la realización del presente Trabajo de Fin de Grado, se utilizan diversos fluidos refrigerantes con un punto de ebullición bajo para favorecer el intercambio de calor así como la disipación de éste con mayor facilidad. En el sistema empleado, se realizan diversos ensayos con el fluido Novec[®] 7000 así como con el fluido Novec[®] 649, permitiendo obtener datos totalmente acordes con los supuestos teóricos. En el disipador de calor, dichos fluidos transmiten el calor al agua destilada contenida, produciéndose la disipación de calor por las aletas del disipador al exterior.

El procedimiento utilizado, gracias a las propiedades dieléctricas de los fluidos Novec, es la refrigeración por inmersión con cambio de fase del componente electrónico. Al alcanzar el componente electrónico temperaturas superiores al punto de ebullición de los fluidos Novec, éstos fluidos comenzarán a vaporizarse, presentando un coeficiente de convección mayor (ver Tabla 2-1 Coeficiente de convección según el tipo de proceso aplicado .), permitiendo mantener la temperatura del componente electrónico relativamente cercana al punto de ebullición. Tras la vaporización del fluido Novec en el interior del disipador de calor, y gracias al alto coeficiente de conducción y elevado calor específico del agua destilada en contacto con el metal, se suavizan los cambios bruscos de temperatura sufridos por el componente electrónico al ser absorbidos por el fluido Novec.

Debido a la mayor densidad presentada por los fluidos Novec respecto al agua destilada, así como ser inmiscibles ante ella, aunque se produzca un flujo ascendente de vapor en el interior del disipador de calor, al disminuir el agua la temperatura del fluido en estado gaseoso por debajo de su punto de ebullición, el fluido Novec vuelve a su estado líquido, retornando posteriormente por gravedad al dispositivo electrónico con objeto de volver a realizar la refrigeración. Esta característica de ser inmiscibles es debida a la estructura molecular de los líquidos, siendo no afines uno del otro, y por lo tanto, no existe atracción entre las partículas y no se mezclan a pesar de ser removidos.

A diferencia de otros TFG en los que sólo se han realizado estudios y ensayos sobre un único fluido de refrigeración, en el presente trabajo se han realizado ensayos con los fluidos Novec[®] 7000 y Novec[®] 649, efectuándose posteriormente una comparación entre ambos fluidos de trabajo.



Figura 3-15 Demostración de la inmiscibilidad de los fluidos a pesar de ser removidos.

3.2.2.6.1 Novec® 649

El fluido Novec® 649 es un fluido transparente, incoloro y de bajo olor, diseñado como reemplazo para sustancias que agotan la capa de ozono y compuestos con alto potencial de calentamiento global (PCG) tales como hexafluoruro de azufre (SF6) e hidrofluorocarbonos (HFC). Es por ello que el líquido 3M Novec® 649 es un fluido de transferencia de calor avanzado, que equilibra las necesidades de los clientes en materias físicas y térmicas [42].

Se trata de un fluido de transferencia de calor con un punto de ebullición de 49°C a presión atmosférica. Estas propiedades hacen que el fluido sea útil en refrigeración por cambio de fase, especialmente cuando se consideran factores de no inflamabilidad o ambientales. Entre sus aplicaciones podemos encontrar la utilización en motores diésel, generadores, aplicaciones geotérmicas, solares, refrigeración electrónica transformadores y enfriamiento de superordenadores [43].

La Compañía 3M se caracteriza por cuidar la toxicidad de los nuevos materiales al principio del proceso de desarrollo del producto. Se demuestra que el líquido Novec® 649 es muy poco tóxico tanto en toxicidad aguda como en dosis repetidas, hablando de una toxicidad del 10% (100.000 ppmV) según estudios de sensibilización cardíaca y de inhalación aguda durante 4 horas. Sobre este estudio y observaciones, el uso en condiciones normales de funcionamiento da como resultado un gran margen de seguridad entre la exposición anticipada y la directriz de exposición.

A continuación, en la Figura 3-16, se muestran las principales características del fluido Novec® 649 (todos los valores medidos a 25°C si no se especifica en la propia figura), destacando entre ellas el bajo punto de ebullición de 49 °C, así como sus propiedades dieléctricas y densidad, convirtiéndolo en un fluido idóneo para la refrigeración de equipos electrónicos en inmersión por cambio de fase. Incluir que el líquido posee un calor específico $C_e = 1103 \left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ a 25°C y presión atmosférica.

	3M™ Novec™ 649 Fluid
Boiling Point(°C)	49
Pour Point (°C)	-108
Molecular Weight (g/mol)	316
Critical Temperature (°C)	169
Critical Pressure (MPa)	1.88
Vapor Pressure (kPa)	40
Heat of Vaporization (kJ/kg)	88
Liquid Density (kg/m³)	1600
Coefficient of Expansion (K⁻¹)	0.0018
Kinematic Viscosity (cSt)	0.40
Absolute Viscosity (cP)	0.64
Specific Heat (J/kg-K)	1103
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.059
Surface Tension (mN/m)	10.8
Solubility of Water in Fluid (ppm by wt)	20
Dielectric Strength, 0.1" gap (kV)	>40
Dielectric Constant @ 1kHz	1.8
Volume Resistivity (Ohm-cm)	10 ¹²
Global Warming Potential (GWP)	1

Figura 3-16 Propiedades fluido Novec® 649 [42].

3.2.2.6.2 Novec® 7000

El fluido Novec® 7000 es un fluido transparente, incoloro y de bajo olor, también de bajo potencial de peligro medioambiental (GWP), no inflamable y capaz de alcanzar los -120°C . Este fluido nace con el propósito de mejorar las características y capacidades de los fluidos anteriormente desarrollados por la empresa 3M [44].

A su vez, se trata de un fluido de transferencia de calor con un punto de ebullición de 34°C a presión atmosférica, que mejora notablemente las propiedades del fluido Novec® 649 (Figura 3-16), permitiendo que el fluido llegue al punto de ebullición más rápidamente y a una temperatura más baja, así como una mejor refrigeración del componente electrónico, realizando la refrigeración por inmersión con cambio de fase. Entre sus aplicaciones podemos encontrar su utilización en la industria farmacéutica, reactores químicos, equipos sensibles militares, superordenadores, transformadores de alto voltaje, laboratorios médicos e incluso en calibración de temperaturas.

Como otros beneficios en relación con su empleo respecto al resto de fluidos, el fluido Novec® 7000 presenta unas características dieléctricas excelentes, permitiendo incluso en caso de fuga no dañar ningún equipo electrónico, así como cero potencial de agotamiento de la capa de ozono, o su baja toxicidad. Es no inflamable, no corrosivo, y puede ser utilizado incluso a temperaturas extremadamente bajas, hasta -120°C .

La empresa 3M, al igual que verificó con el fluido Novec® 649, sigue comprometiéndose al desarrollo sostenible de fluidos de refrigeración que no resulten dañinos tanto a las personas como al medio ambiente. Las pruebas toxicológicas realizadas en el fluido 3M™ Novec® 7000, indica muy bajos niveles de toxicidad (Figura 3-17). Un estudio de inhalación de 28 días realizado a 1000, 10000 y 30000 ppm promedian para 8 horas de trabajo por día, una toxicidad de 250 ppmV (partes por millón en volumen). Según el índice de toxicidad NOEL (nivel sin efecto observable), supone que la dosis más alta que no produce efecto tóxico en la especie animal más sensible es de 1000 ppmV, por lo que se trabaja con margen de seguridad suficiente.

Properties	Novec™ 7000 Engineered Fluid
Acute Lethal Concentration (ppmv)	>30,000
8 hr Exposure Guideline (ppmv)	250
Skin Irritation	Negative ¹
Mutagenicity	Negative ¹
Ecotoxicity (water solubility < 2.5 ppb)	Very low aquatic toxicity
Acute Oral Toxicity	LD50 > 2000 mg/kg ¹
28-day Inhalation	NOAEL=1000 ppm

Figura 3-17 Resultados de los tests toxicológicos del fluido Novec® 7000 [44].

A continuación, en la Figura 3-18, se muestran las principales características del fluido Novec® 7000 (todos los valores medidos a 25°C si no se especifica en la tabla), destacando su menor punto de ebullición (34°C) así como sus propiedades dieléctricas y una mayor densidad que el agua aunque menor que el fluido Novec® 649. Incluir que el líquido posee un calor específico $C_e = 1300 \text{ (J/kgK)}$ a 25°C y presión atmosférica, mejor que el presentado por el Novec® 639 de valor $C_e = 1103 \text{ (J/kgK)}$, permitiendo una mejor transferencia de calor y mantener el dispositivo electrónico a menor temperatura.

Properties	3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid
Molecular Weight (g/mol)	200
Boiling Point @ 1 atmosphere (°C)	34
Freeze Point (°C)	-122.5
Liquid Density (kg/m ³)	1400
Kinematic Viscosity (cSt)	0.32
Kinematic Viscosity @ -80°C (cSt)	2.0
Kinematic Viscosity @ -120°C (cSt)	17
Coefficient of Expansion	0.00219 K ⁻¹
Critical Density (kg/m ³)	553
Critical Pressure (MPa)	2.48
Critical Temperature (°C)	165°C
Dielectric Constant	7.4
Dielectric Strength (kV)	-40
Flash Point	None
Latent Heat of Vaporization (kJ/kg)	142
Solubility of water in fluid (ppmw)	-60
Solubility of air in fluid (vol %)	-35
Specific Heat (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1300
Surface Tension (dynes/cm)	12.4
Thermal Conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.075
Vapor Pressure (kPa)	64.6
Volume Resistivity (ohm-cm)	108

Figura 3-18 Propiedades del fluido Novec® 7000 [44].

3.2.2.6.3 Agua destilada

El agua destilada es una forma de agua sometida al proceso de destilación con objeto de obtener un grado máximo de pureza, eliminando los añadidos disueltos. Este proceso se realiza generalmente sometiendo al líquido a altas temperaturas, forzando su vaporización, para luego condensarlo selectivamente, separando las partículas que se encuentren disueltas en el agua. Es por ello que se considera una forma de agua limpia de microorganismos y posibles contaminantes disueltos. La composición molecular del agua destilada es la misma que la del agua convencional (H_2O), pero eliminando las sales minerales así como otros electrolitos [45].

Sobre todo, el agua destilada se utiliza en laboratorios o procesos industriales, debido, entre otras características, a su baja conducción eléctrica, punto de ebullición relativamente más alto en comparación con el agua ordinaria, así como por estar libre de contaminantes. En el caso del presente TFG, el objetivo de utilizar agua destilada es no alterar la composición del gas resultante en el interior del disipador de calor debido a la vaporización de partículas disueltas en el agua y por lo tanto variando las condiciones del ensayo. De esta forma, cada vez que se realiza un ensayo, se suponen las mismas condiciones en el interior del disipador de calor, permitiendo realizar ensayos fiables y seguros.

Como se comentó anteriormente en el apartado 3.2.2.6, gracias al alto coeficiente de conducción y al elevado calor específico del agua destilada en contacto con el metal, se suavizan los cambios bruscos de temperatura sufridos por el componente electrónico, y, absorbidos por el fluido Novec. También, debido a poseer una densidad menor que los fluidos Novec y ser inmiscibles entre ellos, a pesar del flujo continuo y turbulencias en el interior del disipador, nunca llegaron a disolverse, y siempre el agua quedará encima del fluido Novec, no estando en ningún momento en contacto directo con el dispositivo electrónico.

3.2.2.7 Disipador de calor

El disipador de calor Reserator1 o ZM-WB2 Gold, es un intercambiador de calor desarrollado por la empresa Zalman en el año 2004, convirtiéndose en el primer sistema de enfriamiento de agua silencioso y sin ventilador del mundo. El equipo, está diseñado con un área de disipación de calor óptima con tecnología de enfriamiento de alta eficiencia, logrando un excelente rendimiento de enfriamiento incluso con convección natural. Disponía, inicialmente, de un radiador, bomba de agua, y un depósito, convenientemente integrados en un conjunto, estando los compuestos anodizados para evitar la corrosión [46].

El nombre Reserator proviene del inglés radiator y reservoir (radiador y depósito) debido a su doble operación simultánea acumulando agua en un tanque interior y disipando el calor generado al exterior mediante aletas. El equipo inicialmente disponía de una bomba de agua en el interior para conseguir realizar un flujo de fluido adecuado (Figura 3-19). De dicho radiador, salen dos tubos por su parte inferior, conectándose finalmente al elemento en contacto con la CPU, denominado ZM-WB2 Gold. Debido a la existencia de una bomba de agua, el equipo necesitaba de una fuente de potencia externa que alimentara dicho elemento, no convirtiéndolo en un equipo totalmente independiente. Entre sus condiciones de trabajo estipuladas por el fabricante, se definía un área de disipación de $1,274 m^2$, con una capacidad de almacenamiento de refrigerante de $4 L$, recomendándose para su empleo agua destilada o de uso corriente. El radiador está hecho de aluminio, con un coeficiente de conductividad térmica k ($209,3 \frac{W}{mK}$), sin embargo la base del ZM-WB2 es de cobre, con un coeficiente de conductividad térmica k ($375,1 \frac{W}{mK}$).

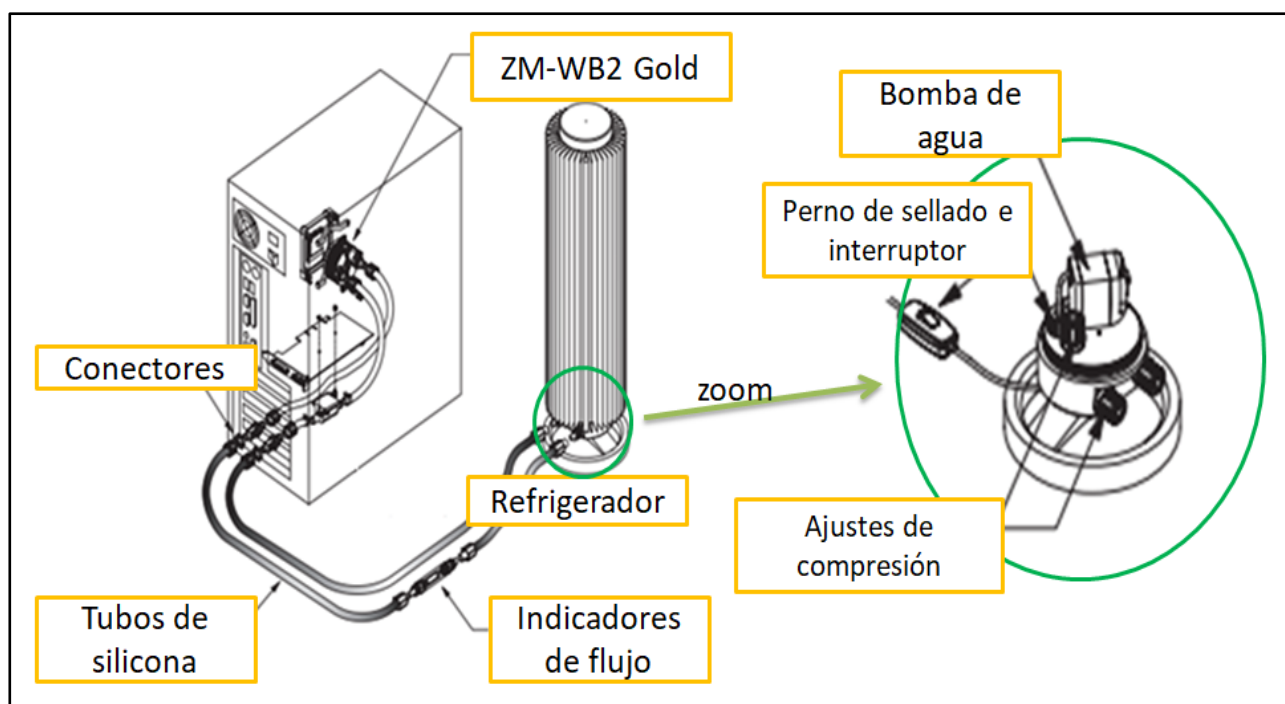


Figura 3-19 Disipador de calor Reserator1 o ZM-WB2 Gold con sus componentes iniciales [46].

Durante el desarrollo del presente TFG, teniendo como base el sistema de refrigeración generado por Zalman (Reserator1), se ha perseguido la optimización del proceso de refrigeración así como hacerlo totalmente independiente de ninguna fuente de potencia ajena al sistema a enfriar. Es por ello que para mejorar las propiedades refrigerantes, en lugar de utilizar agua, se realiza un estudio entre distintos tipos de fluidos refrigerantes (3.2.2.6), con objeto de aportar la máxima eficiencia y disponibilidad al usuario. Para lograr realizar una correcta medición de los procesos ocurridos en el interior del disipador así del ZM-WB2 Gold, se realiza una reorganización de elementos (Figura 3-20) con objeto de instalar las sondas de temperatura (3.2.2.3) así como manómetros para realizar

mediciones. Se suprime la bomba de agua, intentando mejorar el sistema inicial haciéndolo totalmente independiente de ninguna fuente de potencia, logrando realizar el flujo de fluido por diferencia de densidades y presiones, aprovechando la vaporización del fluido refrigerante y posterior condensación.



Figura 3-20 Elementos modificados respecto al sistema de refrigeración inicial Reserator1.

3.3 Software

Durante la realización del TFG, ha sido necesario el empleo de diversos software para conseguir obtener un registro de datos de temperaturas adecuado en el tiempo, así como realizar cálculos y presentación de los datos obtenidos. Estos programas han facilitado la ejecución de los ensayos, permitiendo realizar un estudio previo adecuado sobre las condiciones de trabajo de cada práctica, y capacitar el desarrollo de mejoras en los procesos realizados, así como innovar con objeto de mostrar una mejor eficiencia. Dicho desarrollo efectuado manualmente hubiera prolongado la duración del trabajo considerablemente, no permitiendo haber concluido todos los ensayos en el tiempo estipulado.

3.3.1 Realterm

El software Realterm es una interfaz de comandos en línea que permite usar otros programas al mismo tiempo. La plataforma funciona de forma que, programando previamente la línea de comandos apropiada, genera un fichero de datos a partir de un agente externo generador de resultados. De esta forma, los comandos se almacenan en la interfaz, y se ejecutan en los archivos, generando una recopilación automática de resultados. Permite también mediante la especificación del puerto de entrada de resultados, en este caso obtenidos por el registrador de temperaturas (3.2.2.5.1), una lectura instantánea de los datos en pantalla, así como variar la frecuencia de obtención de datos y exportación al fichero considerado.

De esta forma programando una recopilación de datos de las cuatro sondas de temperatura (3.2.2.3) y modificando los parámetros de comunicaciones del programa (puerto y baudios), se obtiene un rango de datos a lo largo de todo el ensayo, permitiendo un excelente estudio de los procesos ocurridos así como obtención de conclusiones fiables. Estos datos son almacenados en un fichero .txt a lo largo del tiempo, hasta que se produce una convergencia de temperaturas, variando en cada ensayo las condiciones de trabajo. Posteriormente los datos son procesados en Excel (3.3.2), con objeto de amenizar la presentación de los resultados.

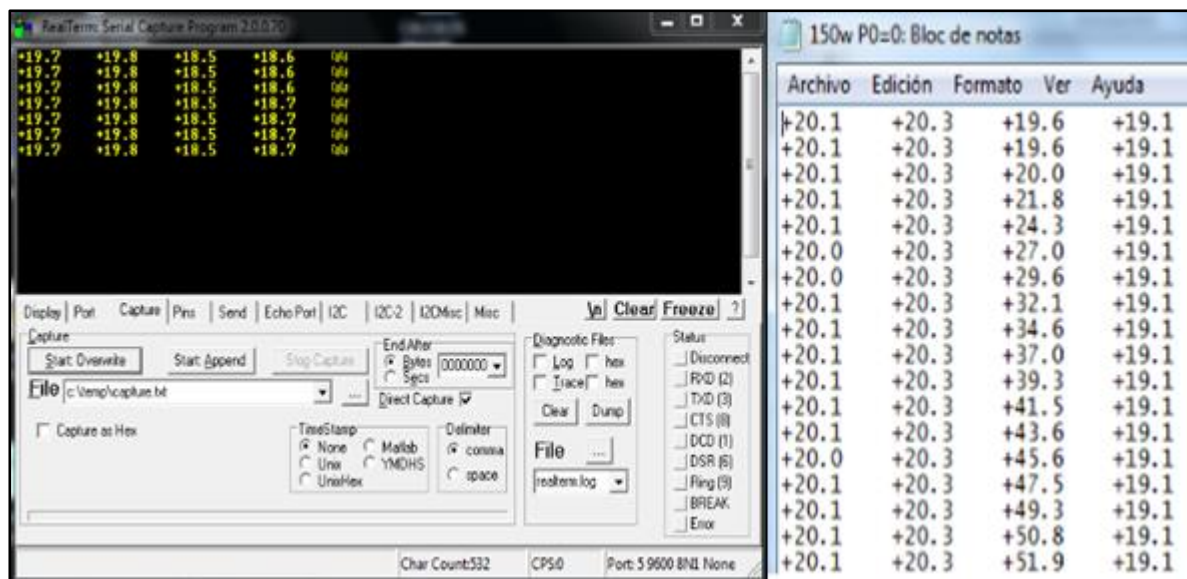


Figura 3-21 Interfaz del programa Realterm y obtención de resultados.

3.3.2 Microsoft Excel

Excel es un software informático multipropósito desarrollado por Microsoft. Entre sus funciones, cabe destacar la asociación de datos numéricos dispuestos en celdas y columnas, permitiendo realizar operaciones pre-programadas entre ellas y establecer relaciones entre los datos presentados en la interfaz. De esta forma, se consigue realizar una hoja de cálculo con todas las fórmulas a emplear, facilitando la obtención de resultados y conclusiones en un espacio de tiempo reducido. Tras la obtención de resultados, la interfaz permite la representación de los datos mediante gráficas y distintas funciones.

El programa se utiliza durante la realización del presente trabajo para la creación de hojas de cálculo, manipulando datos números obtenidos por las sondas de temperatura (3.2.2.3) y presentando los datos en filas y columnas. Gracias a la posibilidad de personalizar las hojas de cálculo, se aprovecha el programa para facilitar los cálculos realizados en los distintos procesos, ajustándose a las necesidades de los ensayos. De esta forma se acelera el proceso de medición y obtención de resultados, representando los datos obtenidos posteriormente en gráficas, permitiendo al lector una interpretación de los resultados amena y sencilla.

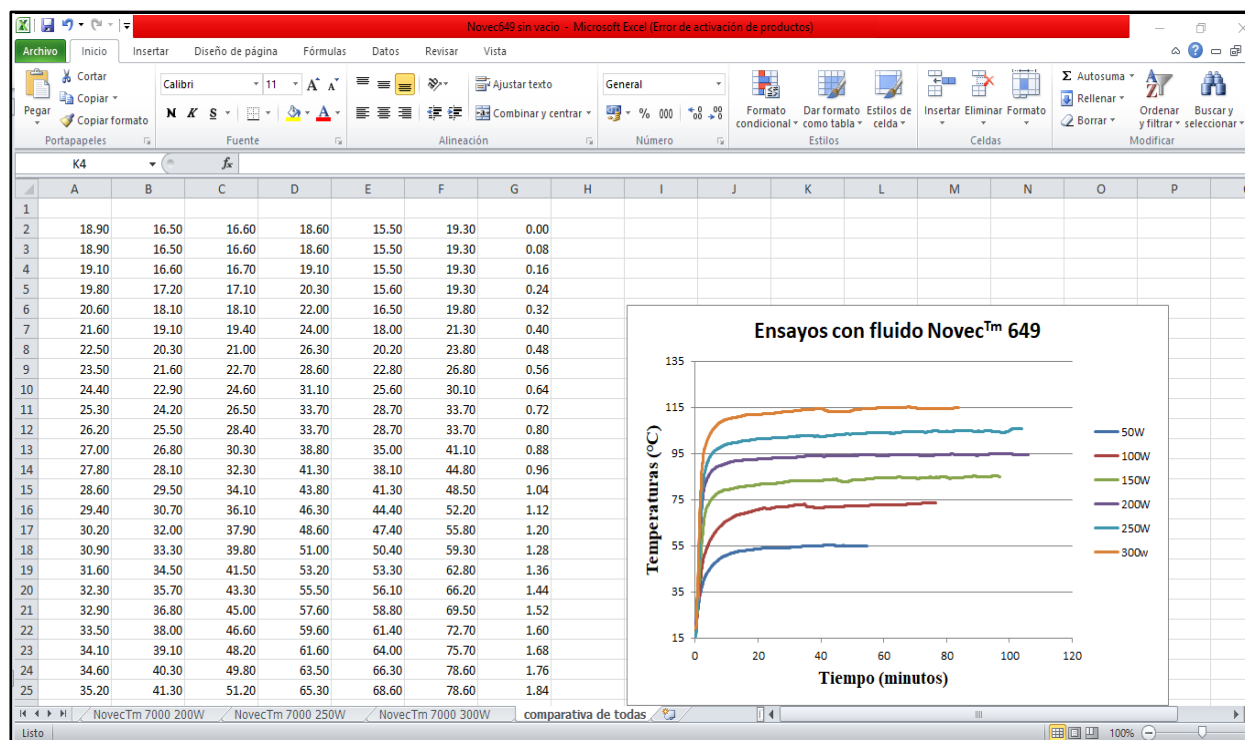


Figura 3-22 Entorno de trabajo de Microsoft Excel.

3.3.3 Core Temp

Core Temp es un programa sencillo para Windows empleado para monitorear la temperatura del procesador y otros elementos vitales del ordenador. Sobre todo se utiliza en los ensayos realizados sobre el ordenador convencional (3.4.4), midiendo, entre otros elementos, la temperatura de trabajo del sistema al aplicarle los distintos sistemas de refrigeración.

El programa es capaz de medir la temperatura de los cuatro núcleos del procesador a tiempo real con diferentes cargas de trabajo, de forma que se realiza una exportación de datos a tiempo real a Excel (3.3.2), procediendo posteriormente al estudio y desarrollo de conclusiones gracias a los resultados obtenidos. Opera de forma precisa debido a la lectura de temperaturas directamente desde un sensor térmico ubicado en cada núcleo del procesador. Estos sensores son digitales, por lo que no dependen de un circuito externo ubicado en la placa base para informar de la temperatura, eliminando, así cualquier imprecisión que puedan tener introducidos los circuitos y sensores de los elementos externos [47].

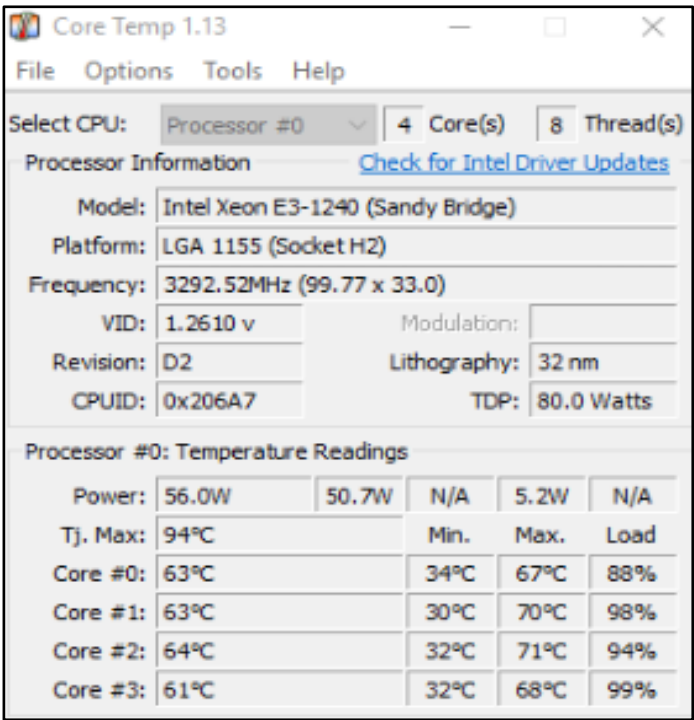


Figura 3-23 Ejemplo real de funcionamiento del programa Core Temp.

3.3.4 IntelBurn Test

A pesar de poseer la herramienta necesaria para realizar una lectura de temperaturas a tiempo real gracias al programa Core Temp (3.3.3) en el ordenador convencional, y con objeto de realizar un estudio adecuado sobre el impacto de los distintos sistemas de refrigeración en el equipo, se hizo necesario someterlo al mayor consumo de potencia posible a su máxima capacidad de trabajo, empleándose para ellos los cuatro núcleos del sistema a pleno rendimiento.

Para conseguir realizar este ensayo a dichas prestaciones, se ha utilizado el programa IntelBurn Test que gestiona el software de prueba Linpack, aportado por la empresa Intel [48], el cual somete al equipo a un trabajo de estrés extremo, induciendo a la CPU a funcionar a su máxima capacidad, realizando operaciones internas a gran velocidad y potencia para conseguir su objetivo.

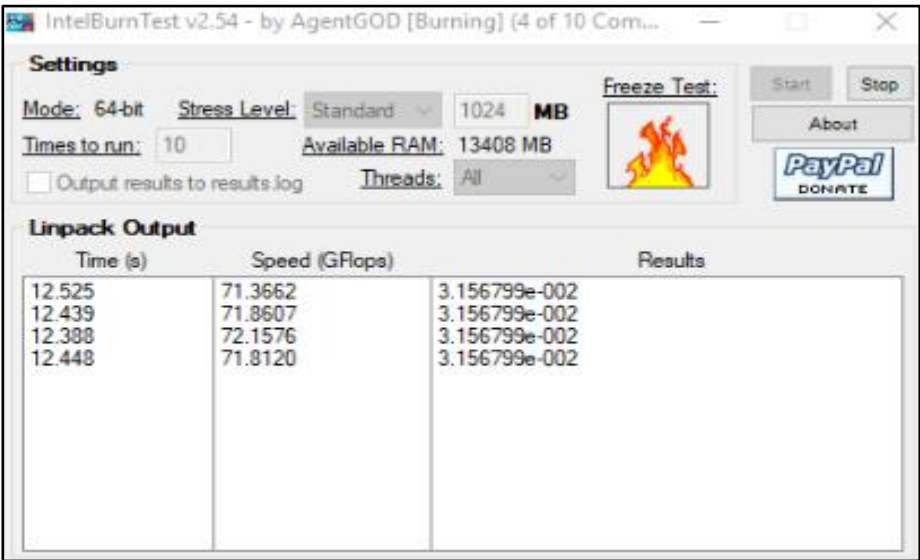


Figura 3-24 Ejemplo real de funcionamiento del programa IntelBurn Test.

3.3.5 Siemens NX

El software NX o también conocido como Siemens NX es un programa conjunto CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), y CAE (Computer Aided Engineering) comprado por Siemens PLM Software, el cual permite diseñar gráficamente realizando modelos paramétricos (3D, diseño conceptual etc.), análisis de ingeniería, así como simulaciones multidisciplinarias y manufacturación digital de herramientas para la industria de la maquinaria. El programa se encuentra enfocado principalmente a actividades tales como diseño industrial y modelado, diseño de packaging, diseño de sistemas electromecánicos, simulación mecánica, simulación electrónica, diseño de accesorios y su posterior maquinado. Resulta ser una solución potente y versátil que permite operar de manera rápida y eficaz, dando no solo soluciones al diseño, sino la facilidad de incorporar en un solo programa el diseño, simulación y fabricación de elementos.

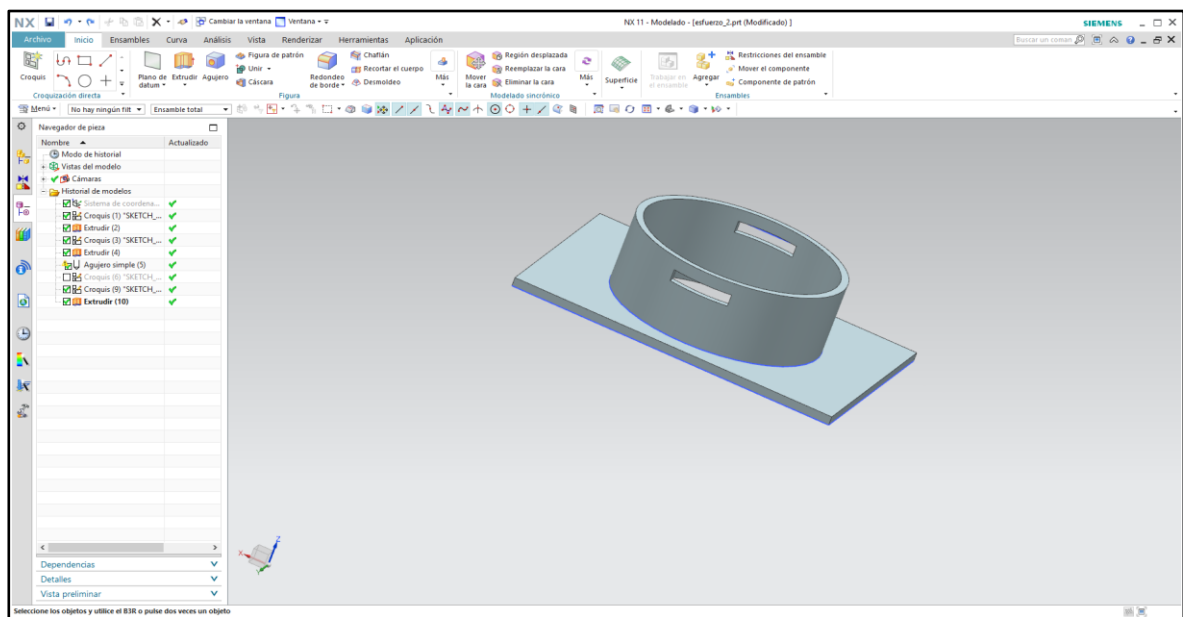


Figura 3-25 Entorno de trabajo programa NX.

Debido a las características nombradas del software, se decide utilizar dicho programa para el diseño y mecanizado de un soporte anclado a la placa electrónica con objeto de conseguir un contacto adecuado entre la CPU del ordenador y el elemento ZM-WB2 GOLD, permitiendo realizar una mejor refrigeración y consecuentemente obtener mejores resultados. Para ello, se toman previamente las medidas del conjunto y se diseña posteriormente el soporte de acuerdo a las exigencias de la geometría del elemento a sujetar. En la (Figura 3-26) se muestra el modelado 3D del soporte así como una imagen tomada del mismo tras su impresión en 3D.

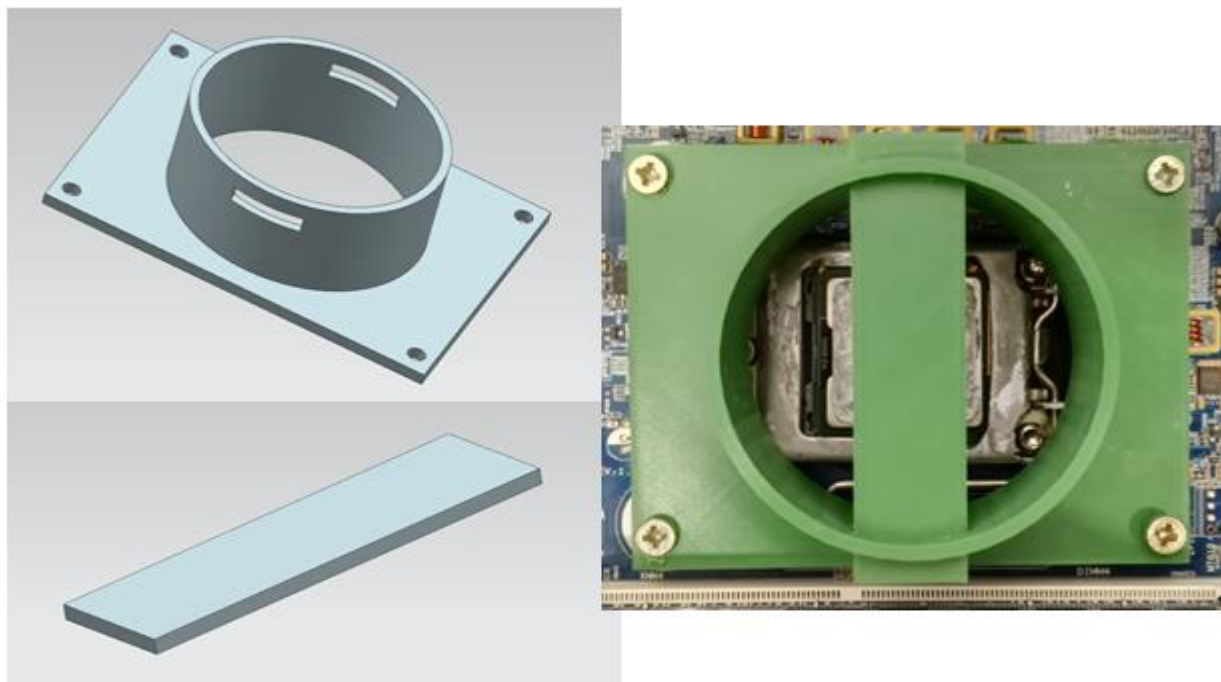


Figura 3-26 Pieza realizada en el programa NX, impresa en 3D y colocada sobre la placa base.

3.4 Ensayos

Para la realización de los ensayos se dispone de un montaje común en el cual los parámetros a variar serán la tensión de alimentación del componente electrónico (3.2.2.1) y el fluido refrigerante a utilizar (3.2.2.6), tal y como se puede observar en la Figura 3-2. Sin embargo, habrá dos ensayos en los cuales se incorporarán elementos adicionales para su realización: un ensayo utilizando como único fluido refrigerante el agua destilada, necesitándose la instalación de la bomba de agua aportada por el fabricante [46] para conseguir circular el fluido, y un segundo ensayo realizado sobre el ordenador, dónde se sustituye el componente electrónico de aluminio por el equipo real.

A continuación se va a proceder a describir cada uno de los ensayos realizados con su montaje, instrumentos y técnicas utilizadas.

3.4.1 Ensayos realizados con fluidos Novec[®] 649 y Novec[®] 7000

A diferencia de otros trabajos realizados anteriormente sobre refrigeración de componentes electrónicos en inmersión por cambio de fase [8], en lugar de utilizar el fluido Novec[®] 1230, se utiliza el fluido Novec[®] 649 (0), con propiedades muy parecidas al anterior pero no definiéndose como un agente de extinción de incendios. Posteriormente, debido a las propiedades del fluido Novec[®] 7000 (3.2.2.6.2) mejoradas con respecto al fluido Novec[®] 649, se vuelven a realizar todos los ensayos entre el margen de potencias de 55W y 300W pero aplicando el nuevo fluido de refrigeración.

3.4.1.1 Elementos utilizados

Con objeto de realizar los ensayos se lleva a cabo el montaje especificado en la Figura 3-2, utilizando los elementos empleados en la Tabla 3-2, sin emplear la bomba de agua y utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 649 y Novec[®] 7000 respectivamente. Los elementos a refrigerar serán los elementos 1 y 2 descritos en la Tabla 3-3 y mostrados en la Figura 3-3 Elementos a refrigerar..

Para realizar el cambio de fluido refrigerante previamente es necesario vaciar el sistema, y realizar el cambio de fluido, realizando una decantación (Figura 3-27) para perder la menor cantidad de fluido refrigerante utilizado anteriormente, aprovechando la inmiscibilidad de los fluidos Novec (3.2.2.6) con el agua.



Figura 3-27 Decantación realizada en el cambio de fluidos refrigerantes.

3.4.1.2 Descripción del ensayo

La secuencia realizada en el ensayo es la siguiente:

- Una vez realizado el montaje correctamente, se arranca el ordenador con el programa Realterm (3.3.1) instalado para la toma de datos.
- Se varía la tensión de alimentación de la resistencia eléctrica (3.2.2.2) la cual por conducción transfiere el calor al componente electrónico a refrigerar (3.2.2.1) mediante la fuente de alimentación (3.2.2.5) realizando ensayos a 55W, 100W, 150W, 200W, 250W y 300W.
- Una vez calentado el componente electrónico, comienza la vaporización del fluido Novec y el flujo ascendente, produciéndose el ciclo de refrigeración en el interior del sistema de refrigeración (3.2.1).
- Obtención de datos a tiempo real cada 5s mediante las sondas de temperatura (3.2.2.3).
- Una vez producida la estabilidad térmica del sistema de refrigeración, lo que significa que no varían las temperaturas de los componentes utilizados, se considera que el sistema llega a su convergencia y se da por finalizado el ensayo.
- Por último, comprobación de los datos obtenidos en el ordenador y desactivar la fuente de alimentación, dejando el sistema enfriarse a temperatura ambiente.

3.4.1.3 Realización de vacío

Los primeros ensayos, desde el margen de 55W hasta 300W se realizan teniendo el sistema cerrado, de forma que cuando se calienta el componente electrónico y se produce la vaporización del fluido refrigerante, comienza a aumentar la presión en el interior del radiador (3.2.2.7). A medida que aumenta la presión, en el interior del radiador aumenta también la velocidad de condensación, hasta que transcurrido un tiempo ambas velocidades se igualan. Llegado a este punto, se llega a la presión máxima en el interior del radiador. Aprovechando este factor, se llega a la conclusión de que si operara desde un principio con una presión inferior a la generada por la saturación del fluido a la temperatura ambiente se optimizaría el proceso, disminuyendo la temperatura a la que comienza a evaporarse el fluido refrigerante. Por ello, se decide realizar un vacío en el interior del sistema de refrigeración para optimizar el proceso.

Debido a la dificultad de realizar un vacío en el interior del sistema de refrigeración, se ingenia un sistema sencillo que elimina la mayor parte del aire contenido en el sistema sin suponer una pérdida considerable de fluido Novec evaporado mezclado con el aire. Para ello, se coloca un globo de aire en la boca de salida del manómetro, impidiendo que al abrir el sistema se pierda el fluido Novec y se equilibre a presión ambiente (Figura 3-28). Se procede pues a calentar todo el sistema por encima de la temperatura de evaporación y se deja que el vapor del fluido Novec generado arrastre todo el aire. Para ello, se coloca el globo en la salida del manómetro y se abre la salida de presión. Este proceso es realizado varias veces hasta que en el interior del globo, al enfriarse, comienza a observarse que hay resto de fluido Novec, indicando que no se puede realizar más vacío en el interior del sistema sin suponer una pérdida significativa de fluido. Al enfriar el sistema, el fluido Novec se condensa quedando así un vacío en el interior, utilizándose el globo para recuperar el Novec expulsado.



Figura 3-28 Realización de vacío del sistema.

Tras la realización del vacío, se vuelven a realizar todas las mediciones con el fluido Novec[®] 7000 para las potencias de 55W, 100W, 150W, 200W, 250W y 300W, sin embargo solamente se pudieron realizar mediciones con el fluido Novec[®] 649 para las potencias de 55W, 100W y 150W debido a que la resistencia que permitía ser alimentada hasta 300W quedó inoperativa durante la realización de dichos ensayos.

3.4.2 Ensayos realizados con agua destilada

Intentando contrastar los beneficios que aporta la utilización de un fluido refrigerante con un punto de ebullición bajo produciendo un cambio de fase en el interior del sistema de refrigeración, se realizan los mismos ensayos con las mismas tensiones de alimentación pero utilizando agua destilada como único fluido refrigerante. El objetivo es describir y analizar posteriormente en el Capítulo 4 (Resultados) del presente Trabajo los beneficios de la aplicación de los fluidos Novec como refrigerantes en el proceso.

3.4.2.1 Elementos utilizados

La realización de los ensayos utilizando agua destilada como único fluido refrigerante, limita al sistema de forma que es necesaria la instalación de una bomba de agua en el interior del radiador alimentada a una fuente de potencia externa, de forma que el fluido pueda circular correctamente en el proceso, realizando la refrigeración del componente electrónico. Es por ello que los elementos utilizados en los ensayos son los citados en la Tabla 3-2 así como los elementos 1 y 2 descritos en la Tabla 3-3, añadiendo la bomba de agua y empleado como fluido refrigerante únicamente agua destilada.

3.4.2.2 Descripción del ensayo

Los ensayos realizados con agua destilada como único agente refrigerante se ejecutaron bajo los mismos procedimientos que los realizados con los fluidos Novec (3.4.1.2), salvo que al inicio del ensayo se activó la bomba de agua (Figura 3-29) con objeto de realizar una adecuada circulación de fluido a lo largo de todo el sistema de refrigeración, facilitando la convergencia térmica y transmisión de calor entre el fluido más cercano al componente electrónico y el más lejano.



Figura 3-29 Bomba de agua empleada en los ensayos realizados con agua destilada como único fluido refrigerante.

3.4.3 Ensayos realizados mediante refrigeración por aire

A pesar de la investigación realizada en el presente Trabajo de Fin de Grado sobre la implementación de un sistema de refrigeración por cambio de fase aplicado a componentes electrónicos, usualmente la refrigeración de dichos dispositivos se realiza mediante ventiladores y disipadores de calor convencionales. Como se ha citado anteriormente (2.2), la refrigeración por aire supone una manera simple y económica de disipar calor, pero dependiendo de la temperatura de trabajo del componente electrónico, la demanda de ventiladores o ineficiencia en el proceso puede llegar a convertirse en un gran problema. Es por ello que se decide realizar dos ensayos a potencias de trabajo convencionales con objeto de realizar un contraste adecuado de resultados entre los distintos sistemas de refrigeración.

3.4.3.1 Elementos utilizados

A diferencia de los ensayos anteriormente citados (3.4.1 y 3.4.2), en esta ocasión los únicos elementos que formarán el conjunto de refrigeración serán un ventilador común y un disipador de calor de aletas convencional en contacto con la pastilla de aluminio (3.2.2.1), con la misma resistencia eléctrica (3.2.2.2) y sonda de temperatura (3.2.2.3), ambas alojadas en su interior y conectadas con la fuente de alimentación (3.2.2.5).

En este sencillo sistema de refrigeración (Figura 3-30), al no consistir en un conjunto de fluidos realizando cambios de estado ni intercambios de temperatura, el único elemento de interés de medición será la pastilla de aluminio, acompañándose de una segunda sonda midiendo la temperatura ambiente.

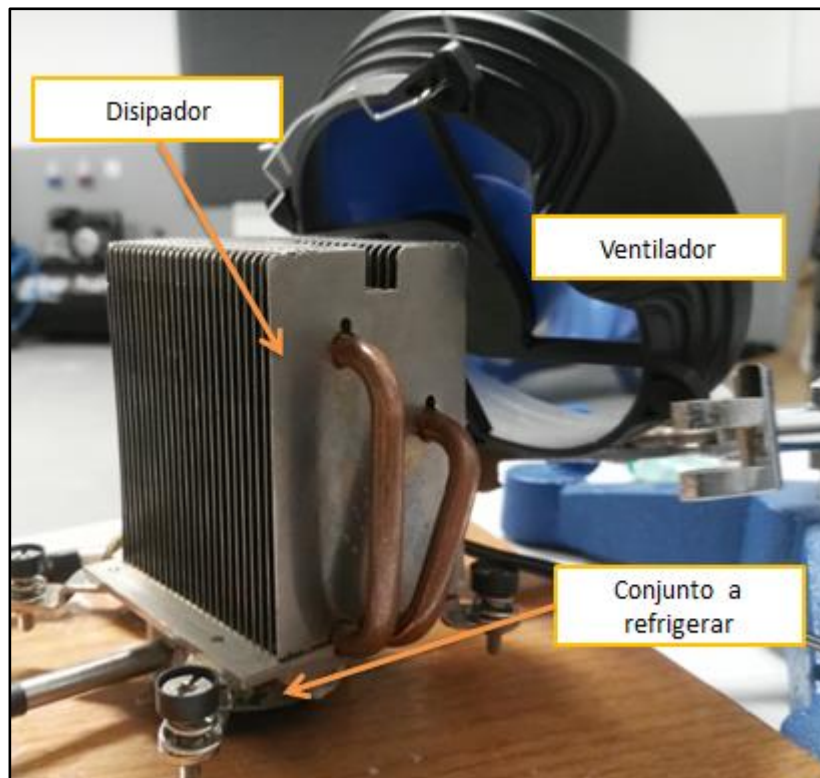


Figura 3-30 Elementos utilizados en los ensayos de refrigeración por aire.

3.4.3.2 Descripción del ensayo

Los ensayos realizados empleando el sistema de refrigeración por aire se desarrollan de igual manera que los ensayos anteriormente citados (3.4.1.2), exceptuando la alimentación del sistema y número de ensayos, decidiéndose realizar dos únicos ensayos a 55W y 100W debido al riesgo a alcanzar temperaturas excesivamente altas de trabajo.

3.4.4 Ensayos sobre un ordenador convencional

En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores (3.4.1, 3.4.2 y 3.4.3), se decide comenzar a experimentar sobre un ordenador convencional utilizando los sistemas de refrigeración anteriormente empleados. El objetivo principal es demostrar que los sistemas de refrigeración desarrollados empleando como fluido refrigerante los fluidos Novec, son directamente aplicables a ordenadores convencionales, no sólo consiguiendo reducir la temperatura de trabajo del sistema, sino fomentando un empleo más eficiente del equipo y un menor consumo de potencia.

Ante la finalidad de comparar y demostrar las ventajas del sistema de refrigeración basado en cambio de fase utilizando los fluidos Novec con respecto a los sistemas de refrigeración convencionales, se decide realizar dos ensayos independientes: un primer ensayo utilizando el sistema de refrigeración traído de serie por el componente electrónico (CPU), y un segundo ensayo aprovechando las propiedades del fluido Novec[®] 7000 con vacío (3.2.2.6.2), aplicando directamente el sistema de refrigeración en contacto con el componente electrónico.

3.4.4.1 Elementos utilizados

Según describimos anteriormente, se realizaron dos ensayos sobre el ordenador convencional:

- Un primer ensayo en el que se empleó el sistema de refrigeración incluido de serie por la CPU (Figura 3-31 parte izquierda).
- Un segundo ensayo, retirando previamente el sistema de refrigeración incluido de fábrica, en el que se emplearon los mismos elementos nombrados en la Tabla 3-2, utilizando como refrigerante el fluido Novec[®] 7000 y realizando previamente vacío (Figura 3-28).

La mayor diferencia de estos ensayos con respecto a los anteriormente realizados radica en el equipo a refrigerar, pues en lugar de simular el componente electrónico que se calienta en la CPU de un ordenador, se aplica directamente la refrigeración sobre el equipo (elemento 3 descrito en la Tabla 3-3), permitiéndose así obtener resultados finales sobre la aplicación del TFG a la realidad. Por lo tanto, debido al nuevo elemento a refrigerar, se prescinde de la utilización de una sonda de temperatura (3.2.2.3) puesto que ahora la medición de la temperatura del ordenador la hará él mismo, y la fuente de alimentación (3.2.2.5) pasa a funcionar únicamente como soporte de las sondas y registrador de temperaturas (3.2.2.5.1), ya que la tensión de trabajo la aportará el mismo ordenador.



Figura 3-31 Elementos utilizados en el ensayo sobre CPU.

3.4.4.1.1 Mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD

Al comenzar la realización de los ensayos sobre la CPU del ordenador utilizando el sistema de refrigeración desarrollado, se observa que la sujeción del sistema al componente electrónico resulta ser de vital importancia, debido a que un mal contacto sin la presión adecuada deriva a un registro de temperaturas en vano. Por ello, al no encontrar ningún tipo de sujeción adecuada del sistema ZM-WB2 GOLD a la CPU en el mercado, se decide mecanizar una mediante el programa NX (3.3.5).



Figura 3-32 Sistema de anclaje en la placa base.

Aprovechando la refrigeración incluida de serie del ordenador y su anclaje mediante cuatro tornillos a la placa base (Figura 3-32), se decide tomar medidas del conjunto y desarrollar el soporte utilizando el mismo sistema de sujeción, y así no realizar perforaciones innecesarias en el conjunto electrónico. Debido a la geometría cilíndrica con salida de dos tubos situados en su superficie del elemento ZM-WB2 Gold, se desarrolla un soporte con base rectangular y forma cilíndrica en la parte superior, el cual rodea por completo al sistema de refrigeración colocando una barra insertada transversalmente a través del mismo con objeto de ejercer una presión adecuada y evitar posibles movimientos e irregularidades en las mediciones. Finalmente, se observa el conjunto mecanizado del soporte realizado y empleado en los ensayos en la Figura 3-33.

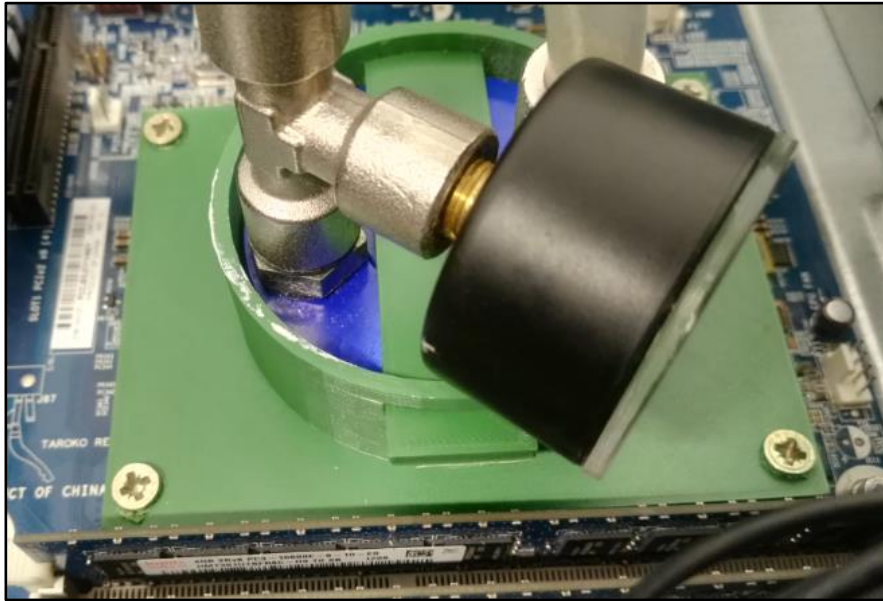


Figura 3-33 Ejemplo de empleo del conjunto mecanizado del soporte realizado del elemento ZM-WB2 GOLD.



Figura 3-34 Vista general durante el ensayo realizado sobre la CPU utilizando el fluido Novec[®] 7000.

3.4.4.2 Descripción del ensayo

Como se indica en la Tabla 3-1 Ensayos realizados.), se realizan dos ensayos distintos; un primer ensayo en el que se utilizaron los componentes de serie incorporados por el fabricante en la torre del sistema electrónico (Figura 3-31 parte izquierda), y un segundo ensayo aprovechando las características del sistema de refrigeración en vacío del fluido Novec[®] 7000 (Figura 3-31 parte derecha).

Tanto en el primer como en el segundo ensayo, el procedimiento efectuado es el siguiente:

- Una vez realizado el montaje adecuado, o en su defecto suponiendo el sistema de refrigeración incorporado de serie por el fabricante, se arranca el equipo.
- Al arrancarse el equipo, se ejecuta el programa Core Temp (3.3.3) de forma que comienzan a grabarse las características de trabajo del ordenador y de sus núcleos, tales como temperaturas y velocidades de operación, en un documento Excel (3.3.2).
- Habiéndose comenzado previamente la grabación de los datos de trabajo de los diferentes núcleos, se ejecuta el programa IntelBurn Test (3.3.4), el cual somete a los distintos núcleos a operar a su máximo rendimiento, obteniéndose en pocos minutos un aumento de temperaturas del sistema considerable.
- Tras dar por concluido el ensayo, se cierra primeramente el programa Core Temp (3.3.3) para detener la grabación de resultados, y finalmente se cierra el programa IntelBurn Test (3.3.4) para detener el funcionamiento a pleno rendimiento del equipo.

4 RESULTADOS

4.1 Introducción a los resultados

En el presente Capítulo se detallarán y analizarán los resultados obtenidos en los ensayos descritos en el anterior Capítulo 3, así como se validarán numéricamente los datos obtenidos mediante los conceptos teóricos vistos en el apartado 1.4. Igualmente y para una mejor comprensión, se mostrarán los datos finales con representaciones visuales. Finalmente se expondrán las conclusiones obtenidas fruto del análisis de dichos resultados y las posibles consecuencias que los mismos puedan provocar en los sistemas de refrigeración actuales y futuros.

4.2 Características a evaluar

4.2.1 Temperaturas registradas por las sondas de temperatura

Uno de los factores más importantes a contrastar entre los diversos ensayos y procedimientos utilizados, es la temperatura medida por cada una de las sondas de temperatura (3.2.2.3) con el paso del tiempo, indicando a qué temperatura final opera el equipo electrónico tras la convergencia de las temperaturas al alcanzar el equilibrio térmico. Estas temperaturas indicarán el rendimiento bajo sobrecalentamiento del sistema, así como las temperaturas a las que se somete el sistema de refrigeración.

4.2.2 Consumo eléctrico

Se tendrá en cuenta positivamente cuanto menor sea el consumo eléctrico asociado al sistema de refrigeración utilizado. El concepto consumo eléctrico hace referencia a todo aquello que implique utilizar energía eléctrica para realizar disipación de calor, desde un ventilador auxiliar hasta un equipo de climatización. Si el sistema de refrigeración consigue ligeramente disminuir la temperatura de trabajo del componente electrónico, pero sin embargo aumenta el consumo eléctrico asociado, quizás el sistema no sea rentable u óptimo para ese componente en concreto. Por el contrario, si el sistema es capaz de hacer funcionar al componente electrónico a menores temperaturas y además el consumo eléctrico asociado es inexistente, posiblemente se haya encontrado la solución adecuada.

4.2.3 Tiempo de convergencia al equilibrio térmico

El tiempo de convergencia al equilibrio térmico es el tiempo que necesita el sistema de refrigeración para alcanzar el equilibrio térmico. Se entiende por equilibrio térmico al momento en el que el sistema de refrigeración mantiene las temperaturas de funcionamiento del sistema constantes, consiguiendo mantener el equipo electrónico a una temperatura determinada con el paso del tiempo.

4.2.4 Aplicabilidad

La facilidad de aplicación del sistema de refrigeración se define como la sencillez de instalación y operación del sistema de refrigeración empleado. Se considera que hay sistemas de refrigeración fáciles de aplicar y otros no tanto dependiendo de su localización, empleo de materiales, tiempo de instalación y mantenimiento, accesibilidad y demás factores que pueden llegar a replantearse la instalación de un sistema de refrigeración concreto u otro.

4.3 Resultados obtenidos

Los resultados de los ensayos se obtuvieron mediante la medición constante de las temperaturas que experimentan los procesos gracias al empleo de 4 sondas de temperatura (3.2.2.3) ubicadas en:

- Ajena al sistema midiendo la temperatura ambiente.
- En el interior del radiador (3.2.2.7). Una sonda en la base midiendo la temperatura del fluido refrigerante utilizado y otra en la parte superior para medir la temperatura del agua destilada.
- En el interior del elemento electrónico a simular (3.2.2.1), con objeto de medir la temperatura de trabajo del dispositivo electrónico.

Cabe destacar que en caso de utilizarse sólo agua destilada como fluido refrigerante, no hubiera sido necesaria la utilización de la sonda en la base del radiador, sin embargo se dejó colocada para contrastar las temperaturas entre la base y la parte superior del sistema de refrigeración. Igualmente en el ensayo efectuado utilizando el ordenador en lugar del elemento electrónico simulado (3.4.3), la temperatura de trabajo del dispositivo la proporcionó el propio ordenador mediante su lectura a través del programa Core Temp (3.3.3) lo que permitió prescindir de una sonda.

Tras la medición de resultados, los datos fueron grabados por el registrador de temperaturas (3.2.2.5.1) y enviados mediante conexión USB al ordenador, donde fueron procesados y capturados para su posterior análisis.

Se incluyen en el Anexo I (Resultados de los ensayos), todas las gráficas realizadas con los valores obtenidos en cada ensayo para cada fluido a cada potencia.

4.3.1 Ensayos realizados con fluido Novec[®] 649

Como ya se describió en el apartado 3.4.1.2, tras haber concluido los ensayos previstos a diferentes tensiones de alimentación utilizando el fluido Novec[®] 649 como fluido refrigerante, se obtuvieron los resultados que se detallan en los subapartados 4.3.1.1 y 4.3.1.2 siguientes, donde se muestran la variación de la temperatura de cada sonda con respecto al tiempo, el tiempo empleado para lograr la convergencia del sistema y la potencia aplicada de alimentación del componente electrónico.

4.3.1.1 Ensayos realizados sin vacío

Como se puede observar en la Tabla 4-1 y Figura 4-3, a mayor potencia de alimentación del componente electrónico, el sistema de refrigeración converge asintóticamente a 90° con el paso del tiempo a una temperatura mayor. Se debe resaltar que la duración de los ensayos no sólo depende de la potencia de alimentación (generalmente a mayor potencia de alimentación se necesitará más tiempo para llegar a la temperatura de equilibrio), sino de la inercia térmica de los elementos contenidos en el sistema de refrigeración, y no tanto de las condiciones externas tales como el funcionamiento de los ventiladores y temperatura del medio ambiente.

Las temperaturas de convergencia observadas para cada ensayo así como el tiempo empleado para cada potencia de alimentación son:

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA (°C)			TIEMPO DE CONVERGENCIA (minutos)
	Pastilla	Novec	Agua	
55	55	31.10	23.30	54
100	73.5	36.60	24.30	76
150	85	43.80	27.30	97
200	94.50	49.10	29.60	106
250	105.50	53.70	34.30	103
300	114.70	55.40	35.60	84

Tabla 4-1 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 649 sin realizar vacío.

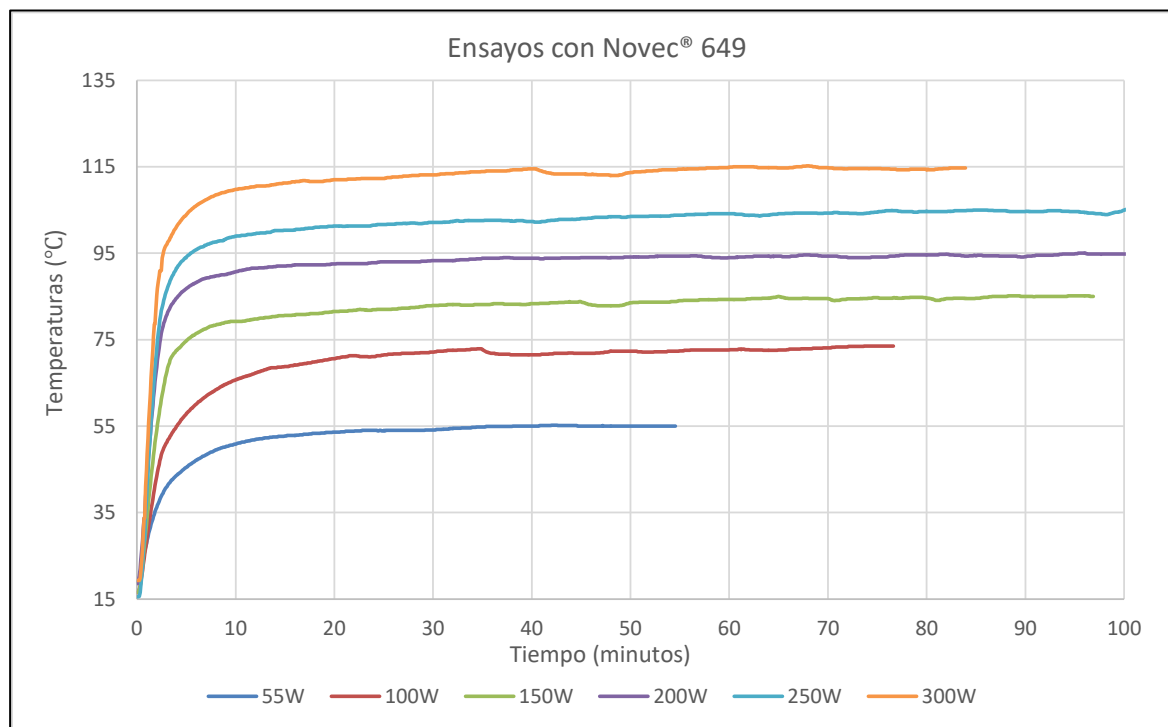


Figura 4-1 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 649 a presión atmosférica a distintas potencias.

4.3.1.2 Ensayos realizados con vacío

Como se puede observar en la Figura 4-2, las condiciones a la que converge el sistema realizando vacío distan mucho de las mismas cuando no se realiza dicho vacío, ya que se produce una reducción de temperaturas en el equilibrio térmico con respecto al sistema anterior de entre 10°C y 20°C. Esto, es debido a que al descender la presión, desciende la temperatura de evaporación del fluido Novec, derivando a una refrigeración de la resistencia eléctrica a menor temperatura y produciéndose el equilibrio térmico a una temperatura inferior.

Además, se observa en la gráfica realizada para cada ensayo a cada potencia que se detallan en el Anexo I (Resultados de los ensayos), cómo la temperatura del Novec y del agua destilada evolucionan

casi a la par, debido a la gran transmisión de calor producida en el interior del radiador. Este procedimiento realizado permite operar de una forma mucho más eficiente que si no se realizara el vacío previo. Estos datos nos permiten llegar a la conclusión de que realizando un vacío previo en el sistema de refrigeración se consigue una mejor refrigeración para todas las potencias aplicadas.

Las temperaturas de convergencia observadas para cada ensayo así como el tiempo empleado para cada potencia de alimentación son los siguientes:

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA (°C)			TIEMPO DE CONVERGENCIA (minutos)
	Pastilla	Novec	Agua	
55	48	29.90	23.20	57
100	55.10	32.60	26.30	79
150	65	34.30	30.00	84

Tabla 4-2 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 649 con vacío.

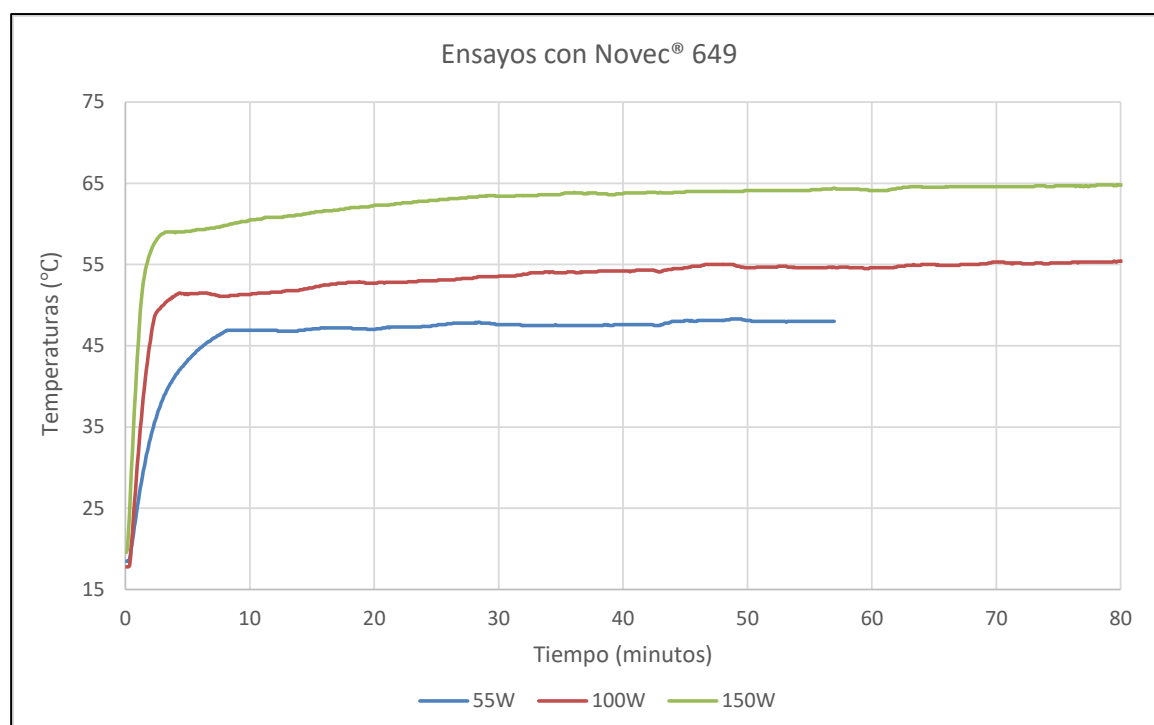


Figura 4-2 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 649 a distintas potencias con vacío.

4.3.2 Ensayos realizados con fluido Novec® 7000

Al igual que en los ensayos efectuados con el fluido Novec® 649, descrito anteriormente en el apartado 3.4.1.2, tras haber concluido los ensayos previstos a diferentes tensiones de alimentación utilizando el fluido Novec® 7000 como refrigerante, se obtuvieron los resultados que se detallan en los subapartados 4.3.2.1 y 4.3.2.2 siguientes, donde se muestran la variación de la temperatura de cada sonda con respecto al tiempo, el tiempo empleado para lograr la convergencia del sistema y la potencia aplicada de alimentación del componente electrónico.

4.3.2.1 Ensayos realizados sin vacío

Como se puede observar en la Figura 4-3, a mayor potencia de alimentación del componente electrónico, el sistema de refrigeración converge asintóticamente a 90° con el paso del tiempo a una temperatura mayor, al igual que los ensayos realizados anteriormente con el fluido Novec® 649.

Se observa como con la utilización del nuevo fluido, que debido a sus características (3.2.2.6.2), desciende la temperatura de convergencia considerablemente respecto a los ensayos realizados con el fluido Novec® 649 en las mismas condiciones, incluso llegando a mejorar los resultados obtenidos en la realización de los ensayos a vacío con el fluido anterior. Además, disminuyen ligeramente los tiempos de convergencia al equilibrio térmico, indicando finalmente que el procedimiento utilizado con este fluido se vuelve más rápido y eficiente en todo su margen de potencias estudiado.

Las temperaturas de convergencia observadas para cada ensayo así como el tiempo empleado para cada potencia de alimentación son los siguientes:

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA (°C)			TIEMPO DE CONVERGENCIA (minutos)
	Pastilla	Novec	Agua	
55	46	29.10	21	74
100	57.50	37.10	24.80	76
150	63.80	43	29.10	72
200	70.50	45.60	33.80	67
250	76.10	45.80	36.50	82
300	82.50	47.50	40	72

Tabla 4-3 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 7000 sin realizar vacío.

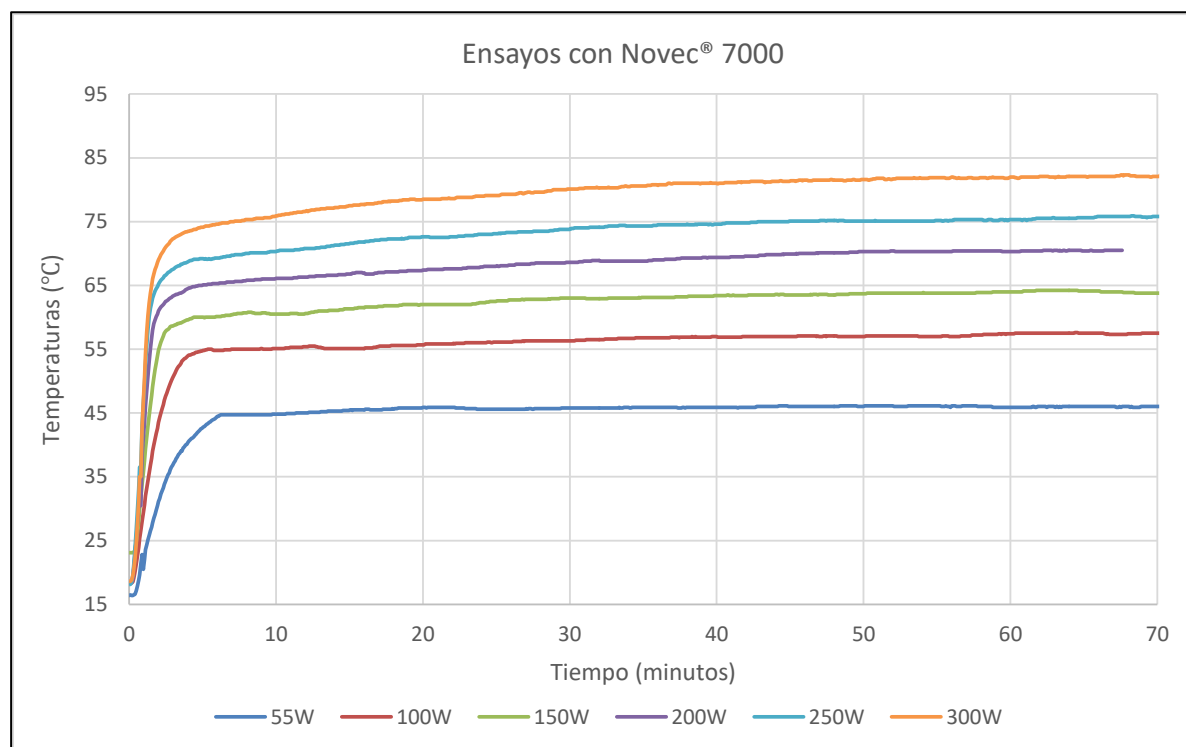


Figura 4-3 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 7000 a presión atmosférica a distintas potencias.

4.3.2.2 Ensayos realizados con vacío

Como se puede observar en la Figura 4-4 y en los datos reflejados en la Tabla 4-4, todos los ensayos realizados a vacío, utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec® 7000, resultan ser un éxito con respecto a los anteriores realizados con otros tipos de fluidos y en otras condiciones de trabajo. No sólo se ha conseguido disminuir el tiempo total del ensayo, obteniéndose una convergencia térmica excelente en un tiempo óptimo, sino que la temperatura a la cual se encuentra el equilibrio térmico llega a disminuir hasta 40°C con respecto al mismo ensayo realizado con el fluido Novec® 649 a 300W de potencia.

Es por ello que el sistema de refrigeración utilizando como refrigerante el fluido Novec® 7000, habiéndose realizado un vacío previo, permite disminuir la temperatura de vaporación del fluido refrigerante, llegando a conseguir converger al equilibrio térmico a muy baja temperatura con respecto al resto de sistemas de refrigeración empleados y en un menor tiempo, y lo convierte en el mejor sistema de refrigeración estudiado.

Las temperaturas de convergencia observadas para cada ensayo así como el tiempo empleado para cada potencia de alimentación son los siguientes:

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA (°C)			TIEMPO DE CONVERGENCIA (minutos)
	Pastilla	Novec	Agua	
55	34.90	22	21.10	38
100	41.50	26.30	26.20	34
150	48.60	29.30	29.10	50
200	54.70	36.80	36.60	62
250	62.40	34.40	34.10	71
300	70.00	37.80	37.50	58

Tabla 4-4 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias del fluido Novec® 7000 con vacío.

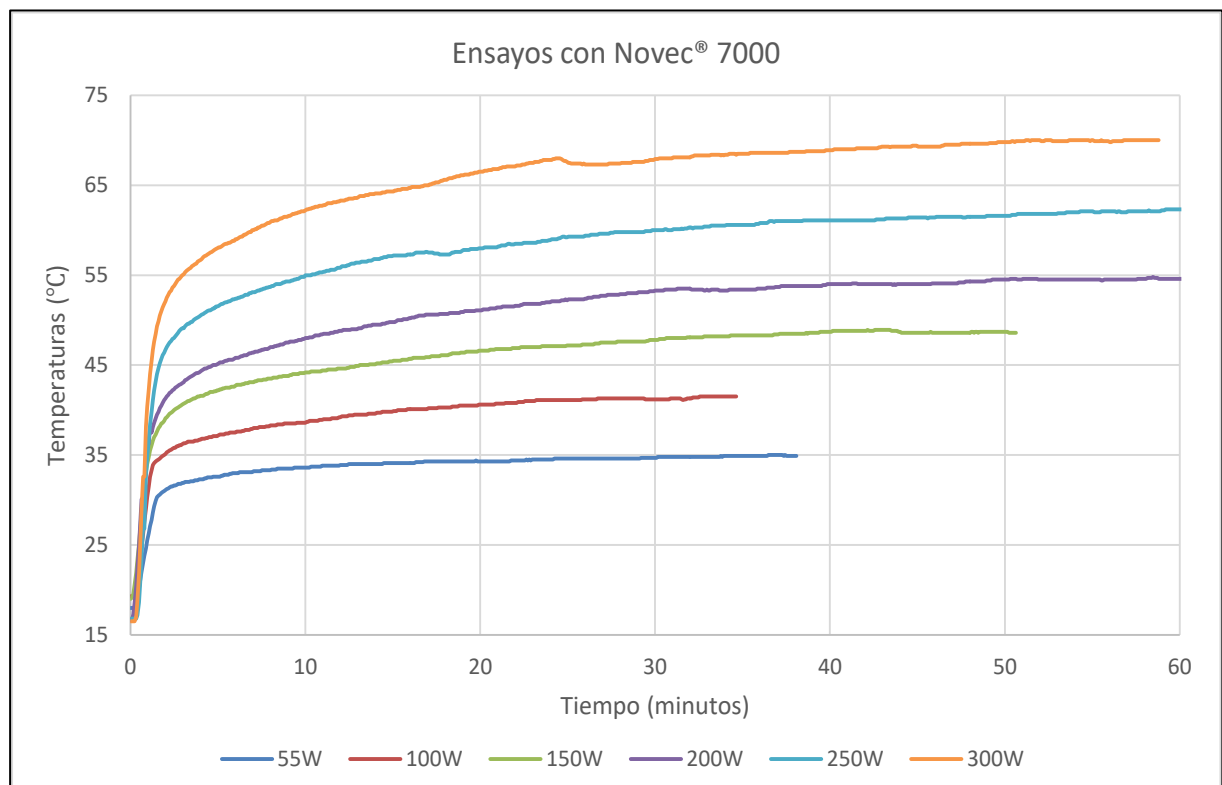


Figura 4-4 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con fluido Novec® 7000 a distintas potencias con vacío.

4.3.3 Ensayos realizados con agua destilada

Cabe resaltar que realmente en las especificaciones del fabricante del equipo de refrigeración utilizado (3.2.2.7) se cita textualmente: “utilizar como fluido refrigerante agua corriente o en su defecto agua destilada”. Al objeto de obtener conclusiones más acertadas y contrastar los resultados obtenidos anteriormente empleando los fluidos de trabajo Novec® 7000 y Novec® 649, se decide efectuar tres ensayos a las potencias de 55W, 100W y 150W utilizando como fluido refrigerante agua destilada.

Tras la realización de dichos ensayos se obtienen los siguientes resultados:

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA (°C)			TIEMPO DE CONVERGENCIA (horas y min)
	Pastilla	Agua parte sup.	Agua parte inf.	
55	42.2	35.8	35.9	4 h 41 min
100	55.1	43.2	43.3	4 h 15 min
150	65.4	47.3	47.2	3 h 48 min

Tabla 4-5 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos a distintas potencias utilizando agua destilada como fluido de trabajo.

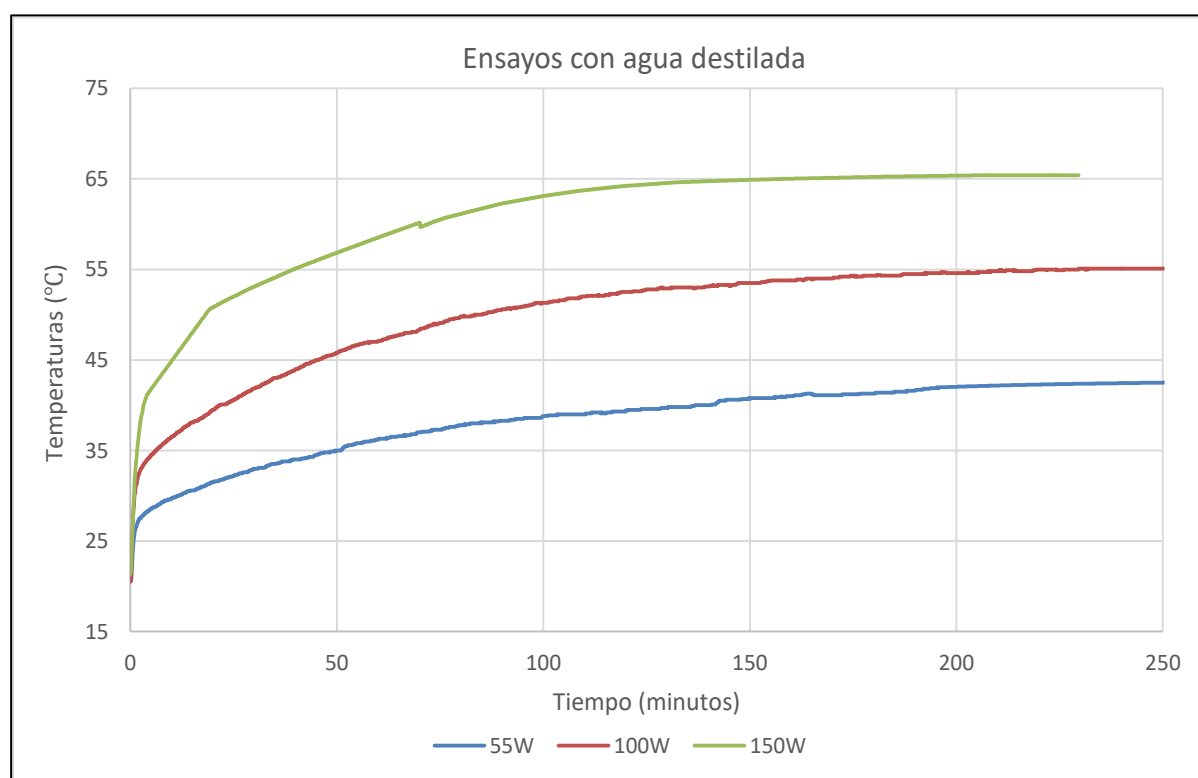


Figura 4-5 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con agua destilada a distintas potencias.

Curiosamente se observa que a pesar de haberse empleado en ensayos anteriores una gran cantidad de agua junto con los fluidos refrigerantes Novec, sin embargo, cuando se realizan dichos ensayos utilizando solamente como fluido refrigerante agua destilada, los resultados obtenidos (Tabla 4-5) demuestran que el tiempo de convergencia del sistema aumenta considerablemente debido a la inercia térmica. Igualmente el estudio de estos resultados nos permite observar que no sólo los sistemas de refrigeración que emplean fluidos Novec® 7000 y Novec® 649 reaccionan más rápidamente y amortiguan mejor las subidas bruscas de potencia, sino que se demuestra que a mayor potencia mejor se comportan los sistemas de refrigeración anteriormente empleados con respecto a los que utilizan únicamente agua destilada.

4.3.4 Ensayos realizados con refrigeración por aire

Al concluir los ensayos citados en el apartado 3.4.3 a las tensiones de alimentación de 55W y 100W, se obtienen los resultados que se detallan a continuación, mostrándose en cada gráfica la variación de la temperatura de cada sonda con respecto al tiempo, el tiempo empleado para lograr la convergencia del sistema, y la potencia aplicada de alimentación del componente electrónico.

POTENCIAS DE ALIMENTACION (W)	TEMPERATURA PASTILLA (°C)	TIEMPO DE CONVERGENCIA (minutos)
55	44	9
100	70.8	10

Tabla 4-6 Tiempo de convergencia y temperaturas en el equilibrio térmico en los ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire a distintas potencias.

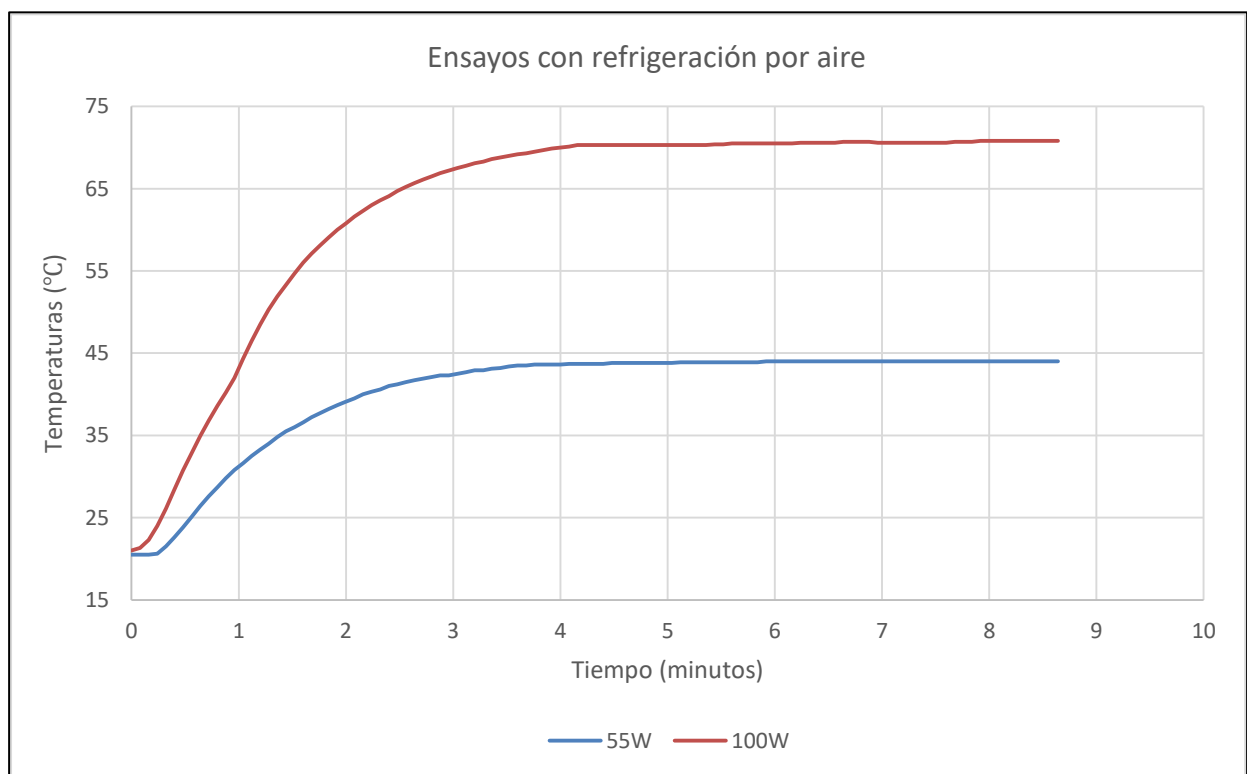


Figura 4-6 Temperatura de la resistencia eléctrica en los ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire a distintas potencias.

A la vista de los resultados obtenidos en este ensayo (Tabla 4-6) se puede llegar a concluir que un simple disipador de calor y un ventilador pueden llegar a realizar una refrigeración aceptable en el componente electrónico, y en cierta medida es cierto, llegando a igualar casi los resultados obtenidos empleando para ello el sistema de refrigeración por cambio de fase utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec® 649 para las potencia de 55W y 100W sin realizar vacío. Sin embargo, una vez realizado el vacío en el sistema refrigerante, incluso en los resultados obtenidos empleando el fluido Novec® 649 (Tabla 4-2), se observa que la temperatura final de trabajo del componente electrónico es, con creces, menor que la obtenida en los ensayos mediante refrigeración por aire, incluso prescindiendo de elementos electrónicos adicionales, como es el caso de los ventiladores, con en el consecuente ahorro energético.

4.3.5 Ensayos sobre un ordenador convencional

Tras haber realizado todos los ensayos citados anteriormente y estudiados los resultados obtenidos, se decide experimentar sobre un ordenador convencional realizando dos tipos de ensayos diferentes bajo las mismas condiciones: un primer ensayo utilizando el sistema de refrigeración instalado de serie por el componente electrónico (CPU), y un segundo ensayo aprovechando las propiedades del fluido Novec® 7000 con vacío (3.2.2.6.2), aplicando directamente el sistema de refrigeración en contacto con el componente electrónico. Ambos ensayos se realizaron utilizando los programas Core Temp (3.3.3) e IntelBurn Test (3.3.4), de forma que el equipo es sometido a una prueba de estrés, obteniendo un registro de temperaturas cada diez segundos de los cuatro núcleos del procesador al 100% de carga de trabajo y máxima potencia. A continuación se detallan los resultados obtenidos en cada ensayo, indicando el tipo de sistema de refrigeración utilizado sujeto a la máxima potencia de trabajo (86W), temperaturas máximas obtenidas en cada núcleo y tiempo de ejecución del ensayo:

TIPO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EMPLEADO	TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS (°C)				TIEMPO DE ENSAYO (minutos)
	Núcleo 1	Núcleo 2	Núcleo 3	Núcleo 4	
Serie	76	81	82	78	10
Novec® 7000 con vacío	63	65	66	62	10

Tabla 4-7 Temperaturas máximas registradas en los cuatro núcleos de la CPU operando a la máxima potencia utilizando los distintos sistemas de refrigeración.

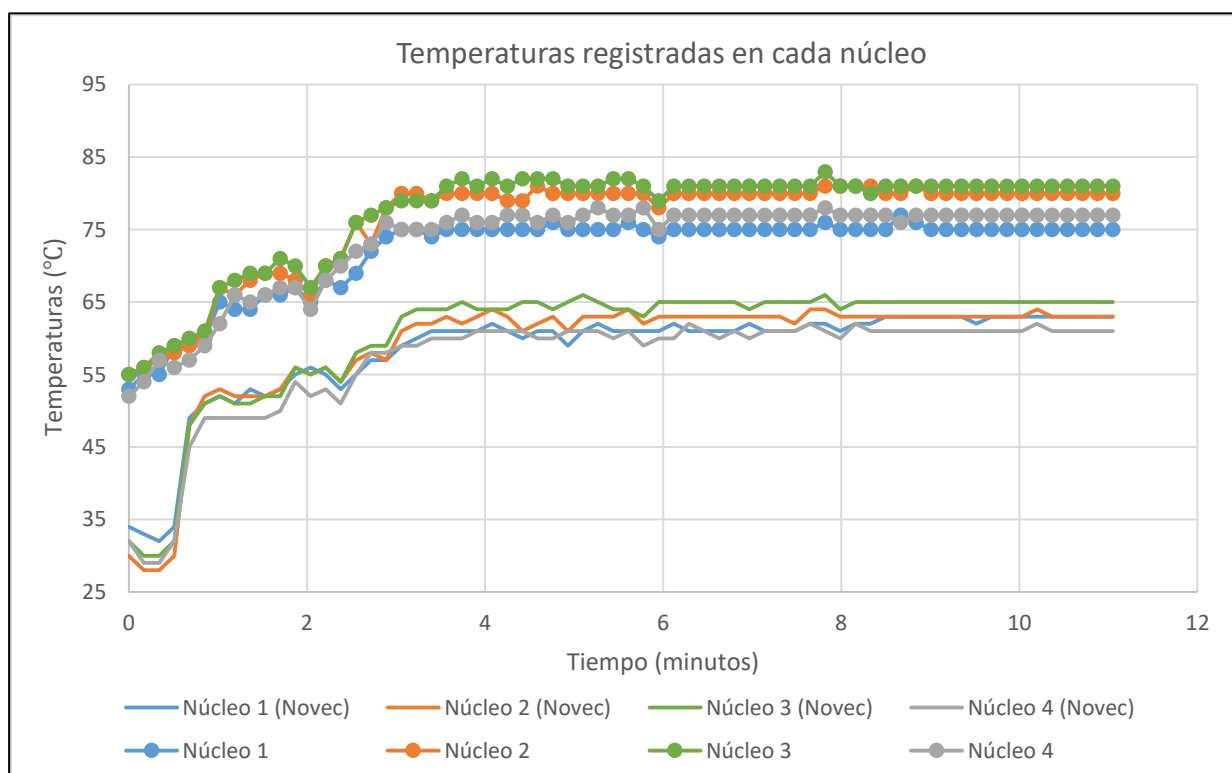


Figura 4-7 Temperaturas máximas registradas en los cuatro núcleos operando a la máxima potencia utilizando los distintos sistemas de refrigeración.

Bajo los resultados obtenidos expresados en la Tabla 4-7 y representados en la Figura 4-7, se puede observar que el sistema de refrigeración utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 7000 consigue llegar a disminuir la temperatura de los cuatro núcleos alrededor de 15 °C operando éstos a la máxima potencia y carga, demostrando que no sólo permite disminuir considerablemente la temperatura de trabajo del sistema, sino que además, realiza dicho proceso sin ayuda de los ventiladores interiores del equipo, siendo totalmente autónomo y eficiente. Además debemos destacar que este margen de temperaturas entre ambos sistemas de refrigeración se espera que sea aún mayor cuanto mayor sea la potencia de trabajo del sistema.

4.4 Comparativa entre sistemas de refrigeración

Con objeto de realizar un adecuado estudio comparativo entre los distintos sistemas de refrigeración empleados en los ensayos anteriormente descritos, se procederá a describir las características principales observadas en cada sistema así como defectos asociados, resumiendo toda la información en una tabla final la cual servirá como instrumento para realizar un análisis multicriterio, que podrá ser utilizado posteriormente para apoyar la toma de decisiones en la selección de la solución más conveniente. Dicho procedimiento de análisis multicriterio o análisis objetivo es un auxilio metodológico a la toma de decisiones, es decir, está totalmente condicionado bajo unos pesos elegidos por el redactor de dicho trabajo, no existiendo una opinión inequívoca sobre la toma de decisiones llevada a cabo. Sin embargo, se considera que dicho análisis realizado es bastante aproximado, indicando de forma precisa y justificada la solución elegida.

- Ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire: Este sistema permite obtener una refrigeración de equipos electrónicos aceptable cuando la potencia de alimentación es pequeña. Es decir, a mayor potencia de alimentación del componente electrónico, se realiza una peor disipación de calor por parte del sistema de refrigeración. Además, el sistema tiene un gran inconveniente, y es que no sólo el componente electrónico tiene un mayor consumo asociado debido a la ineficiencia del sistema de refrigeración, sino que para garantizar una temperatura de operación aceptable hace falta la instalación de ventiladores y demás componentes, incrementando el consumo eléctrico del sistema.
- Ensayos realizados con el sistema de refrigeración diseñado y con agua destilada como único fluido refrigerante: Gracias al empleo de este sistema, implementando la refrigeración líquida, se consiguen obtener temperaturas de trabajo del componente electrónico aceptables, comportándose mejor que el sistema de refrigeración por aire. Además, este sistema consigue alcanzar un tiempo de convergencia hasta alcanzar el equilibrio térmico bastante amplio, indicando ser un buen amortiguador ante cambios bruscos de potencia. Otro inconveniente asociado es que para realizar una mejor disipación de calor, es necesaria la instalación de una bomba de agua en el interior del refrigerador, lo cual hace aumentar el consumo eléctrico asociado, así como la aparición de alguna avería en el sistema de refrigeración supondría la pérdida del equipo, debido a que el fluido no posee propiedades dieléctricas.
- Ensayos realizados con el sistema de refrigeración diseñado y con fluido Novec[®] 649 como fluido refrigerante: Este sistema de refrigeración puede emplearse bajo dos condiciones de trabajo;
 - ✓ una primera condición en la que se opera sin haber realizado previamente vacío en su interior, cuyos resultados llegan a ser peores que los registrados bajo la refrigeración con agua destiladas, pero no teniendo ningún consumo eléctrico asociado salvo el del componente electrónico,

✓ y una segunda condición de trabajo habiendo realizado previamente vacío en su interior, consiguiendo disminuir las temperaturas del componente electrónico hasta equipararlas aproximadamente a las obtenidas en el sistema de refrigeración con agua destilada.

- Ensayos realizados con el sistema de refrigeración diseñado y con fluido Novec® 7000 como fluido refrigerante: Sin lugar a dudas a mayor potencia de alimentación del componente electrónico mejora la refrigeración realizada en el componente, llegando a superar los datos obtenidos en todos los demás sistemas de refrigeración a partir de 100W de alimentación. Una vez realizado vacío en su interior, se llegan a reducir las temperaturas hasta 20°C, superando a todos los sistemas de refrigeración en todas las potencias de trabajo, sin ningún consumo eléctrico asociado salvo el del componente electrónico.

A continuación se procede a realizar un análisis multicriterio definiendo cuatro posibles soluciones y cuatro parámetros a evaluar ya nombrados previamente en el apartado 4.2, a los cuales se les asignará su respectivo peso propuesto para dicho análisis multicriterio. Para ello, se ponderan los parámetros a evaluar del uno al cuatro, los cuales se multiplican por la solución elegida distribuidas entre un valor de cero a tres, sumándose verticalmente dichas operaciones y obteniéndose finalmente la ponderación de cada sistema de refrigeración:

PARÁMETROS A EVALUAR	PESO	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			
		Aire	Agua	Novec® 649	Novec® 7000
TEMPERATURAS	4	1	2	2	3
POCO CONSUMO	3	0	1	3	3
APLICABILIDAD	2	3	1	2	2
TIEMPO DE EQUILIBRIO	1	0	3	2	2
TOTAL		10	11	23	27

Tabla 4-8 Análisis multicriterio de los distintos sistemas de refrigeración estudiados.

Como se observa en la Tabla 4-8, el sistema de refrigeración con mayor ponderación es el sistema de refrigeración utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec® 7000, el cual tanto con vacío como sin él, se comporta notablemente mejor que el resto de sistemas de refrigeración, implicando cero consumo eléctrico adicional al generado por el componente electrónico y siendo aplicable a todo tipo de sistemas de procesamiento debido a su propiedad dieléctrica, siendo por lo tanto, el sistema de refrigeración más adecuado para aplicación en componentes electrónicos con respecto al resto de sistemas estudiados.

4.5 Modelo de predicción numérico

Intentando contrastar los resultados obtenidos de los distintos ensayos y aportar un fundamento teórico a los procesos ocurridos en el sistema de refrigeración, se decide crear una hoja de cálculo en Excel (3.3.2) que sirva de modelo de predicción numérico de las temperaturas en los distintos procesos ocurridos en el sistema de refrigeración desarrollado. Se busca así desarrollar una herramienta de trabajo cómoda y rápida que permita verificar los resultados obtenidos en los distintos ensayos así como predecir el comportamiento del sistema al ser sometido a distintas condiciones de trabajo y

empleo de elementos, como pueden ser aumentar o disminuir la tensión de alimentación o incorporar disipadores de mayor superficie o coeficiente de convección.

Debido a la composición del sistema de refrigeración y elementos comunes empleados, se divide el sistema en cuatro procesos independientes (Figura 4-8), para los cuáles se rige una ecuación distinta de transferencia de calor. A su vez, los cuatro procesos están relacionados entre ellos bajo distintas condiciones, consiguiendo así correlacionar las incógnitas definidas a lo largo del modelo de predicción en un sistema de ecuaciones resuelto matricialmente. Los procesos serán numerados del 1 al 4, produciéndose secuencialmente una absorción de calor y entrega al proceso siguiente.

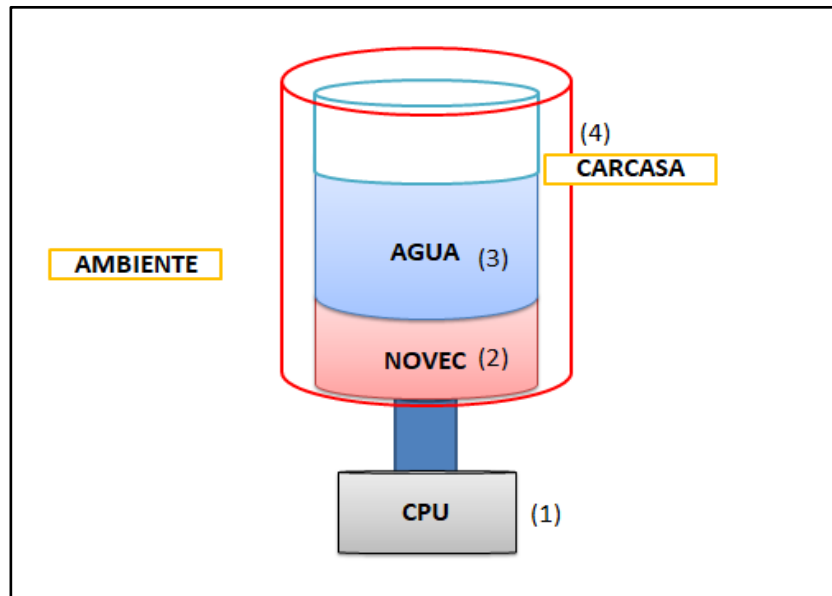


Figura 4-8 Definición y numeración de los procesos que intervienen en el sistema de refrigeración.

En los cuatro procesos se parte de la Ecuación 1-2, en la cual se define que con objeto de realizar un incremento de temperatura en un proceso, tiene que haber sucedido un intercambio de energía previo durante un intervalo de tiempo, así como se relacionan entre ellos mediante la Ecuación 1-12 de Newton, debido a que la transferencia de calor entre los procesos mayoritariamente se rige bajo convección. El coeficiente de convección $h \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$ se define para cada tipo de fluido empleado en cada proceso con su correspondiente subíndice, así como se utiliza un valor distinto asociado de calor específico $c_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$ utilizado en cada proceso. Finalmente se entiende por $(T_i - T_i^0)$ a la diferencia de temperaturas regida en el procesos entre un instante de medición y su anterior.

De esta forma, los 4 procesos definidos con sus ecuaciones son:

(1) CPU:

$$(\dot{Q}_{e1} - \dot{Q}_{s1})\Delta t = m_1 c_{p1} (T_1 - T_1^0)$$

Ecuación 4-1 Proceso regido en la CPU.

- $\dot{Q}_{s1} = h_1 A_{1-2} (T_1 - T_2)$
- $\dot{Q}_{e1}$ = potencia de alimentación inicial (dato)
- m_1 = masa de la CPU (dato)

(2) Novec:

$$(\dot{Q}_{e2} - \dot{Q}_{s2})\Delta t = m_2 c_{p2}(T_2 - T_2^0)$$

Ecuación 4-2 Proceso regido en el fluido Novec.

- $\dot{Q}_{e2} = \dot{Q}_{s1}$
- $\dot{Q}_{s2} = h_2 A_{2-3}(T_2 - T_3)$
- $m_2 = \text{masa de fluido Novec (dato)}$

(3) Agua:

$$(\dot{Q}_{e3} - \dot{Q}_{s3})\Delta t = m_3 c_{p3}(T_3 - T_3^0)$$

Ecuación 4-3 Proceso regido en el Agua.

- $\dot{Q}_{e3} = \dot{Q}_{s2}$
- $\dot{Q}_{s3} = h_3 A_{3-4}(T_3 - T_4)$
- $m_3 = \text{masa de fluido Agua (dato)}$

(4) Carcasa:

$$(\dot{Q}_{e4} - \dot{Q}_{s4})\Delta t = m_4 c_{p4}(T_4 - T_4^0)$$

Ecuación 4-4 Proceso regido en la Carcasa.

- $\dot{Q}_{e4} = \dot{Q}_{s3}$
- $\dot{Q}_{s4} = h_4 A_{4-ambiente}(T_4 - T_{ambiente})$
- $m_4 = \text{masa de la Carcasa (dato)}$

Sin embargo, se observa que estas ecuaciones todavía no están completas, puesto que serían ciertas únicamente al suponer que todo el fluido Novec realiza el cambio de fase en la parte en la que está situado el fluido, sin interaccionar con el agua. La realidad es que desde que está en contacto con la CPU, el fluido comienza a evaporarse en mayor o menor medida dependiendo la temperatura del componente electrónico, llegando a transmitir calor directamente al agua en forma de vapor para luego retornar cuando se condensa. De esta forma, se define una relación directa entre los estados (1) y (3) proporcionales a un coeficiente λ el cual varía según la temperatura del fluido Novec de la forma:

$$\lambda = \frac{T_2^0 - T_{inicial}}{T_{evap\ fluido} - T_{inicial}}$$

Ecuación 4-5 Definición de coeficiente λ

- $T_{evap\ fluido}$ es la temperatura a la que evapora el fluido Novec (dato)
- $T_0 = \text{temperatura inicial del fluido}$
- $T_2^0 = \text{temperatura del fluido en el instante anterior}$

De esta forma:

- Si $T_2^0 = T_{inicial}$ por lo tanto $\lambda = 0$ y todo el calor pasa a de (1) a (2)
- Si $T_2^0 = T_{evap\ fluido}$ por lo tanto $\lambda = 1$ y todo el calor pasa a de (1) a (3) directamente

Por lo que:

- $\dot{Q}_{s1} = h_1 A_{1-2}(T_1 - T_2) \rightarrow \dot{Q}_{e2} = (1 - \lambda)h_1 A_{1-2}(T_1 - T_2)$
- $\dot{Q}_{s1} = h_1 A_{1-2}(T_1 - T_2) \rightarrow \dot{Q}_{e3} = (\lambda)h_1 A_{1-2}(T_1 - T_2) + h_2 A_{2-3}(T_2 - T_3)$

Tras haber realizado la definición de todas las ecuaciones que intervienen en los procesos con sus correspondientes coeficientes de trabajo, el objetivo es averiguar las temperaturas T_1, T_2, T_3 y T_4 utilizando para ello el método de Cramer por el que se define [49]:

$$[\alpha]x[T] = [B] \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} \rightarrow T_i = \frac{\det[\alpha/B]}{\det[\alpha]}$$

Aplicando la regla de Cramer en el sistema en relación a la primera ecuación:

$$(\dot{Q}_{e1} - \dot{Q}_{s1})\Delta t = m_1 c_{p1}(T_1 - T_1^0) \rightarrow$$

$$T_1 \left(-h_1 A_{1-2} - \frac{m_1 c_{p1}}{\Delta t} \right) + T_2 (h_1 A_{1-2}) = -\frac{m_1 c_{p1} T_1^0}{\Delta t} - \dot{Q}_{e1}$$

Ecuación 4-6 Desarrollo del proceso regido en la CPU.

Pudiéndose expresar de la forma siguiente, siendo los valores conocidos sustituidos por los coeficientes α_{ij} y β_i , tal que:

$$T_1 \alpha_{11} + T_2 \alpha_{12} + 0 + 0 = \beta_1$$

Ecuación 4-7 Proceso regido en la CPU sustituido.

Y realizando el mismo proceso en todas las ecuaciones anteriormente explicadas se obtiene un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas de la forma:

$$\begin{aligned} T_1 \alpha_{11} + T_2 \alpha_{12} + 0 + 0 &= \beta_1 \\ T_1 \alpha_{21} + T_2 \alpha_{22} + T_3 \alpha_{23} + 0 &= \beta_2 \\ T_1 \alpha_{31} + T_2 \alpha_{32} + T_3 \alpha_{33} + T_4 \alpha_{34} &= \beta_3 \\ 0 + 0 + T_3 \alpha_{43} + T_4 \alpha_{44} &= \beta_4 \end{aligned}$$

Ecuación 4-8 Sistema de ecuaciones final.

Resolviéndose finalmente el sistema de ecuaciones por Cramer y obteniendo las temperaturas T_1, T_2, T_3 y T_4 mediante Excel (3.3.2). Los resultados obtenidos por el modelo de predicción dependerá de los coeficientes utilizados y parámetros impuestos como datos en las ecuaciones, siendo muchos de ellos estimaciones, por lo que el modelo se aproxima razonablemente bien al comportamiento observado en los ensayos, como se puede comprobar en la Figura 4-9.

Tras haber realizado el modelo de predicción numérico, se decide mejorar la hoja de cálculo implementando una condición adicional en el proceso, la variación de la temperatura de evaporación del fluido Novec con respecto a la presión de trabajo. Se considera necesaria la implementación de dichas condiciones de trabajo debido a que los resultados obtenidos, y en consecuencia, las mejoras obtenidas en el registro de temperaturas, en gran medida son gracias a la realización de vacío en el sistema. Estas condiciones de trabajo, por lo tanto, afectarán directamente al coeficiente λ , e indirectamente a los coeficientes α_{ij} .

Con intención de calcular una expresión de la variación de la temperatura de evaporación de los fluidos Novec[®] 7000 y Novec[®] 649 se define:

- $Presión_1 = Presión_{parcial\ gases} + Presión_{columna\ de\ líquidos}$
- $Presión_{parcial\ gases} = Presión_{parcial\ aire} + Presión_{parcial\ agua} + Presión_{parcial\ Novec}$
- $Presión_{columna\ de\ líquidos} = Presión_{columna\ de\ agua} + Presión_{columna\ de\ Novec}$

Es decir, la presión del fluido de trabajo sobre la pastilla de aluminio o dispositivo electrónico ($Presión_1$) será igual a la suma de las presiones parciales de los gases y la altura del fluido. La presión parcial del aire, a su vez estará condicionada por la forma de ejecutar los ensayos, ya que en caso de que se realicen a vacío la $Presión_{parcial\ aire} = 0\ (atm)$ y en caso de que se realicen sin vacío se supondrá que la $Presión_{parcial\ aire} = 1\ (atm)$. La $Presión_{parcial\ agua}$ se podrá suponer despreciable en comparación con las otras debido a que no se alcanza en la realización de los ensayos la temperatura de ebullición del agua.

De esta forma:

- Si el ensayo es realizado a vacío $\rightarrow Presión_{parcial\ aire} = 0\ atm$
- Si el ensayo no es realizado a vacío $\rightarrow Presión_{parcial\ aire} = 1\ atm$
- $Presión_{parcial\ agua} = despreciable$

Posteriormente, en las hojas técnicas de los fluidos Novec[®] 7000 [44] y Novec[®] 649 [42] se aportan dichas fórmulas de variación de las temperaturas de evaporación con respecto a las variaciones de presión, las cuales serán las que se introduzcan en el modelo de predicción numérico.

$$\ln(P[Pa]) = -3545.3/T[K] + 22.492$$

Ecuación 4-9 Cálculo de la presión de vapor del fluido Novec[®] 649 [42].

$$\ln(P[Pa]) = -3548.6/T[K] + 22.978$$

Ecuación 4-10 Cálculo de la presión de vapor del fluido Novec[®] 7000 [44].

Sin embargo, antes de realizar el cálculo de la expresión de la variación de la temperatura de evaporación con respecto a la variación de presión queda por hallar dos términos; la $Presión_{parcial\ Novec}$ y la $Presión_{columna\ de\ líquidos}$.

Para el cálculo de la $Presión_{parcial\ Novec}$ se utilizarán las fórmulas Ecuación 4-9 y Ecuación 4-10, introduciendo como temperatura en lugar de la temperatura de evaporación del fluido, la temperatura del fluido Novec en estado gaseoso en ese instante. Se puede asumir que la temperatura del fluido Novec en estado gaseoso es aproximadamente la misma que el agua por estar en contacto directo con ella, quedando finalmente la expresión:

$$\ln(P[Pa]) = -3545.3/T_2[K] + 22.492$$

Ecuación 4-11 Cálculo de la presión parcial del fluido Novec[®] 649.

$$\ln(P[Pa]) = -3548.6/T_2(K) + 22.978$$

Ecuación 4-12 Cálculo de la presión parcial del fluido Novec[®] 7000.

Utilizando la ley de la presión hidrostática [50] la cual cita que la presión realizada por un fluido estático depende únicamente de la densidad del fluido utilizado, la aceleración de la gravedad y de la altura o profundidad del fluido se tiene:

- $Presión_{columna\ de\ líquidos} = Presión_{columna\ de\ agua} + Presión_{columna\ de\ Novec}$
- $Presión_{columna\ de\ agua} = pgh = 1000\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) 9.81\ \left(\frac{N}{kg}\right) 0.4(m)$
- $Presión_{columna\ de\ novec} = pgh = p_{fluido}\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) 9.81\ \left(\frac{N}{kg}\right) 0.3(m)$

Finalmente, tras haber calculado independientemente todas las presiones que influyen en el proceso se obtiene la presión ($Presión_1$), siendo ésta la presión del fluido de trabajo ejercida sobre la pastilla de aluminio o dispositivo electrónico suma de todas las presiones averiguadas anteriormente.

Con esta $Presión_1$, se vuelve a entrar en las fórmulas facilitadas por las hojas técnicas de los fluidos Novec[®] 7000 y fluido Novec[®] 649 despejando la incógnita $T[K]$, pues será esta la temperatura de evaporación del fluido objeto de estudio bajo esa $Presión_1$, obteniendo las expresiones:

$$T[K] = -3545.3 / (\ln(P[Pa]) - 22.492)$$

Ecuación 4-13 Cálculo de la temperatura de evaporación del fluido Novec[®] 649 respecto a la presión.

$$T[K] = -3548.6 / (\ln(P[Pa]) - 22.978)$$

Ecuación 4-14 Cálculo de la temperatura de evaporación del fluido Novec[®] 7000 respecto a la presión.

A continuación, se adjunta una gráfica (Figura 4-9) comparativa entre las temperaturas obtenidas en el modelo de predicción numérica suponiendo el ensayo a 300W con vacío utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 7000 y las temperaturas reales obtenidas en los ensayos con el mismo fluido con las mismas condiciones de trabajo, así como otra imagen del entorno de trabajo del modelo de predicción numérico.

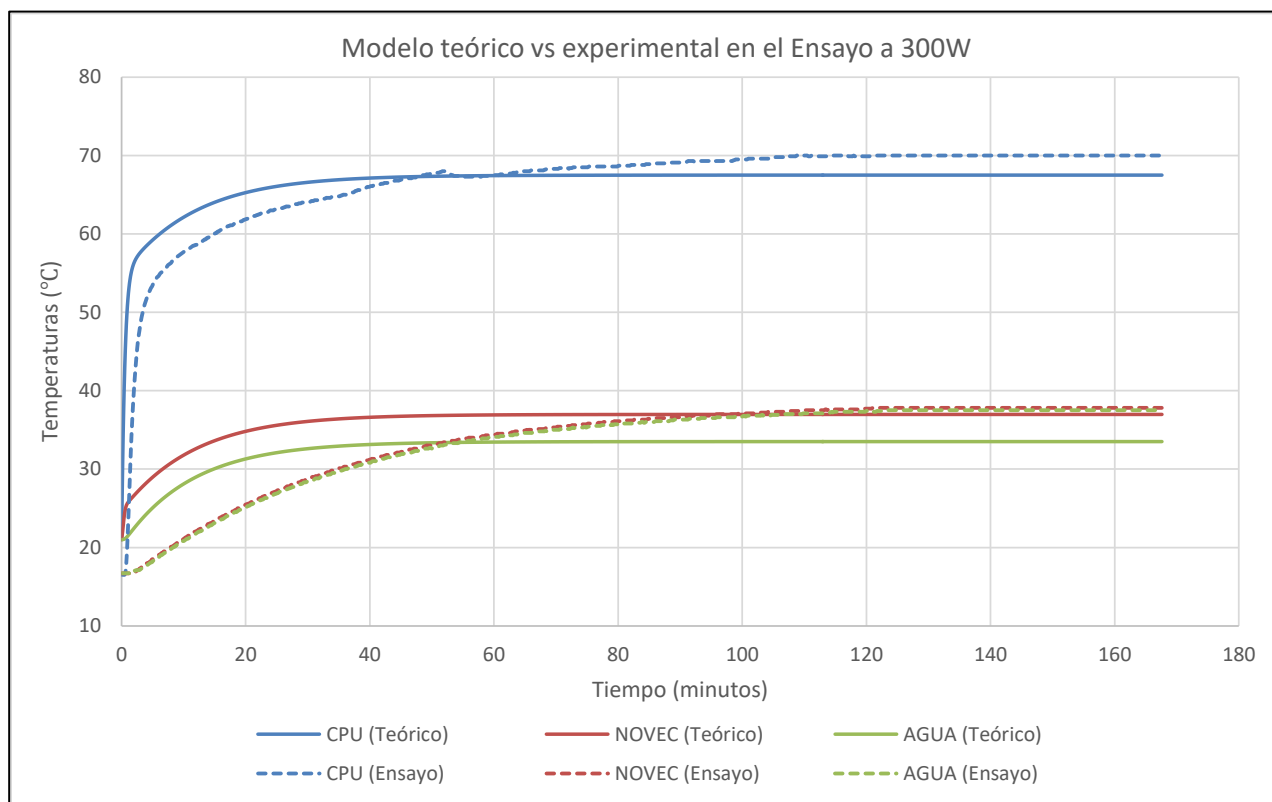


Figura 4-9 Gráfica comparativa ensayo con fluido Novec[®] 7000 a 300W con vacío.

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CAMBIO DE FASE PARA PROCESADORES DE CÁLCULO

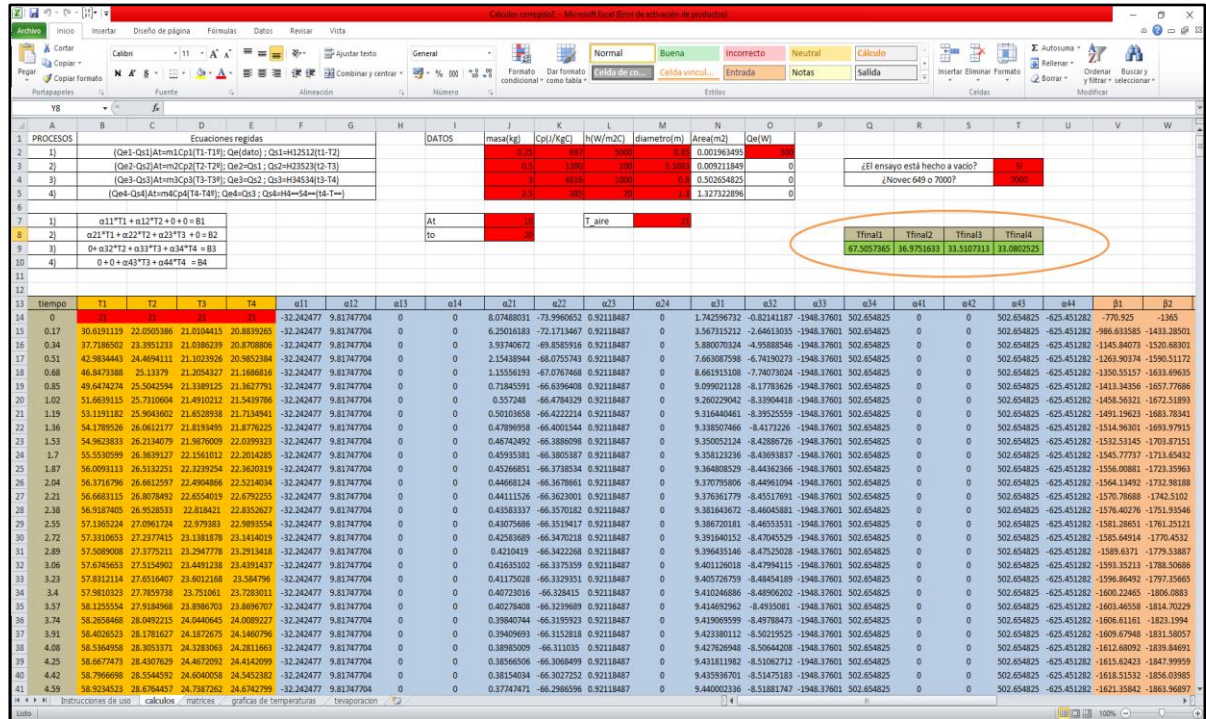


Figura 4-10 Entorno de trabajo del modelo de predicción numérico.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos a lo largo de todos los ensayos realizados (4.3) se llega a la conclusión de que se han cumplido todos los objetivos establecidos al inicio del presente Trabajo de Fin de Grado, queriendo resaltar que se ha alcanzado el objetivo principal perseguido; “probar que existe una alternativa a la refrigeración actual convencional de elementos electrónicos, continuando con el TFG realizado en el año anterior [8], mejorando las técnicas empleadas, procedimientos, equipos, fluidos, conocimientos, corrigiendo los errores observados, así como establecer las bases que hiciera posible la existencia de una línea de investigación futura que permitiría la optimización y eficiencia del trabajo realizado por sistemas informáticos y procesadores de cálculo.”

No sólo se ha conseguido probar teóricamente y experimentalmente una alternativa real a la refrigeración actual convencional de elementos electrónicos, sino que tras haber experimentado con la mayoría de los sistemas de refrigeración existentes en el mercado, y tras haberlos evaluados y comparados bajo un estudio intensivo, se llega a la conclusión de que dicha alternativa a la refrigeración actual de elementos electrónicos supone una auténtica optimización y mejoría respecto al resto de sistemas de refrigeración estudiados. Además de los objetivos nombrados y establecidos al principio del presente proyecto, el autor considera que durante la elaboración del mismo se han cumplido otros objetivos no establecidos a priori e hitos de importancia, entre otros, el manejo de distintos softwares empleados en la realización del trabajo tales como Siemens NX (3.3.5) y la elaboración del modelo de predicción numérico mediante Excel (3.3.2), puesto que no sólo se ha realizado una predicción numérica sobre el comportamiento del sistema, sino que dicha predicción ha sido mejorada varias veces hasta obtener un modelo de predicción común para las distintas condiciones de trabajo y fluido empleados, siendo los resultados obtenidos bastante aproximados.

Por ello, debido a los resultados obtenidos en los ensayos, propiedades de los fluidos utilizados, y, posibles aplicaciones directas en el futuro, se recomienda establecer una línea de investigación sobre los sistemas de refrigeración mediante cambio de fase empleando como fluido refrigerante los fluidos Novec y en especial el fluido Novec[®] 7000 con realización previa de vacío en el sistema. Este sistema de refrigeración, como se ha demostrado, no sólo consigue una mejor refrigeración de los componentes electrónicos respecto al resto de sistemas de refrigeración estudiados y convencionales, sino que además, permite prescindir de cualquier elemento externo que ayude al sistema a realizar su función, convirtiéndolo en un sistema totalmente independiente, económico, eficaz, accesible, silencioso y sencillo.

Sin lugar a dudas supone un sistema de refrigeración novedoso con una muy recomendable posible aplicación en los buques de la Armada, permitiendo a la unidad disminuir el consumo eléctrico asociado de los sistemas de refrigeración de elementos electrónicos innecesarios, así como el ahorro de

labores asociadas a la manutenzione de dichos sistemas de refrigeración. Además, permite unificar criterios, sistemas, y equipos en toda la unidad, facilitando las labores burocráticas de obtención de repuestos y aprovisionamiento de materiales, puesto que todos los sistemas de refrigeración serían semejantes y utilizarían los mismos componentes.

5.2 Líneas futuras

Tanto la armada como los centros civiles que utilicen sistemas electrónicos avanzados tienen a su disposición un sistema de refrigeración pionero, innovador, eficiente y comprometido con el medio ambiente. Es por ello que el conocimiento e implementación de un sistema de refrigeración por cambio de fase abre las puertas para futuras investigaciones y aplicaciones, permitiendo, al mismo tiempo, una reducción de consumo y una mayor eficiencia de operación de los equipos.

Sin ir más lejos, en la Armada Española la tendencia actual es de automatización de nuestros buques, llegando a hablar de la revolución industrial 4.0 y la Armada 4.0, la cual proyecta tener buques con gemelos digitales que en tiempo real transmitan la información sobre los equipos y maquinaria a los centros de estudio y arsenales, permitiendo así comprobar el correcto funcionamiento y ejecución de los procesos. Para alcanzar todo ello, sin lugar a dudas, hacen falta procesadores y superordenadores los cuales necesitan un sistema de refrigeración óptimo. A su vez, los sistemas de propulsión y motores convencionales evolucionan a una tendencia de utilización de energía eléctrica, comentada previamente, mediante baterías, cuyo sistema de refrigeración óptimo consiste en un contacto directo con un fluido refrigerante que pase por el interior de la batería.

Es por ello que, en base a la posibilidad de ampliar las aplicaciones de este tipo de sistema de refrigeración, en el presente Trabajo Fin de Grado se abordará a continuación el estudio y optimización de los equipos de climatización y aires acondicionados convencionales, así como el análisis y optimización de la refrigeración de equipos electrónicos y racks en los buques de la Armada Española, al igual que una posible línea de desarrollo de un sistema de refrigeración por cambio de fase en vehículos eléctricos.

5.2.1 Estudio y optimización de los equipos de climatización y aires acondicionados convencionales

Con objeto de realizar una optimización de los equipos de climatización convencionales es necesario conocer los elementos que lo componen y su funcionamiento (Figura 5-1). En concreto, el condensador es un elemento fundamental en el aire acondicionado, pues se encarga de convertir el vapor en líquido. Realmente, todo el proceso realizado en el equipo deriva a un cambio de fase en cada ciclo de trabajo, por ello, si el condensador no funciona adecuadamente, el aire acondicionado no enfriaría del modo que se espera. Normalmente el condensador incluye ventiladores para ir disipando el calor que contiene el fluido durante el proceso de cambio de fase.



Figura 5-1 Equipo exterior aire acondicionado convencional con sus elementos.

Para generar una mejor disipación de calor y eficiencia del proceso, se plantea la utilización de refrigeración líquida por inmersión y cambio de fase en la unidad exterior envolviendo al compresor y condensador. Dicho sistema de refrigeración consistiría en sumergir al condensador y compresor que irían situados en la parte inferior de la unidad exterior, de forma que se produciría un cambio de fase en el líquido refrigerante contenido en la misma, así como colocar un condensador o intercambiador de calor secundario en la parte superior de forma que se consiguiera devolver al fluido a su estado líquido, cayendo por gravedad. Como fluido de gestión térmica contenido en la unidad externa se utilizaría, debido a sus propiedades, alguno de los fluidos 3M estudiados anteriormente.

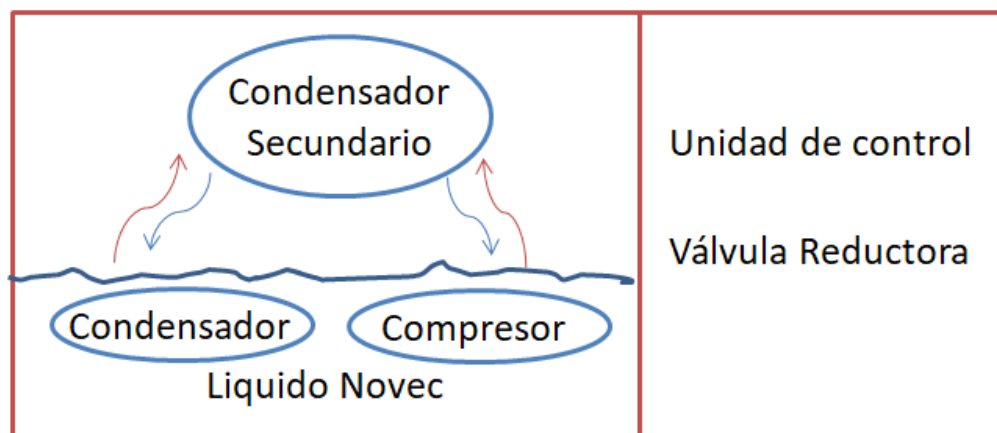


Figura 5-2 Posible aplicación de refrigeración líquida sobre condensador para aumento de eficiencia.

La finalidad del sistema es conseguir refrigerar los procesos realizados en el condensador y compresor de forma que se aumente la eficiencia del sistema. El funcionamiento del conjunto de refrigeración sería el mismo, de forma que en el interior del circuito circularía un fluido refrigerante realizando sus correspondientes cambios de fase, con la variante de utilizar un equipo exterior resistente y estanco para soportar un segundo fluido, produciéndose sucesivamente, y sin ayuda de elementos externos, la evaporación y condensación del fluido, controlando así la temperatura de trabajo del condensador y compresor. De esta forma, se evitaría el empleo de un ventilador y elementos externos al conjunto de refrigeración permitiendo consumir menos energía y por lo tanto optimizar el proceso.

5.2.2 Análisis y optimización de los procesos de refrigeración de los equipos electrónicos de la Armada Española

Durante el presente Trabajo de Fin de Grado siempre se tuvo un objetivo claro: probar que existe una alternativa a la refrigeración actual convencional de elementos electrónicos, creando un sistema de refrigeración por cambio de fase que, no sólo permitiera optimizar la refrigeración realizada consiguiendo disminuir la temperatura de trabajo del equipo electrónico, y por lo tanto mejorar su rendimiento, sino que permitiera disminuir el consumo eléctrico y los recursos asociados al proceso. Analizando los resultados obtenidos durante los ensayos (4), no sólo se llega a la conclusión de que el sistema creado en el presente trabajo puede ser viable, ya que permite cumplir con los objetivos establecidos, sino que puede llegar a suponer una revolución al conseguir alcanzar una mayor optimización de los sistemas de refrigeración de equipos electrónicos tal y como se conocen hoy en día.

En este sentido, y en base a todas las experiencias y resultados obtenidos, se decide realizar una visita a uno de los centros con mayor densidad de equipos electrónicos con diversos sistemas de refrigeración asociados. En concreto, se aprovecha la estancia del buque de Acción Marítima (BAM) “Furor” (P-46) en la Escuela Naval Militar para llevar a cabo una visita a bordo, la cual tiene por objeto realizar un detallado estudio de los sistemas de refrigeración que posee la unidad tanto a nivel local (equipos de climatización), así como los sistemas de refrigeración de equipos electrónicos tales como las consolas tácticas ubicadas en el CIC (centro de información para el combate), sistema de combate y radar.

El buque de Acción Marítima “Furor” (P-46) es una unidad que recientemente ha entrado en servicio, en concreto el 21 de Enero de 2019. Es el último buque creado de su serie, en este caso botado en el astillero de Ferrol, a diferencia de sus antecesores que fueron botados en el astillero de Puerto Real, y por lo tanto el buque más moderno de la Armada Española. Debido a que es el último buque de su serie y además el más moderno de la Armada, el “Furor” ha sido construido con la más moderna tecnología desarrollada por empresas tales como Indra Sistemas, Faba Sistemas, Sainsel y Navantia. En concreto, el sistema de combate (SCOMBA) creado por Navantia y la mayoría de equipos asociados en el CIC por la empresa Indra.

El sistema de combate SCOMBA (Sistema de Combate de los Buques de la Armada) es un sistema unificado de combate de creación española que desde el 2010 poseen la mayoría de los buques de la Armada Española. El hardware se compone de dos armarios de proceso redundante (ARES) siendo básicamente dos racks que permiten fijar y organizar en su interior los equipos servidores, sistemas de redes y switches. Adicionalmente, el sistema deriva a un número de consolas así como sensores y pantallas en el CIC. El sistema coordina e integra a todos los equipos electrónicos asociados que tengan función directa o indirecta en la protección de la unidad, entre ellos podemos encontrar la dirección de tiro optrónica-radárica Dorna, servidores cartográficos, equipos IFF, radares de navegación y equipo de contramedidas electrónicas RIGEL. Es por ello que debido a la gran importancia del sistema y ser uno de los pilares fundamentales de cualquier unidad, se considera útil y necesario optimizar los procesos asociados al sistema con objeto de obtener un mejor rendimiento y menor consumo asociado.

Al visitar la unidad y estudiar la refrigeración común de los sistemas electrónicos y equipos menores se llega a una conclusión final. Los equipos electrónicos a nivel usuario tales como las consolas ubicadas en el CIC poseen únicamente refrigeración mediante ventiladores, al igual que un ordenador convencional particular. Sin embargo, en los armarios de proceso redundante (ARES) y en los equipos de refrigeración asociado a los radares, existe una refrigeración de los componentes electrónicos dual, mezclando la acción de un refrigerador conectado a un circuito cerrado de agua técnica con ventiladores repartidos por el equipo.

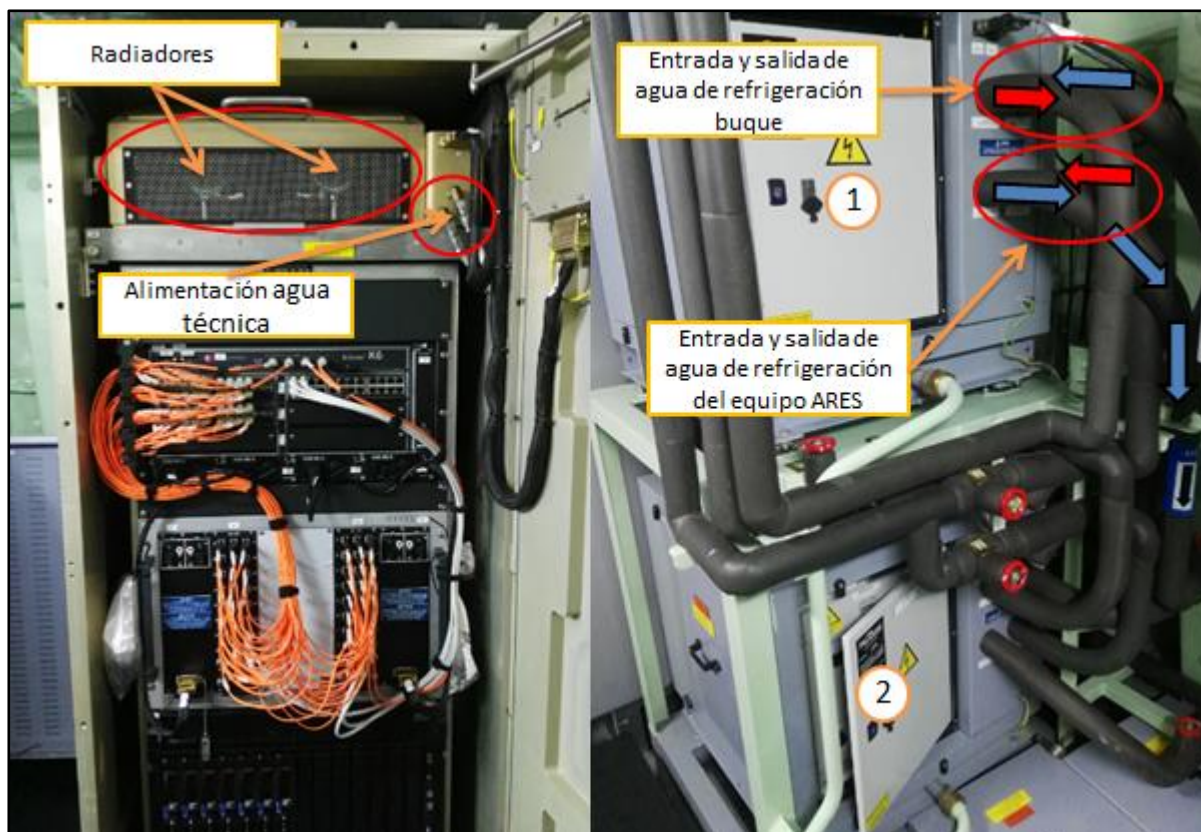


Figura 5-3 Refrigeración de los armarios de proceso redundante (ARES).

Como se puede observar en la Figura 5-3, la refrigeración de los armarios de proceso redundante (ARES) se produce mediante un circuito cerrado de agua técnica el cual fluye por el interior de los radiadores ubicados en el interior de los armarios. Al calentarse el equipo, el calor es cedido a los radiadores por los cuales fluye el fluido técnico, y dicho fluido es conducido a través de un circuito cerrado a dos unidades externas (una para cada armario) ubicadas en el mismo compartimento, conocidas como ERA (Equipo de Refrigeración de los equipos ARES). En dichos equipos ERA se produce un intercambio de calor entre el circuito cerrado de agua técnica y el circuito de refrigeración del propio buque de agua dulce (agua dulce del circuito común del buque), retornándose finalmente el fluido técnico ya enfriado de nuevo al equipo electrónico. Se adjunta un diagrama explicativo (Figura 5-4) del sistema de refrigeración para un mejor entendimiento del lector.

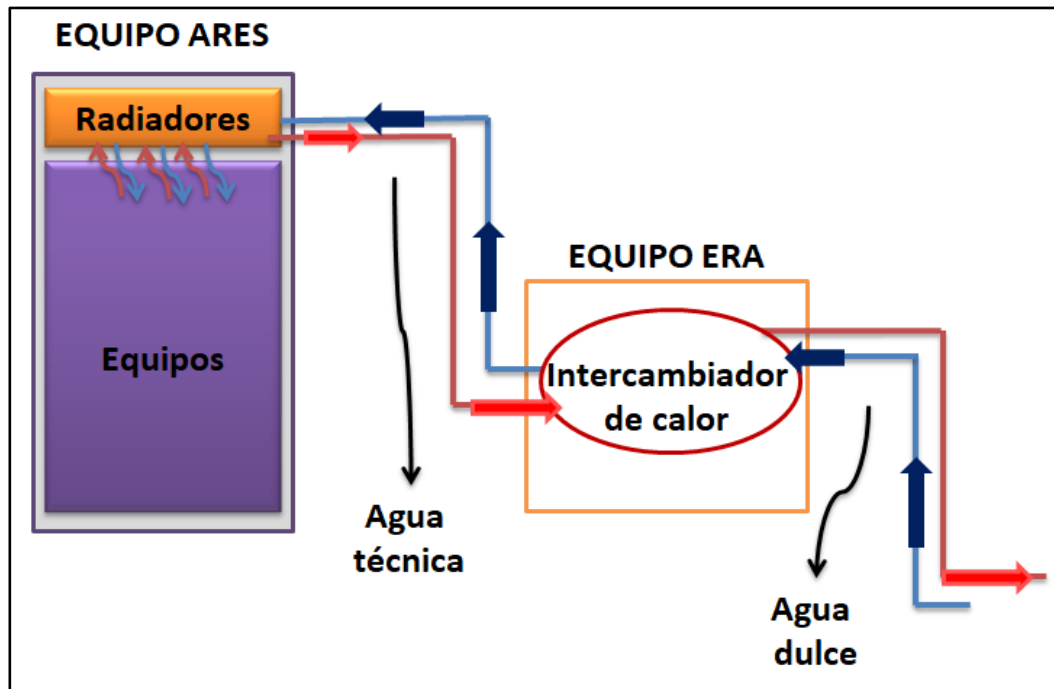


Figura 5-4 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración de los armarios de proceso redundante (ARES).

Tras la investigación, estudio y resultados obtenidos en los ensayos realizados con el sistema de refrigeración utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 7000, se llega a la conclusión de que se podría optimizar el rendimiento del proceso si en lugar de trabajar directamente con agua técnica se utilizara el fluido nombrado anteriormente en contacto directo con los equipos electrónicos. El sistema funcionaría de la siguiente forma:

- Directamente a cada equipo electrónico ubicado en el interior del armario o rack de forma vertical se le instalaría un elemento acoplador en contacto directo con la CPU tal y como se llevó a cabo en los ensayos realizados sobre el ordenador convencional con el fluido refrigerante Novec[®] 7000 (3.4.4).
- De dicho elemento acoplado a la CPU saldrían dos tubos por los que ambos circularía fluido Novec[®] 7000. Un tubo situado por encima del otro para facilitar la salida de fluido en forma de vapor al alcanzar el punto de ebullición temprano, y otro conducto para la entrada de fluido Novec una vez que haya sido refrigerado y pasado a estado líquido.
- Ambos tubos de cada unidad individual electrónica derivarían a un conducto común por el que fluiría el fluido Novec[®] 7000. Un primer conducto (común a las tomas de salida) en el que únicamente derivarían las tomas que posean fluido Novec en estado gaseoso, y un segundo conducto (común a todas las entradas) en el que únicamente derivarían las tomas que posean fluido Novec en estado líquido.
- Los conductos comunes con fluido Novec[®] 7000 en estado gaseoso y líquido derivarían a un refrigerador común similar al utilizado en los ensayos con los fluidos Novec realizados anteriormente (3.2.2.7) el cual poseería fluido Novec y agua destilada, cerrado herméticamente.
- De dicho refrigerador común saldrían otros dos conductos de salida y entrada de agua destilada, convirtiendo el sistema Novec, refrigerador y agua destilada en un sistema común cerrado herméticamente.
- Se realizaría vacío en el sistema Novec, en el refrigerador, y en el circuito de agua destilada, de forma que todo el sistema estuviera en vacío y disminuyera la temperatura de evaporación del fluido Novec[®] 7000.

- El sistema de agua destilada derivaría finalmente a un equipo exterior en el que se produciría el intercambio de calor con el sistema de refrigeración del buque mediante agua dulce, parecido al que se utiliza en los equipos ERA.

Se representa el sistema propuesto en la Figura 5-5 para un mejor entendimiento con todos sus compuestos y sentidos de circulación. Se debe destacar que el refrigerador común compuesto por agua destilada y fluido Novec realiza las funciones de disipador de calor a través de su superficie, por lo que con objeto de efectuar una extracción de calor de forma óptima, el refrigerador debería poseer la máxima superficie posible y estar ubicado en un compartimento con poca temperatura. El lector puede llegar a considerar que dicha ubicación puede ser un compartimento con un buen equipo de aire acondicionado y así tenerlo a escasa temperatura, sin embargo, el sistema de refrigeración propuesto intenta conseguir prescindir de los equipos de climatización convencionales, de forma que aun teniendo el compartimento a una temperatura normal, el sistema opere de forma eficiente sin necesidad de instalar ninguna unidad de aire acondicionado, con misión de disminuir la temperatura del compartimento y ayudar en el proceso de refrigeración. De esta forma, no sólo consigue el sistema de refrigeración propuesto disminuir la temperatura de trabajo del equipo electrónico, sino que permite disminuir el uso e instalación masiva de unidades de refrigeración tales como equipos de aire acondicionados y ventiladores, disminuyendo considerablemente la demanda de energía del buque y los problemas asociados de manutención y averías debido a la disminución de componentes en el sistema, facilitando además las labores logísticas de la unidad.

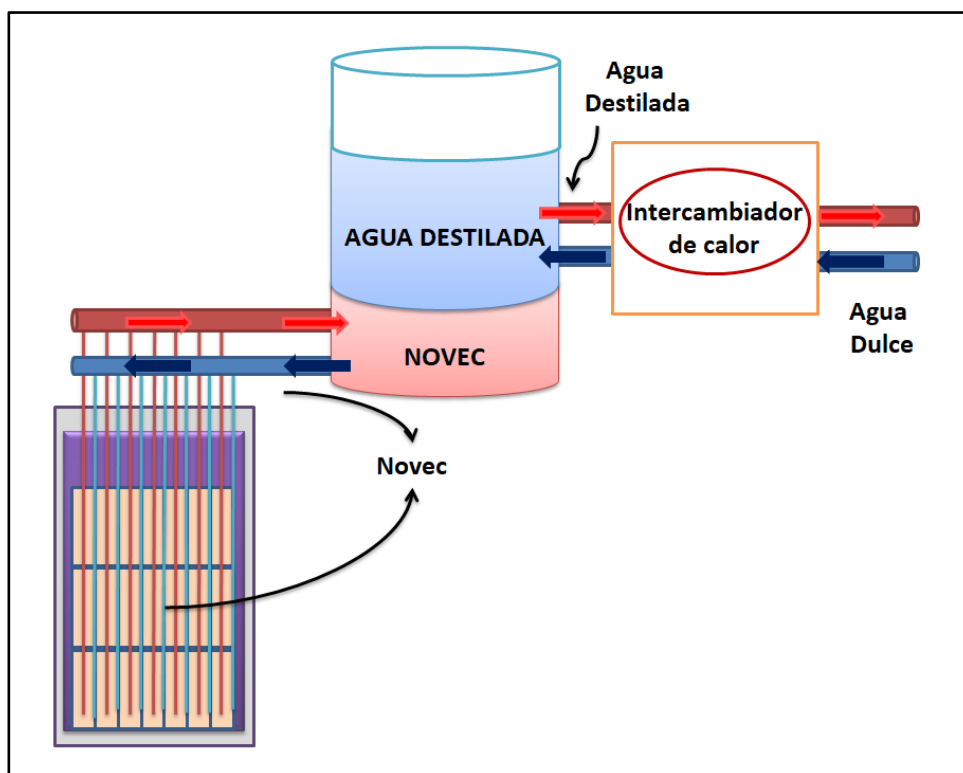


Figura 5-5 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración propuesto para equipos electrónicos en los buques de la Armada.

Este sistema de refrigeración no sólo sería aplicable para racks electrónicos, sino que en cualquier compartimento con diversos equipos electrónicos se puede realizar el mismo procedimiento explicado anteriormente, conectados a un refrigerador independiente. De esta forma cada equipo electrónico independiente tendría una salida y una entrada de fluido Novec[®] 7000 conectados mediante tomas independientes a una mismo conducto común, uno para la salida de fluido Novec en estado gaseoso y otro para la entrada de fluido Novec en estado líquido.

Como se puede observar en la Figura 5-6, se representan las posibles conexiones a realizar entre los componentes electrónicos y el fluido Novec. En la izquierda de la imagen aparece un ejemplo de la posible toma de conexiones independientes de cada equipo electrónico a la red común de fluido Novec, un conducto para el fluido en estado gaseoso saliente del componente electrónico y otro conducto para el fluido en estado líquido entrante en el componente electrónico. En la derecha de la imagen, aparece un ejemplo de conexión del equipo electrónico a refrigerar con el fluido Novec, mediante un elemento de contacto parecido al utilizado en los ensayos realizados pero destacando la elevación de la salida en estado gaseoso del fluido Novec con respecto a la entrada en estado líquido, no necesitando así ningún elemento externo que realice dicha circulación de fluidos y optimizando el proceso.



Figura 5-6 Ejemplos de tomas de conexiones de los elementos electrónicos al fluido Novec así como del fluido Novec a los conductos comunes en estado gaseoso y estado líquido del fluido [51] [52].

Sin embargo, surgen diversas dudas ante la realización del sistema nombrado y descrito en la Figura 5-5, tales como asegurar que el sistema de refrigeración no rompa la estanqueidad del armario ni su ignifugidad e impedir que parte del fluido Novec pueda desviarse y fluir a través de los conductos de circulación de agua destilada. Es por ello que ante estas vicisitudes expuestas se decide que las tomas salientes y entrantes de fluido Novec no escapen fuera del armario de proceso redundante o instalación que contenga al equipo electrónico, realizándose dichas conexiones en el interior del armario y derivando a un depósito común en la parte superior del equipo. Dentro de este depósito común de fluido Novec circularía una tubería serpenteante con agua destilada, produciéndose así la refrigeración en dicho depósito y retornándose el fluido Novec refrigerado a los componentes electrónicos sin necesidad de romper la estanqueidad ni ignifugidad del equipo, además se evitaría de esta forma que el fluido Novec llegue a circular o derive por el sistema de agua destilada, ya que pertenecen a dos circuitos distintos. Posteriormente, dicha agua destilada derivaría a un intercambiador de calor con agua dulce, retornando así agua destilada refrigerada que posteriormente refrigeraría el fluido Novec contenido en el depósito de cada armario o instalación que contenga a los componentes electrónicos. Como aplicación adicional del fluido Novec[®] 7000, se debe mencionar que es un buen agente extintor, pudiéndose implementar un sistema de extinción de incendios interna en el mismo armario de proceso redundante (ARES) aprovechando la circulación de dicho fluido a través de los equipos electrónicos, como por ejemplo, mediante una perforación automática de los conductos con fluido Novec[®] 7000 al alcanzar una temperatura crítica.

Como se puede observar en la Figura 5-7 la cual representa el armario o equipo de instalación de los componentes electrónicos visto desde detrás, partiendo de cada equipo electrónico (pudiéndose utilizar las tomas de conexiones comentadas en la Figura 5-6), parten los respectivos conductos por los que circularía el fluido Novec utilizado, un conducto para la salida ascendente del fluido en estado gaseoso y un conducto para la entrada descendente del fluido en estado líquido. Dichos conductos derivarían a un depósito común de fluido Novec localizado en la parte superior, circulando en su interior el agua destilada y derivando posteriormente al intercambiador de calor donde se refrigera el sistema con agua salada, así, la única conexión con el exterior del sistema electrónico sería la entrada y salida de agua destilada, pudiéndose realizar como se observa en la Figura 5-3 sin mayor complicación ni riesgo asociado.

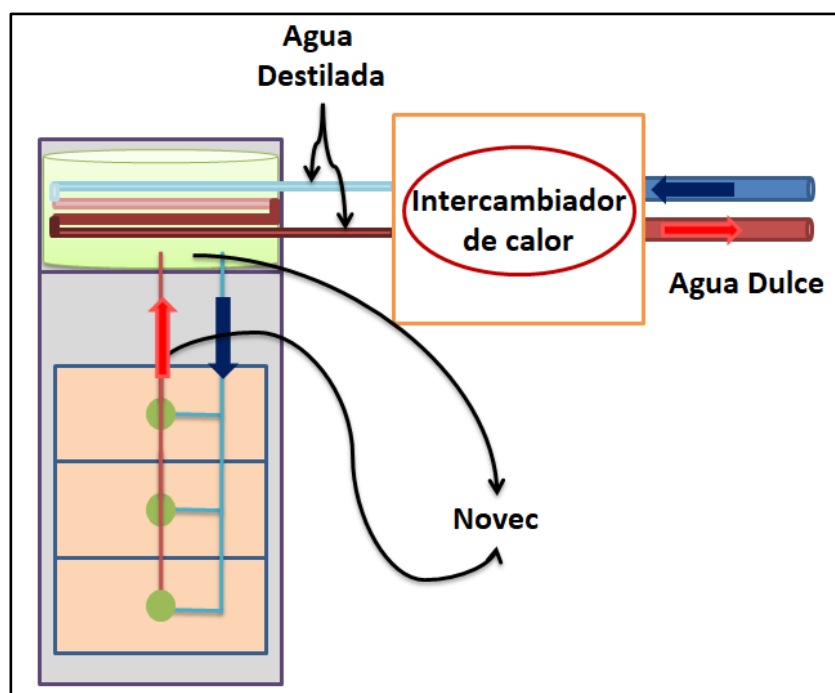


Figura 5-7 Diagrama de funcionamiento del sistema de refrigeración propuesto para equipos electrónicos en los buques de la Armada manteniendo estanqueidad e ignifugidad (vista posterior).

Revisando los manuales aportados por la empresa de refrigeración FRIZONIA [53], aparte de todos los elementos eléctricos utilizados en el interior de los armarios de proceso redundante ARES y equipos de refrigeración ERA, cada sistema incorpora una bomba de agua cuyo motor eléctrico tiene unas características de 115V, 60 Hz y un consumo según las especificaciones de diseño de aproximadamente 7.6 A. Dicha bomba, si se empleara el sistema de refrigeración propuesto, no sería necesaria su instalación, optimizando el proceso y el consumo eléctrico asociado, ahorrándose la instalación del elemento más susceptible de fallo de todo el sistema. Además, según información obtenida sobre distintos registros y consumos en la red general de aires acondicionados de diversas unidades de la Armada, se estima que cada grado de temperatura menor programada en el equipo, incrementaría el consumo eléctrico asociado en un 8%. Es decir, si por ejemplo en el compartimento con equipos radio del buque se intentara disminuir la temperatura del compartimento 5°C, se realizaría un consumo eléctrico adicional del casi 50%, no siendo necesaria dicha disminución de temperatura si se utilizara el sistema de refrigeración propuesto, debido a la alta eficiencia en el proceso. Por último, suponiendo el empleo de un ventilador convencional de 55W en la mayoría de equipos electrónicos ubicados en el CIC, los cuales se suponen que operan en un intervalo de un mes durante las 24 horas del día, y teniendo en cuenta que en un CIC puede llegar a albergar hasta incluso 40 consolas integrando ventiladores, supone un consumo total de entorno 1584kWh/mes, ahorrables si se implementara el sistema de refrigeración propuesto. Si se tiene en cuenta además de todo lo anteriormente expuesto que, a mayor número de equipos y sistemas complejos con infinidad de

componentes intermediarios, aumenta la probabilidad de fallos y averías en el sistema, no sólo se conseguiría disminuir el consumo eléctrico asociado implementando el sistema de refrigeración propuesto, sino que también se podría reducir considerablemente la probabilidad de fallo y manutención asociado, disminuyendo el número de piezas y componentes necesarios en cada sistema. Así, finalmente, se simplificarían todas las labores burocráticas y acciones a la hora de solicitar reemplazos de materiales, obtención de repuestos y almacenamiento a bordo.

A modo de resumen, el sistema de refrigeración propuesto permite, entre otros factores:

- Realizar una mejor refrigeración en los componentes electrónicos, permitiéndoles operar a temperaturas menores, y por lo tanto, aumentar su vida útil y eficiencia en su utilización.
- Eliminar componentes adicionales innecesarios del sistema de refrigeración logrando, entre otros aspectos, obtener un menor consumo energético asociado al proceso, disminuir la probabilidad de fallos y averías, y simplificar las tareas de mantenimiento, supervisión y control del sistema.
- Facilitar las tareas burocráticas y administrativas de la unidad, simplificando el cargo a bordo y facilitando las tareas de almacenamiento, reemplazo de materiales y obtención de repuestos. Además el supuesto arsenal o proveedor, tendría un inventario común para todas las unidades que implementasen dicho sistema, facilitando aún más lo anteriormente expuesto.

5.2.3 Desarrollo de un sistema de refrigeración por cambio de fase en vehículos eléctricos

Debido a la preocupación generalizada presente hoy en día en la sociedad sobre la emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente, así como los continuos esfuerzos realizados para tratar de independizarnos de energía tales como combustibles fósiles, no renovables y perjudiciales para la sociedad y el ecosistema, es por lo que la proliferación de vehículos eléctricos está teniendo un gran éxito, demostrando ser la tendencia futura de compra para el usuario medio. Sin embargo, dichos vehículos todavía están presentando diversos problemas en su desarrollo, siendo uno de ellos la autonomía asociada debido a la batería.

Como se comentó en el apartado 2.4.2, hoy en día la mayoría de coches eléctricos poseen una batería de Ion-Litio la cual, dependiendo del fabricante, es refrigerada mediante distintos sistemas. Sin embargo, una característica particular y común a la mayoría de las baterías de los coches eléctricos es que sin el adecuado sistema de refrigeración, al alcanzar la batería temperaturas extremas y no tan extremas de trabajo empieza a degradarse su actuación y a funcionar de manera ineficiente, produciendo un funcionamiento irregular de la batería y derivando a una precaria autonomía y alimentación del sistema. Por ello, conseguir desarrollar un sistema de refrigeración adecuado para los procesos y márgenes de temperaturas de trabajo, permitiría no sólo disminuir el tamaño de los componentes electrónicos asociados al sistema sino aumentar la autonomía del vehículo y su actuación en la carretera. Se plantea pues al lector la siguiente pregunta: ¿Y si se utilizara como sistema de refrigeración un sistema que mezclara las propiedades de los sistemas de refrigeración convencionales con aquellas otras correspondientes a los que emplean fluidos refrigerantes Novec?

Entra las soluciones que se pueden llegar a desarrollar se propone la circulación del fluido Novec por el interior de las celdas de la batería mediante un sistema de conductos independiente al del fluido refrigerante utilizado previamente. Es decir, se mantendría el sistema de refrigeración utilizado anteriormente, pero se le añadiría un segundo sistema de refrigeración basado en el fluido Novec, el cual derivaría a un segundo intercambiador de calor, de forma que así la refrigeración total del vehículo se dividiría en ambos sistemas de refrigeración, aumentando la eficiencia en el proceso. De esta manera se permitiría al sistema trabajar en un rango de temperaturas menor, y por lo tanto, poder disminuir el tamaño de la batería, aumentar la autonomía y mejorar la actuación del vehículo en la carretera, pudiendo estar el sistema en vacío para mejorar aún más las prestaciones.

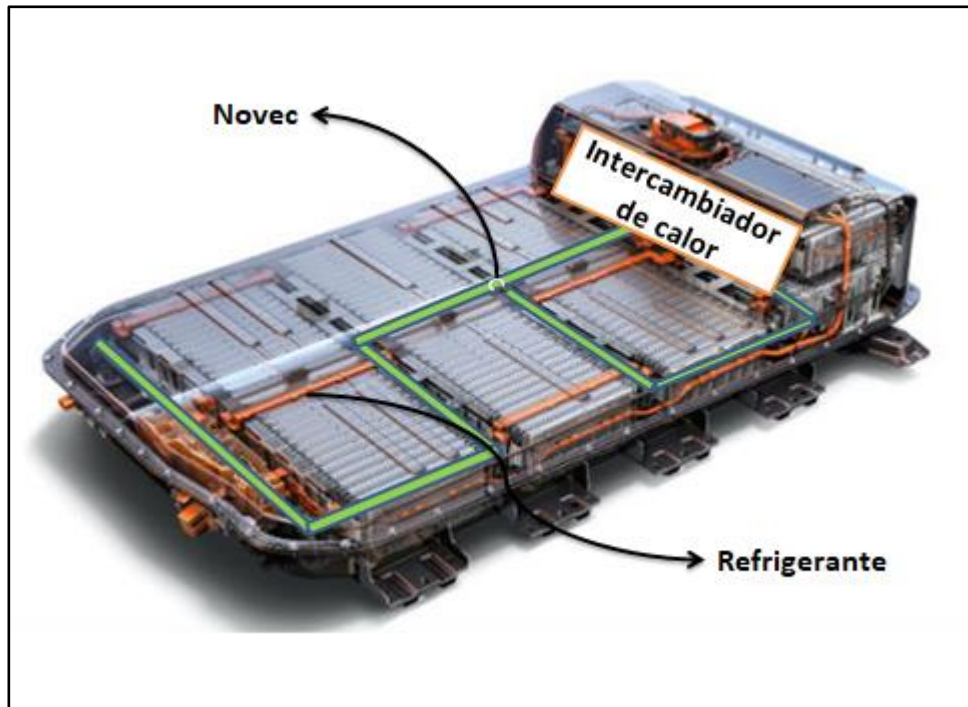


Figura 5-8 Posible sistema de refrigeración de vehículos eléctricos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Salvador y E. Sánchez, «Historia de la Refrigeración,» Publicaciones Monográficas, Lima, 2012.
- [2] A. A.-A. M. El-Gahshigar, *Mil y una noches*, India, Siglo IX.
- [3] H. Córdova, *Historia y Principios de la Refrigeración y Aire Acondicionado*, Hi-Tech Refrigeration SA, 2009.
- [4] 3M, *Two-Phase Immersion Cooling*, St Paul, 2015.
- [5] ONU, «Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono,» Montreal, Canadá, 1987.
- [6] ONU, «Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático,» Kyoto, Japón, 1997.
- [7] R. M. Business, «Welcome to IBM's supercomputer waterworld of the future,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.wired.com/2013/01/ibm-waterworld/>. [Último acceso: 5 Enero 2019].
- [8] M. M. Román, «Diseño de un sistema de refrigeración por cambio de fase para su aplicación en equipos electrónicos,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, Pontevedra., 2018.
- [9] S. R. d. I. P. Millán y J. C. J. Sáez, «Termodinámica Clásica,» ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO, Madrid, 2012.
- [10] J. M. S. Lizarraga y L. M. L. González, *Termodinámica Fundamental*, Logroño: Universidad de la Rioja. Material didáctico Ingenierías, 2011.
- [11] O. I. d. P. y. Medidas, *Sistema Internacional de Unidades*, Madrid: Centro Español de Metrología, 2006 8ª edición.
- [12] I. Agundez, «Termodinámica y energía,» 2015. [En línea]. Available: <http://ingenieriaagundez.blogspot.com/2015/01/principio-cero-de-la-termodinamica.html>. [Último acceso: 14 Enero 2019].
- [13] J. Wiley, «ThermodynamiICS,» Escuela Politécnica superior de Zamora, 2015. [En línea]. Available: <http://dim.usal.es/eps/mmt/?p=3272>. [Último acceso: 15 Enero 2019].

- [14] J. B. Méndez, «Segundo Principio. Física II,» Grado en Ingeniería de Organización Industrial, Sevilla.
- [15] A. M. Domingo, Transmisión de Calor, Madrid: Departamento de Física e instalaciones. Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [16] Anónimo, «Conducción, Convección y Radiación.,» [En línea]. Available: <http://gadgetofon.ru/conduccion-conveccion-y-radiacion-ejemplos/>. [Último acceso: 1 Febrero 2019].
- [17] R. Cabrera, «Conducción del Calor-Ley de Fourier,» [En línea]. Available: https://ricuti.com.ar/TERMO/TEOR_conduccion.html. [Último acceso: 1 Febrero 2019].
- [18] J. M. Campal, «Un entorno energético,» [En línea]. Available: <http://jorgemartincampal.com/tag/ser-humano/>. [Último acceso: 2 Febrero 2019].
- [19] D. d. F. III, «Los gases Ideales (GIE),» Universidad de Sevilla, [En línea]. Available: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Los_gases_ideales_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Los_gases_ideales_(GIE)). [Último acceso: 27 Enero 2019].
- [20] J. Smith, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [21] I. G. G. R, Termodinámica aplicada, Punto Fijo: Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda", 2009.
- [22] C. G. Linares, Mezcla de gases Ideales. Termodinámica 2, Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería., 2003.
- [23] M. Meza, «Aletas de transferencia de calor,» Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela, 2015.
- [24] I. systems, «Oil/air cooler OAC,» Intel systems, 2015. [En línea]. Available: <https://www.lazada.com.my/products/intel-socket-lga-1155-cpu-heatsink-fan-i507410-s558994.html>. [Último acceso: 4 Febrero 2019].
- [25] B. Ramakrishnan, *Viability of server module thermal management using enhanced heat sinks and low global warming potential dielectric fluids*, Alabama: Faculty of Auburn University, 2014.
- [26] J. C. R. González, FÓRMULAS, TABLAS Y FIGURAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, San Sebastián: Escuela superior de Ingenieros. Universidad de Navarra, 2007.
- [27] D. Sharar, N. Jankowski y A. Bar-Cohen, «Two-phase fluid selection for high-temperature automotive platforms,» Army Research Laboratory, 2012.
- [28] G. Wagner, *Comparison of Three Liquid Cooling Methods for High-Power Processors*, Santa Clara, California: Advancements in Thermal Management, 2015.
- [29] WordPress, «Tipos de Sistemas de refrigeración del PC,» WordPress, 2014. [En línea]. Available: <https://seminariodeactualizacion507.wordpress.com/2014/08/30/tipos-de-sistemas-de-refrigeracion-de-la-pc/>.
- [30] 3M, *Heat transfer applications using 3M Novec Engineered Fluids*, St Paul, 2016.
- [31] A. Kampl, «Bitcoin 2-Phase Immersion Cooling and the Implications for High Performance Computing,» Electronic Cooling Magazine, 2014.
- [32] Samsung, «Galaxy Note9: Cómo funciona su sistema de refrigeración líquida,» Samsung, 2018.

- [En línea]. Available: <https://news.samsung.com/pe/galaxy-note9-como-funciona-su-sistema-de-refrigeracion-liquida>. [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [33] Xiaomi, «Black Shark,» Xiaomi, 2018. [En línea]. Available: <https://eu.blackshark.com/>. [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [34] C. Fernández Lanchares, «Simulación de vehículos eléctricos,» Universidad de Valladolid. Escuela de Ingeniería Industriales, Valladolid, 2018.
- [35] A. drives, «Low Voltage AC drives for marine,» ABB oy, Helsinki, 2009.
- [36] E. T. Alcaraz, «La producción de frío,» Universidad politécnica de Valencia, Valencia, 2015.
- [37] E. N. Militar, Manual de Lanchas de Instrucción, Marín.
- [38] C. 101, «DS18B20 Temperature Sensor,» [En línea]. Available: <https://components101.com/sensors/ds18b20-temperature-sensor>. [Último acceso: 22 Febrero 2019].
- [39] FischerElektronik, «Technical Data for Silicon-free Thermally Conductive Paste W LPK,» Fischer Elektronik GmbH & Co. KG, Lüdenscheid, 2012.
- [40] K. Electronics, «4 Channel Temperature Data Logger,» Krida Electronics, Latvia, 2018.
- [41] CEBEK, *Light Regulator*, Fadisel.
- [42] 3M, *3M Novec 649 Engineered Fluid*, St. Paul, 2009.
- [43] E. Forrest, L.-W. Hu, J. Buongiorno y T. McKrell, «Pool Boiling Performance of Novec 649 Engineered Fluid,» Department of Nuclear Science and Engineering. Institute of Technology of Cambridge, Massachusetts, 2009.
- [44] 3M, *3M Novec 7000 Engineered Fluid*, St. Paul, 2014.
- [45] S. Pedro-Valdés y M. L. Gómez, *Boletín Científico Técnico INIMET*, La habana, Cuba: INIMET, 2010.
- [46] Z. ZM, *Reserator1 or ZM-WB2 Gold*, 2004.
- [47] A. Liberman, «Core Temp,» [En línea]. Available: <https://www.alcpu.com/CoreTemp/>. [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [48] Intel, «IntelBurn Test,» [En línea]. Available: <https://intelburntest.en.lo4d.com/>. [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [49] A. Z. Ballesteros, *Algebra lineal. Apuntes*, Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2011.
- [50] A. M. Domingo, *Apuntes de Mecánica de Fluidos*, Madrid: E.T.S Arquitectura de Madrid, 2011.
- [51] D. C. Knowledge, «NREL to use Hot Water Cooling From Asetek,» [En línea]. Available: <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2013/04/10/nrel-to-use-hot-water-cooling-from-asetek>.
- [52] B. Kleyman, «Liquid Cooling, a better solution for Data Center Cooling,» [En línea]. Available: <https://datacenterfrontier.com/liquid-cooling-solution-data-center-cooling/>.
- [53] R. y. C. Frizonia, *"ERA", EQUIPO DE REFRIGERACIÓN PARA ARES*, Cádiz, 2015.

- [54] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [55] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.
- [56] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.
- [57] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.
- [58] Anonimo, «Principios de Conservacion de la Energia,» [En línea]. Available: <https://www.areaciencias.com/fisica/principio-de-conservacion-de-la-energia.html>.
- [59] IUPAC, Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.

ANEXO I: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En el presente Anexo se adjuntan los resultados obtenidos en todos los ensayos realizados durante la realización del trabajo.

Ensayos realizados sin vacío con fluido Novec® 649

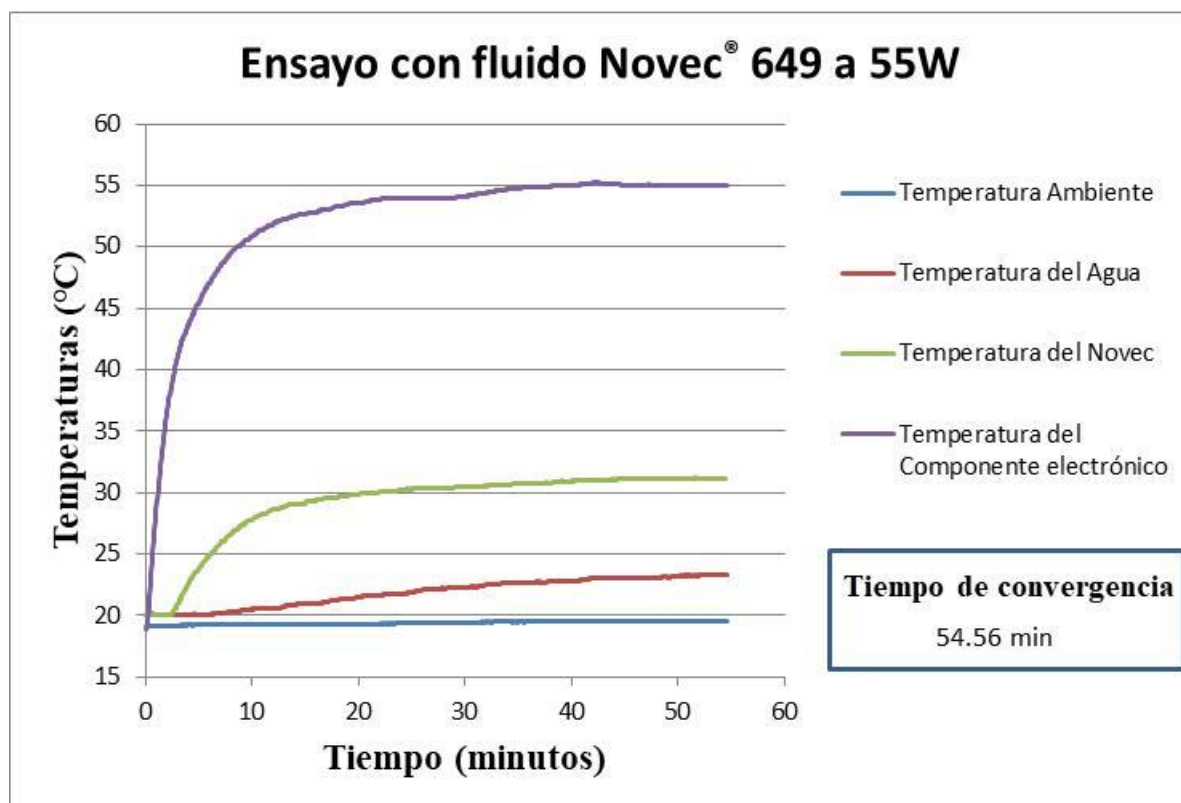


Figura A1-0-1 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 55W sin realizar vacío.

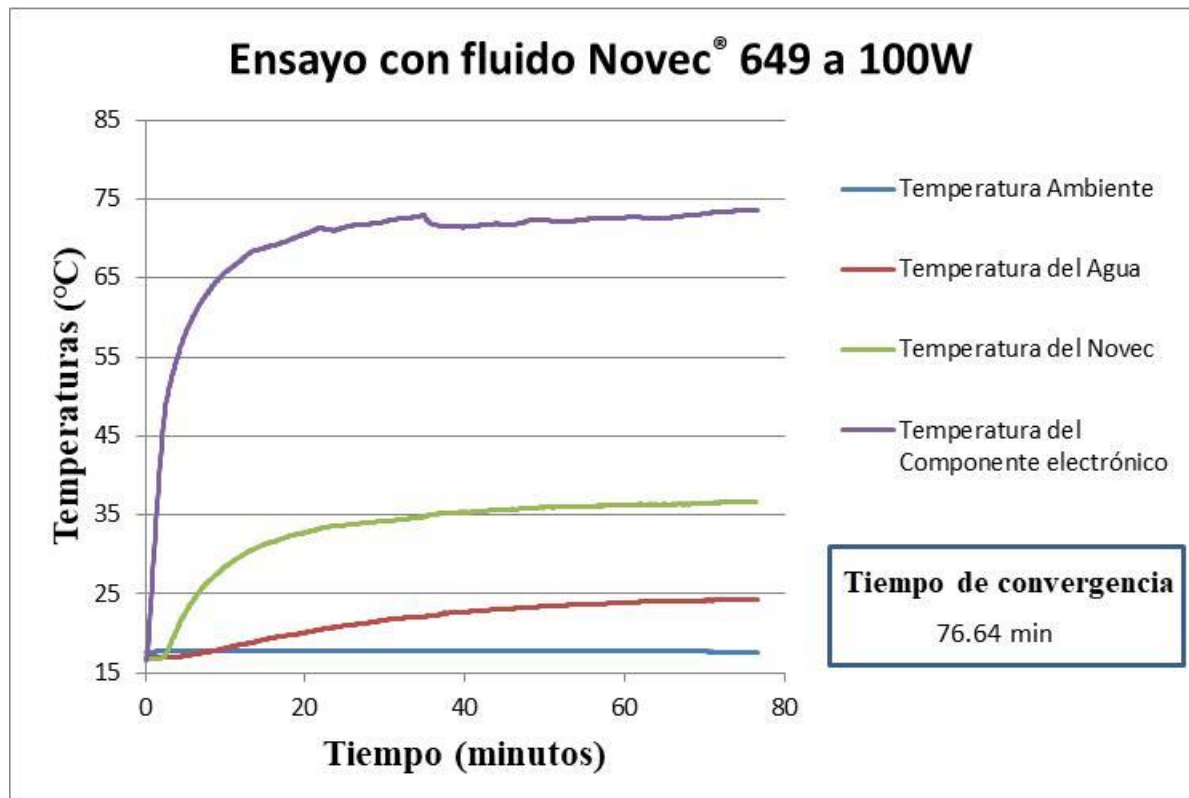


Figura A1-0-2 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 100W sin realizar vacío.

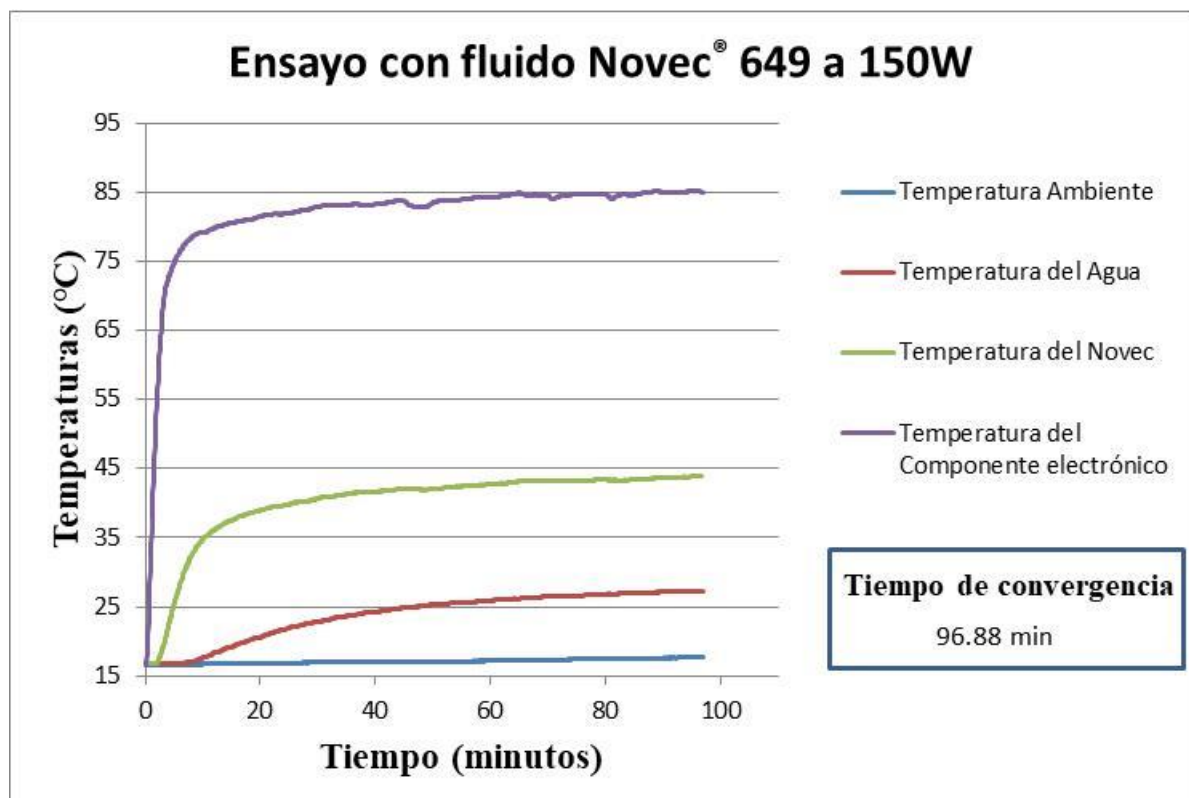


Figura A1-0-3 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 150W sin realizar vacío.

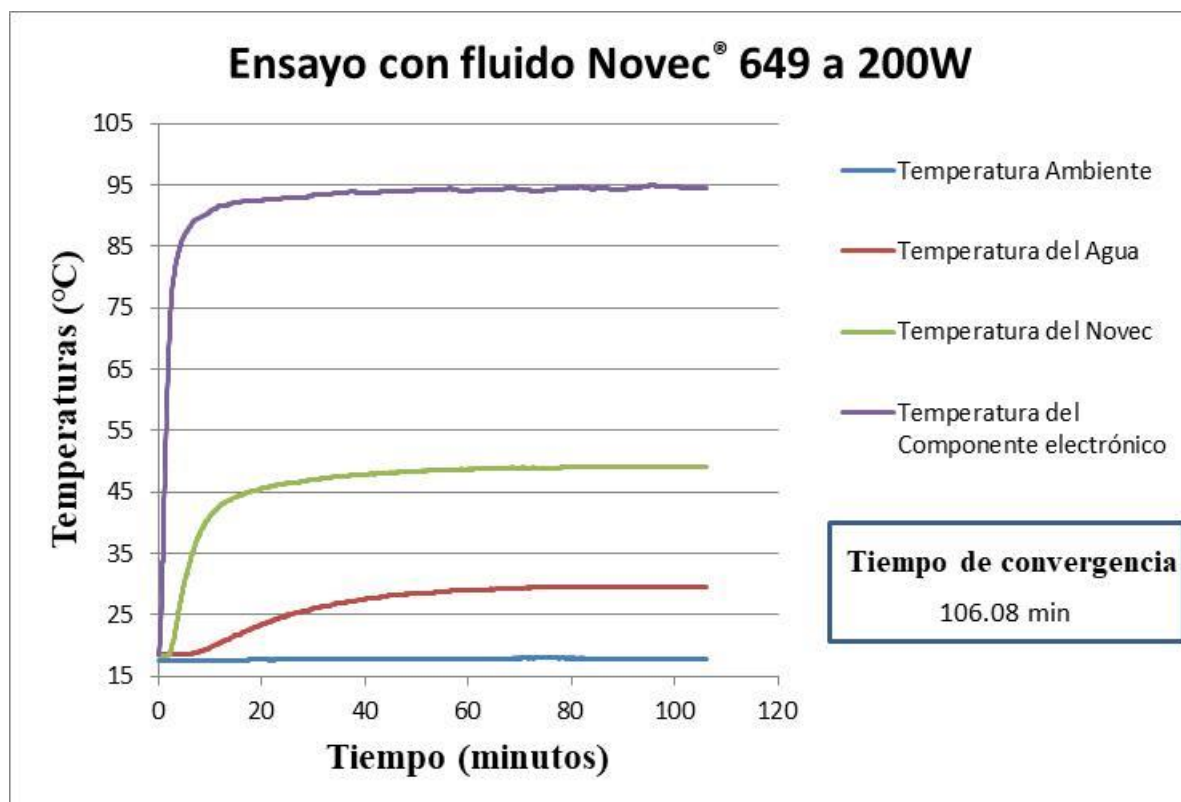


Figura A1-0-4 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 200W sin realizar vacío.

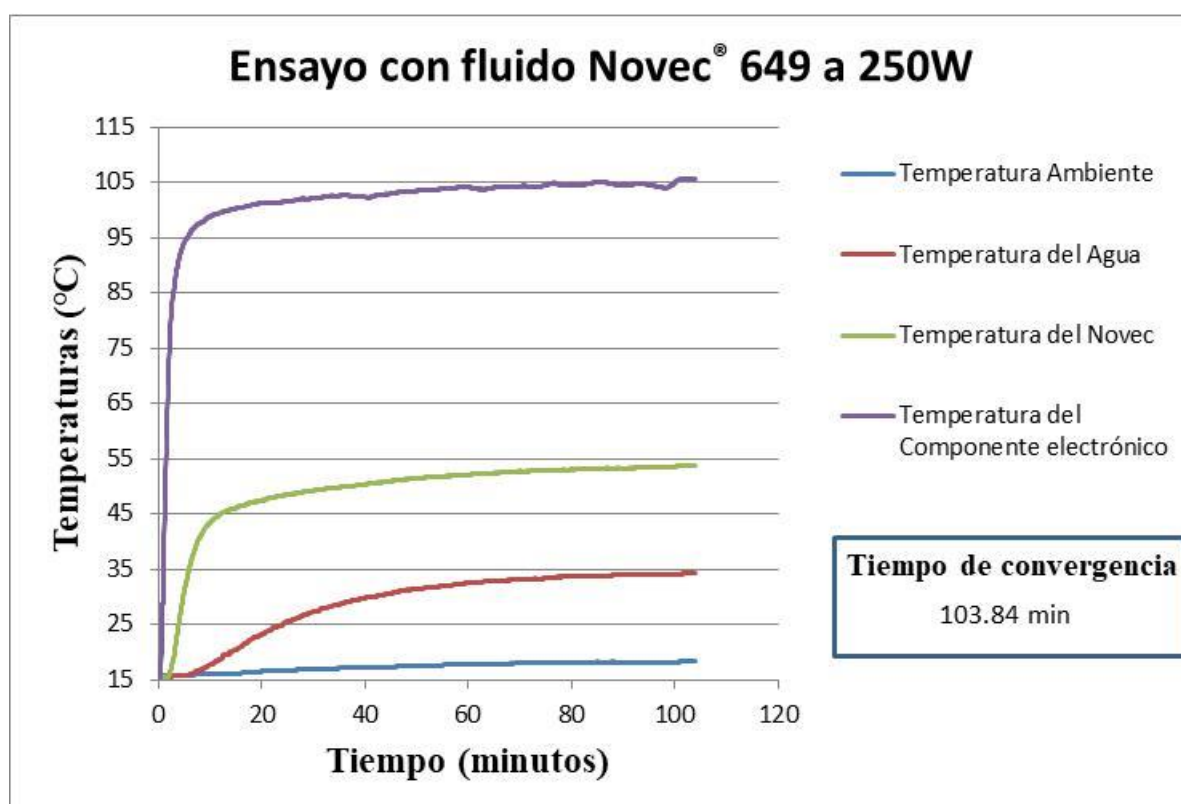


Figura A1-0-5 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 250W sin realizar vacío.

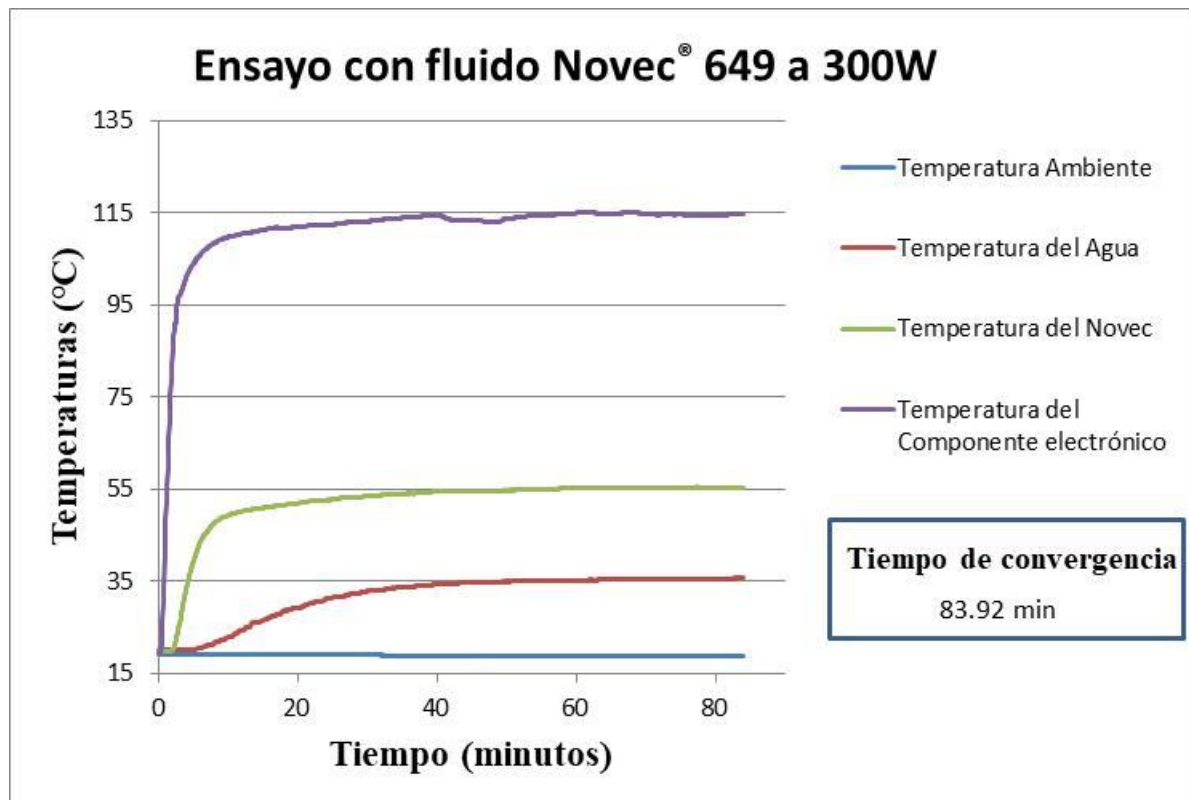


Figura A1-0-6 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 300W sin realizar vacío.

Ensayos realizados a vacío con fluido Novec® 649

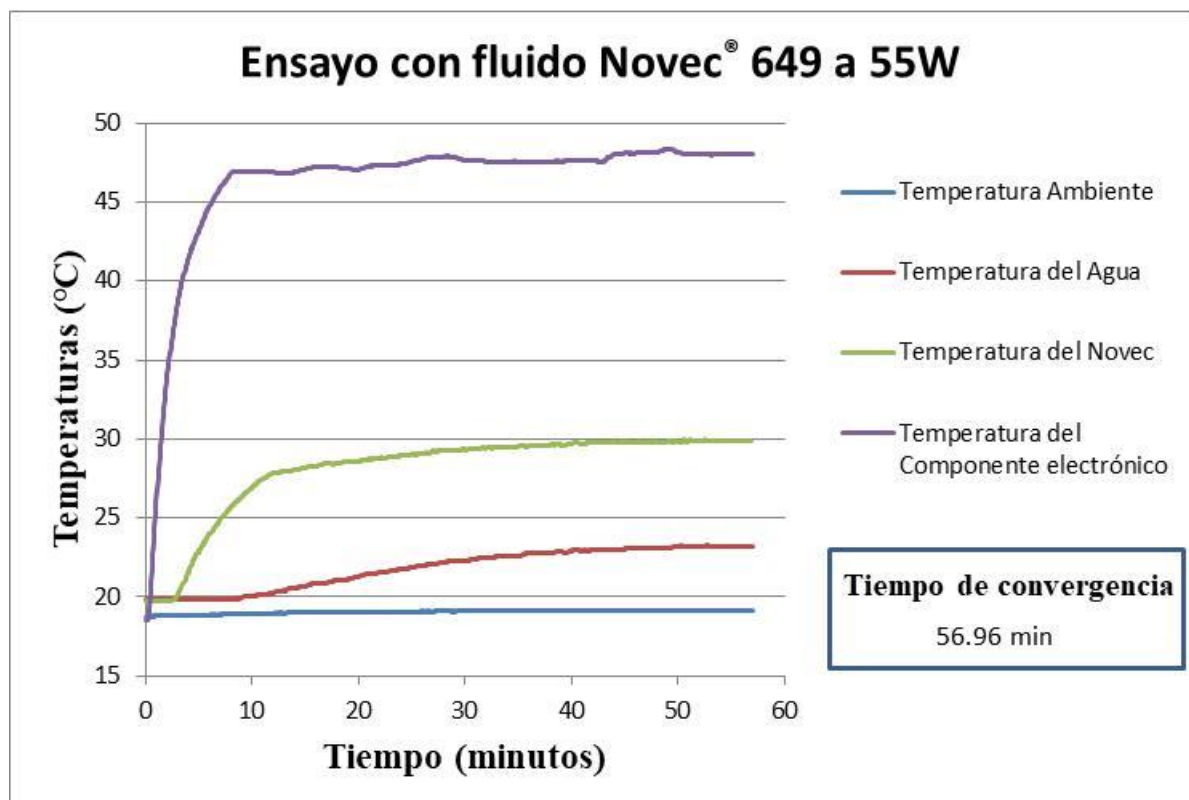


Figura A1-0-7 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 55W con vacío.

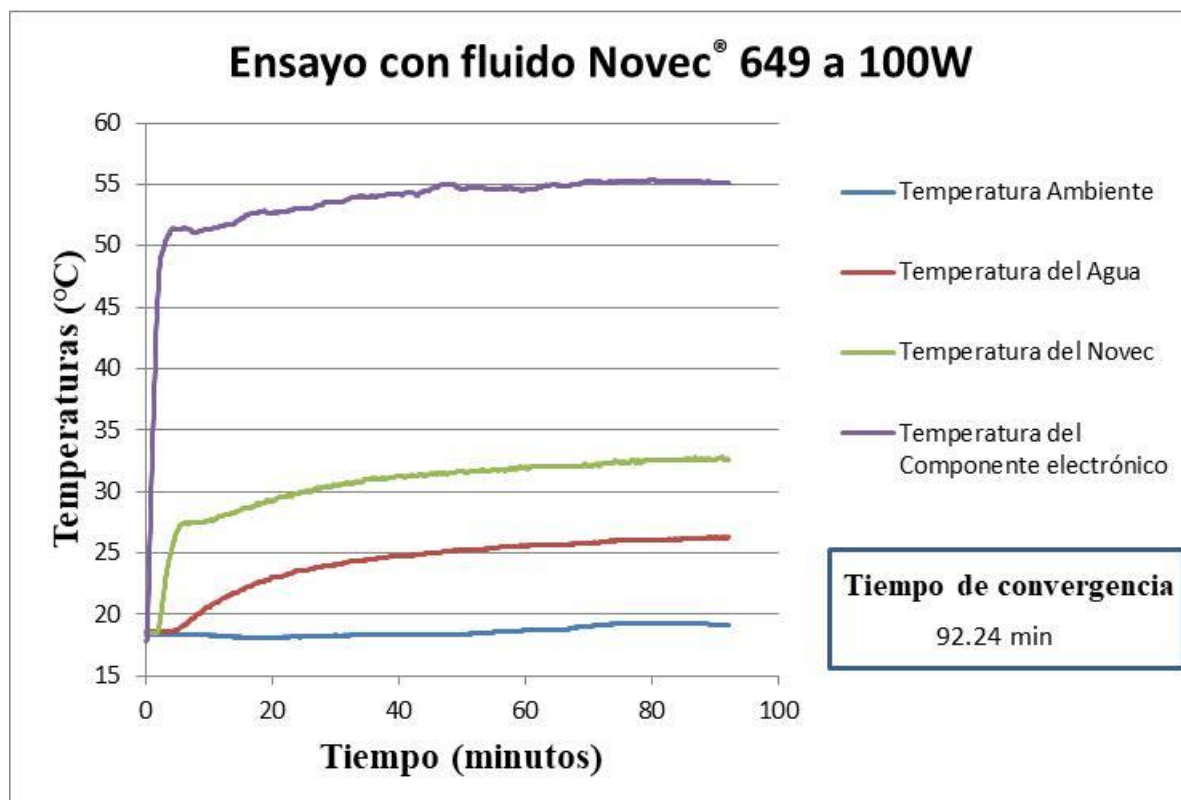


Figura A1-0-8 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 100W con vacío.

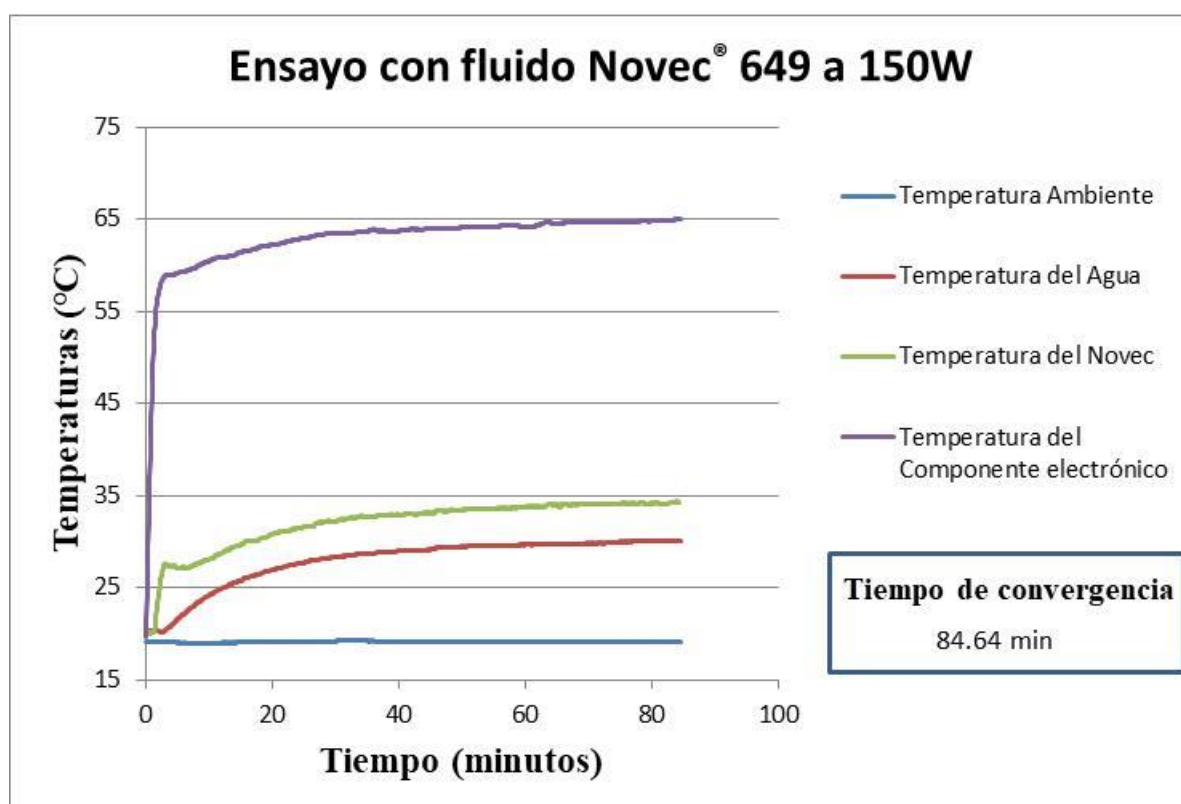


Figura A1-0-9 Gráfica ensayo con fluido Novec® 649 a 150W con vacío.

Ensayos realizados sin vacío con fluido Novec® 7000

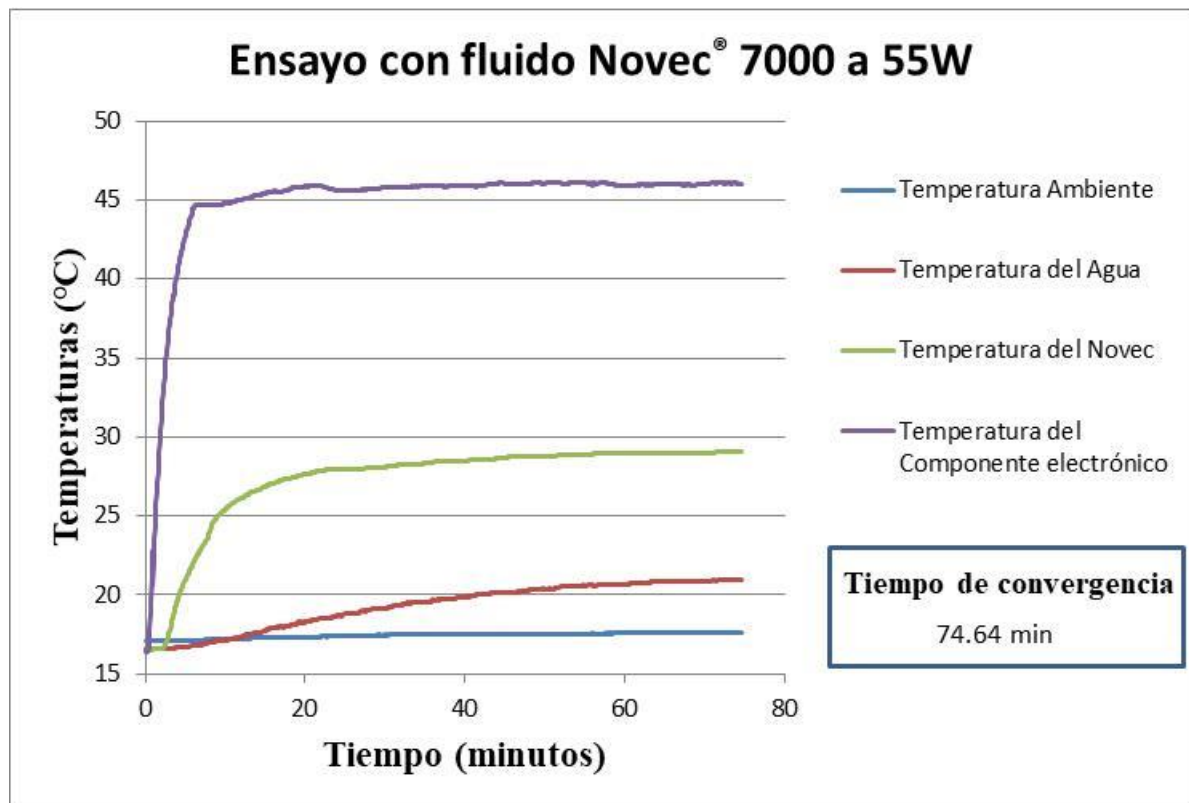


Figura A1-0-10 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 55W sin realizar vacío.

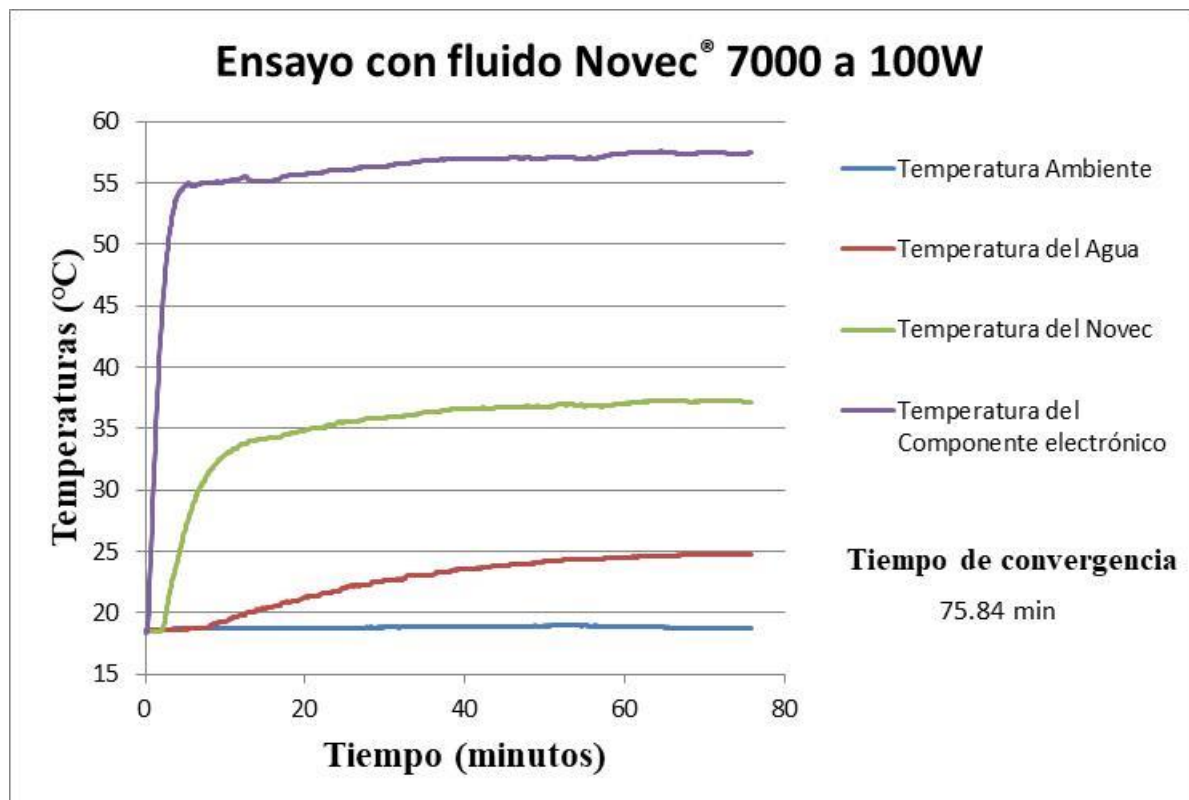


Figura A1-0-11 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 100W sin realizar vacío.

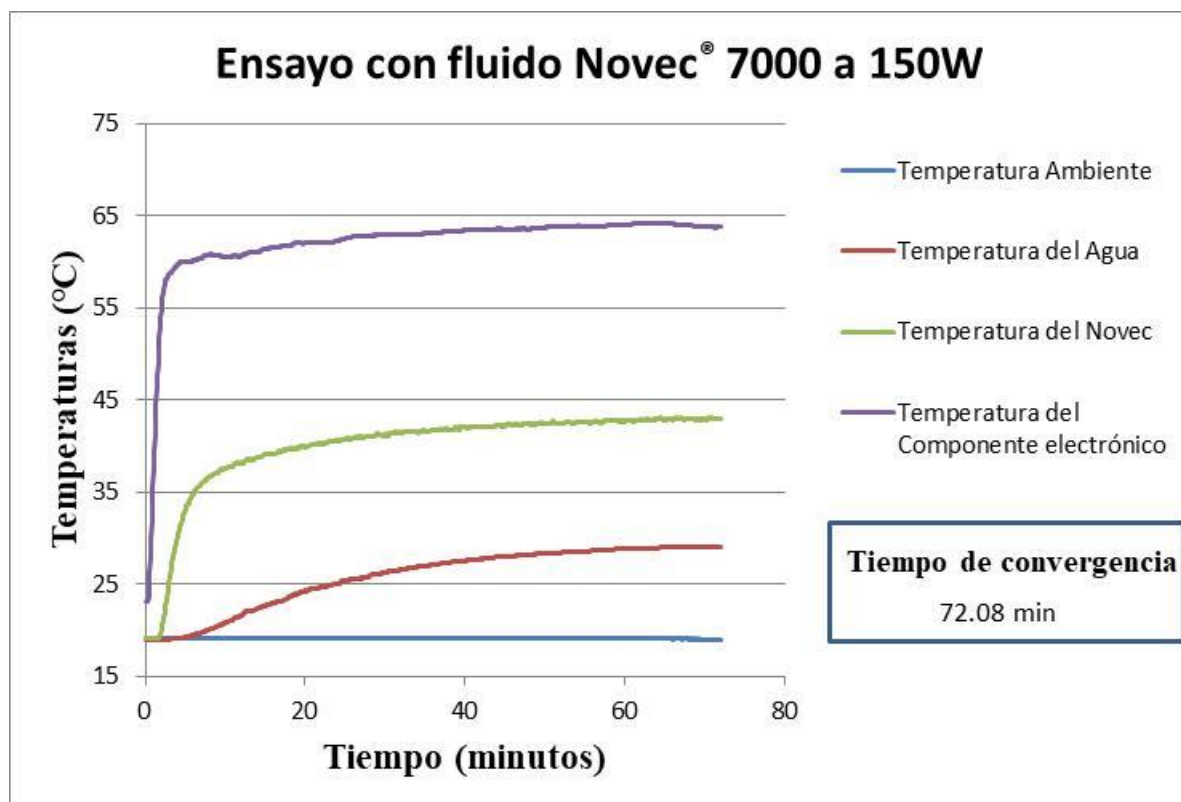


Figura A1-0-12 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 150W sin realizar vacío.

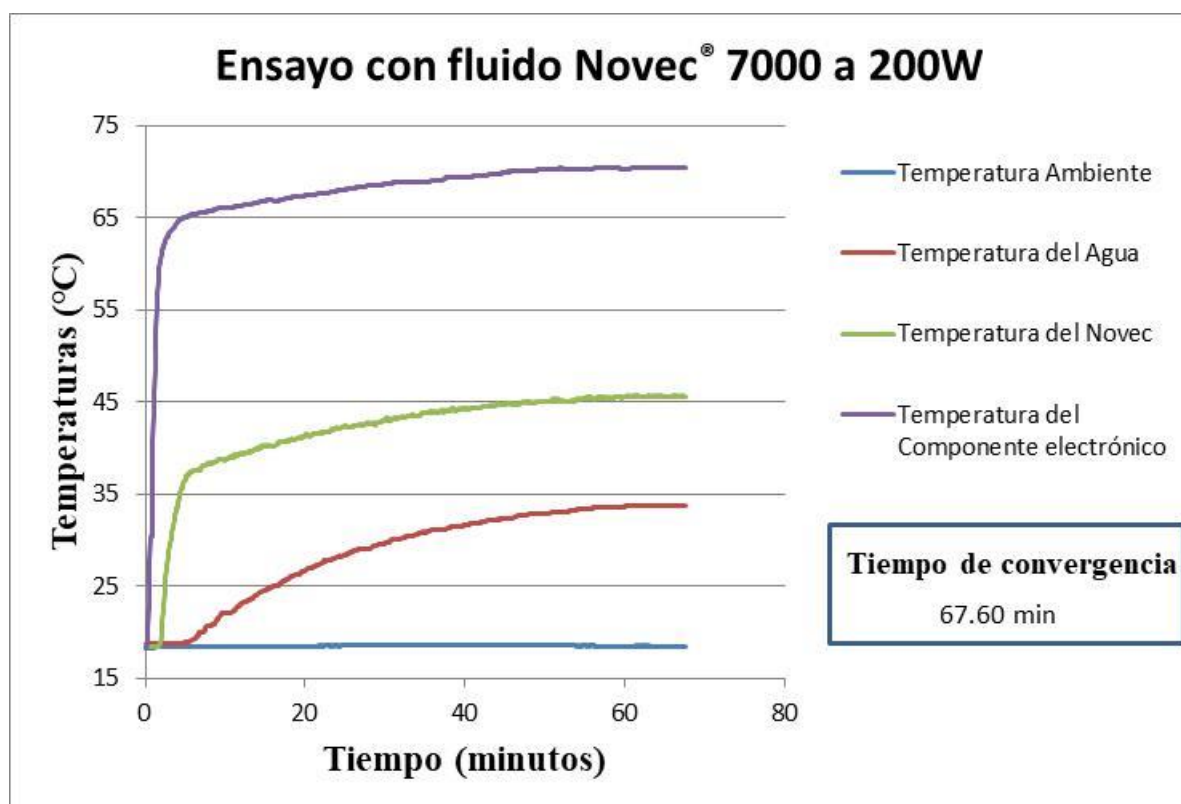


Figura A1-0-13 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 200W sin realizar vacío.

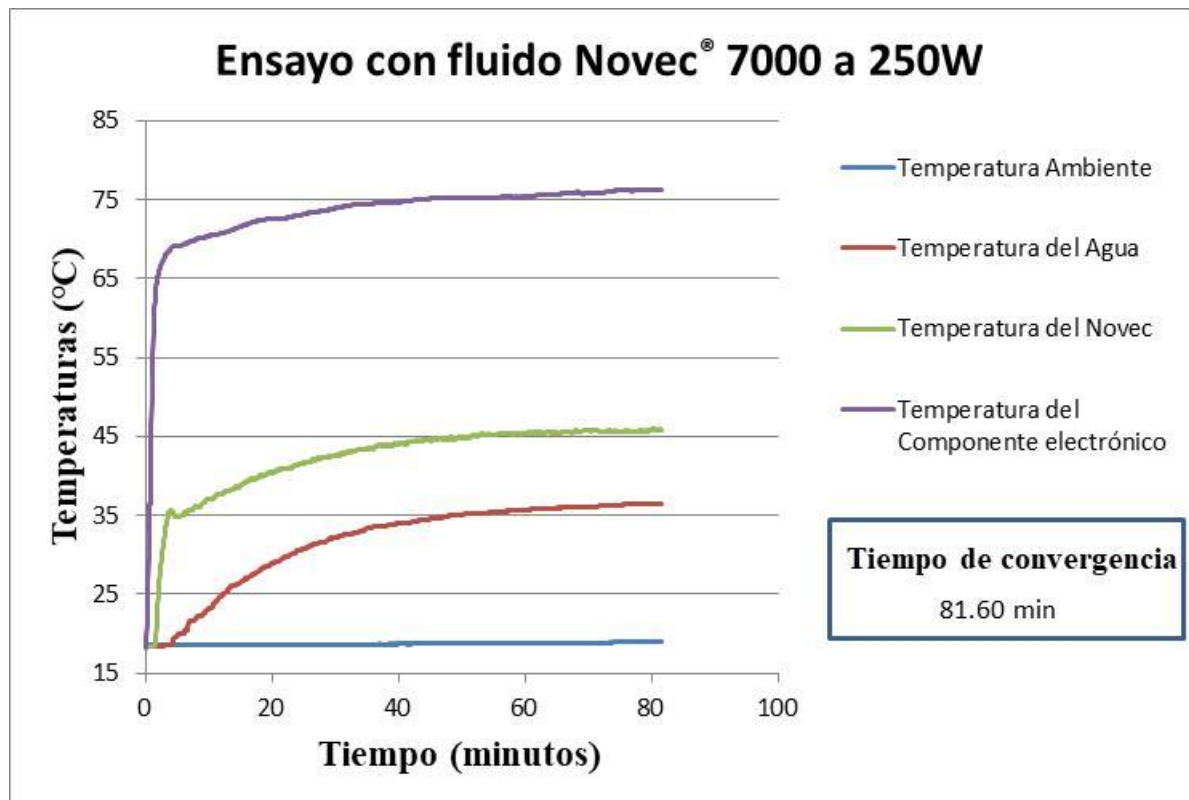


Figura A1-0-14 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 250W sin realizar vacío.

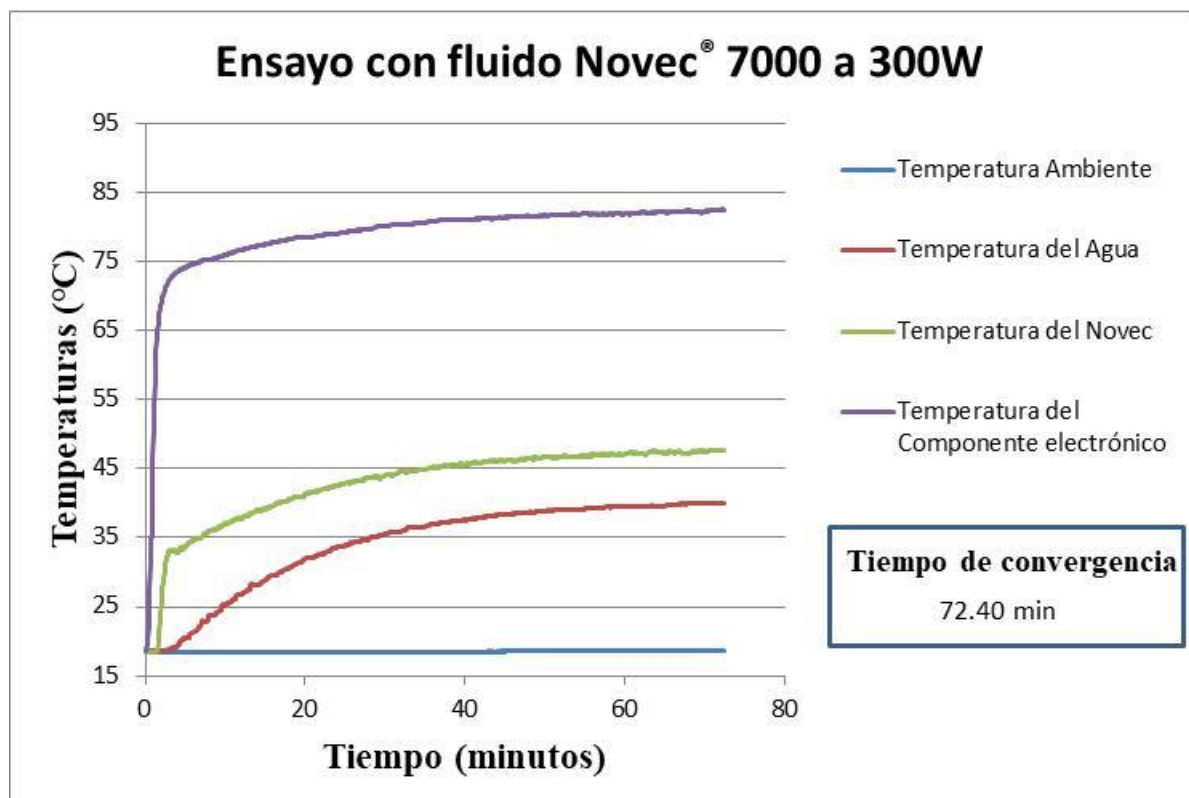


Figura A1-0-15 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 300W sin realizar vacío.

Ensayos realizados a vacío con fluido Novec® 7000

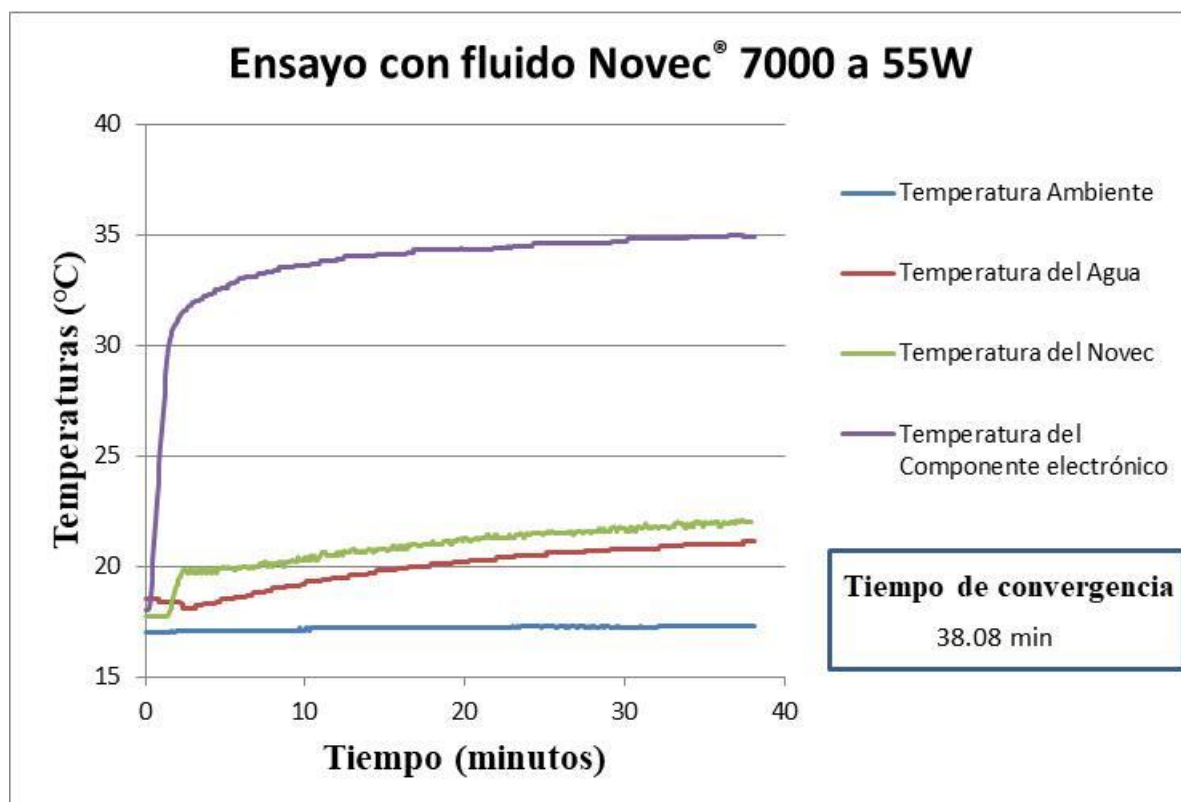


Figura A1-0-16 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 55W con vacío.

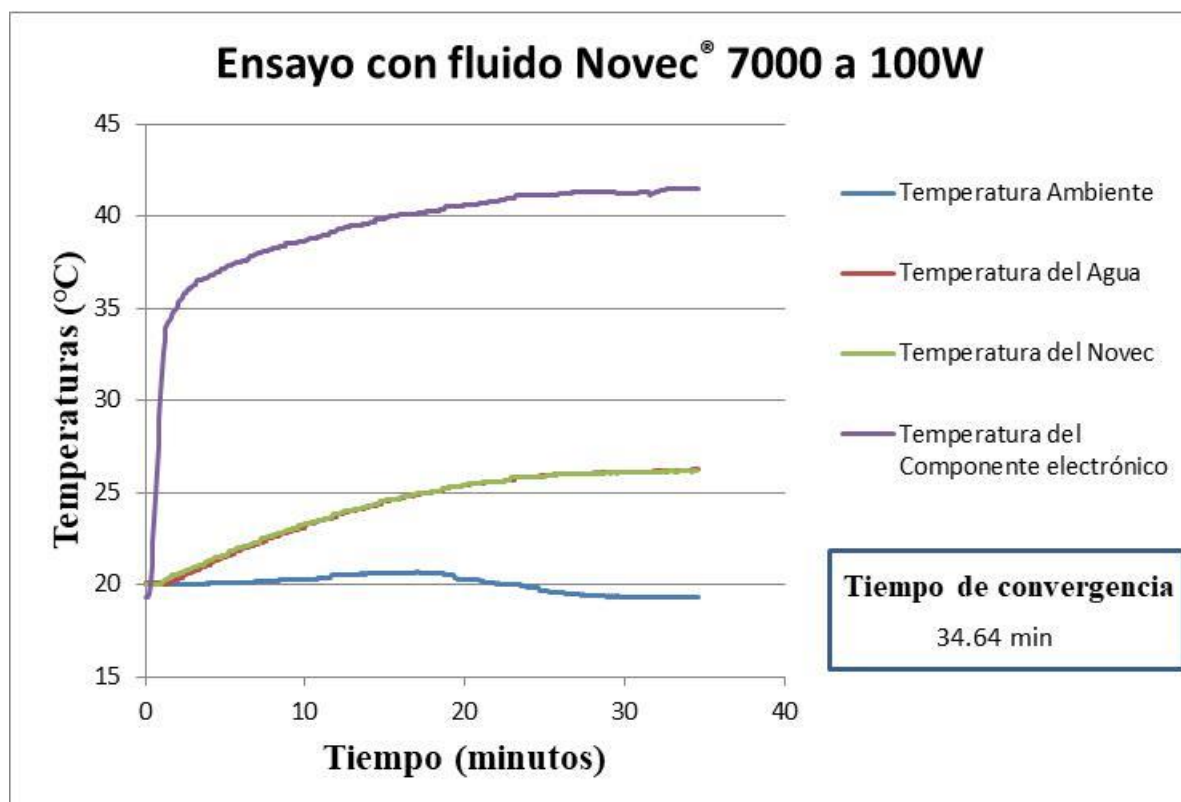


Figura A1-0-17 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 100W con vacío.

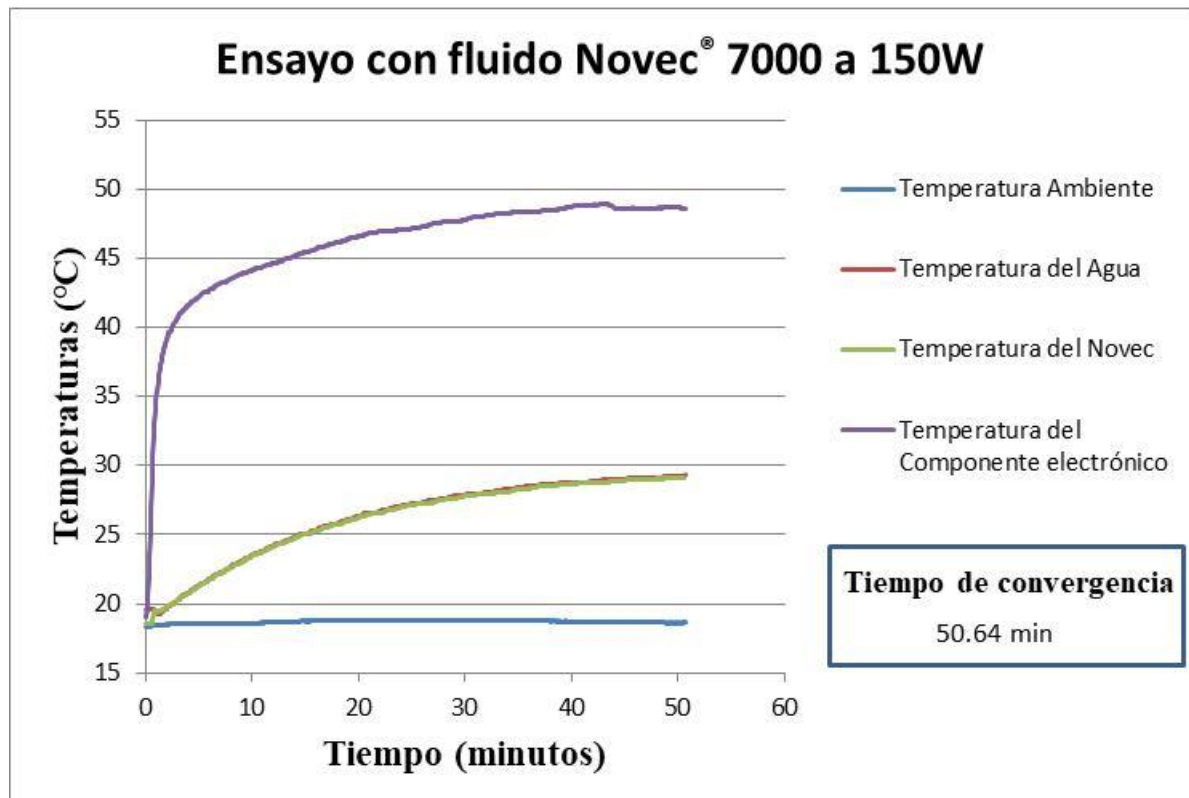


Figura A1-0-18 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 150W con vacío.

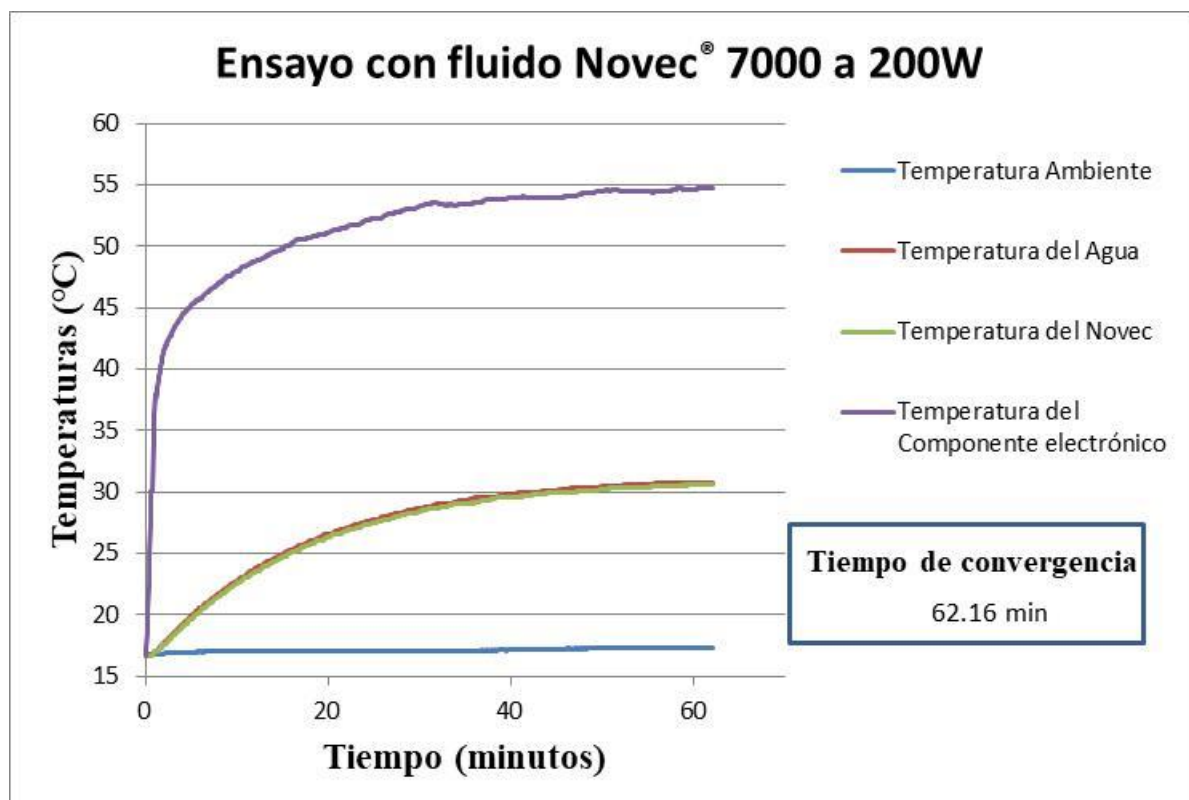


Figura A1-0-19 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 200W con vacío.

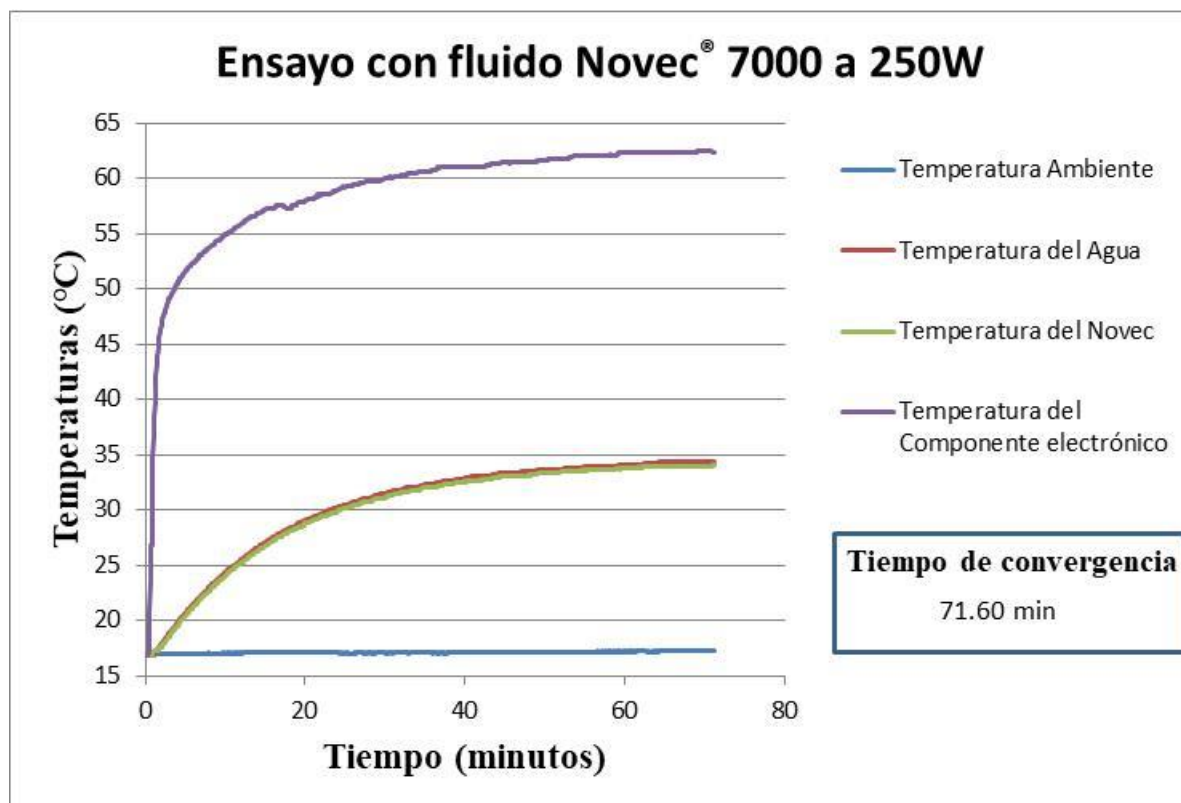


Figura A1-0-20 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 250W con vacío.

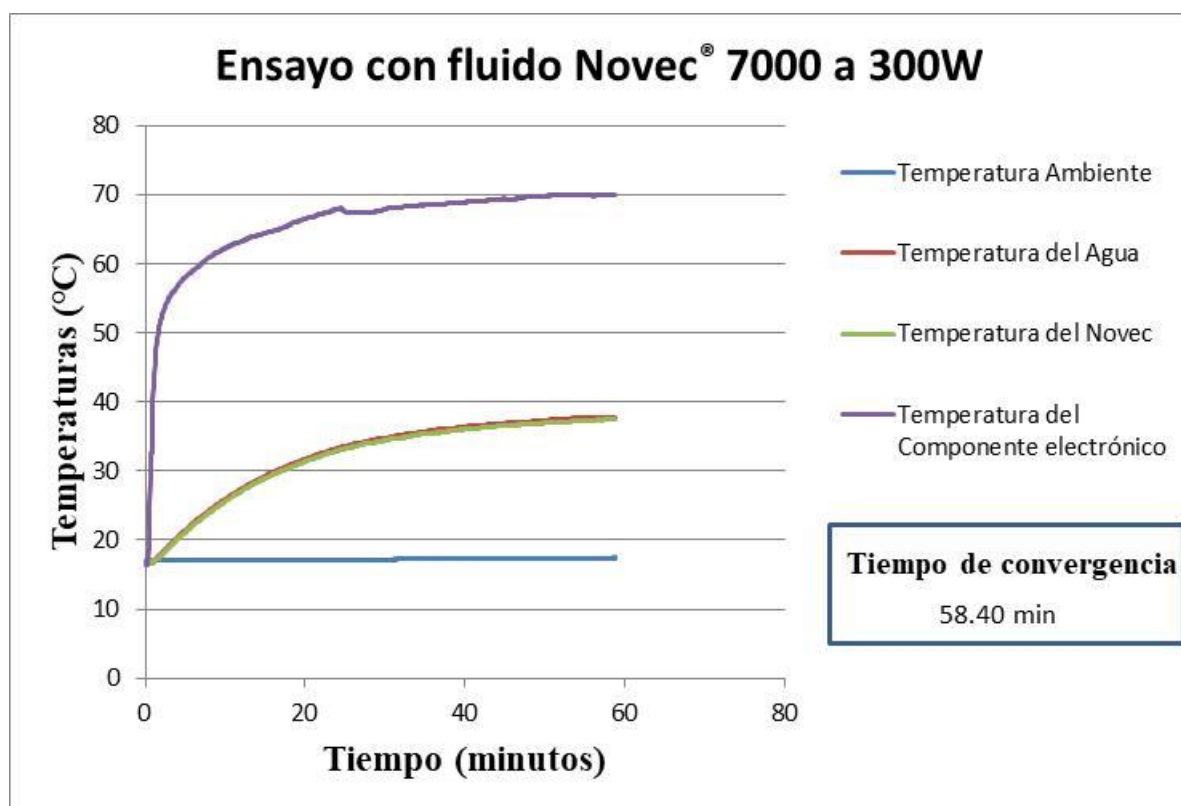


Figura A1-0-21 Gráfica ensayo con fluido Novec® 7000 a 300W con vacío.

Ensayos realizados con agua destilada

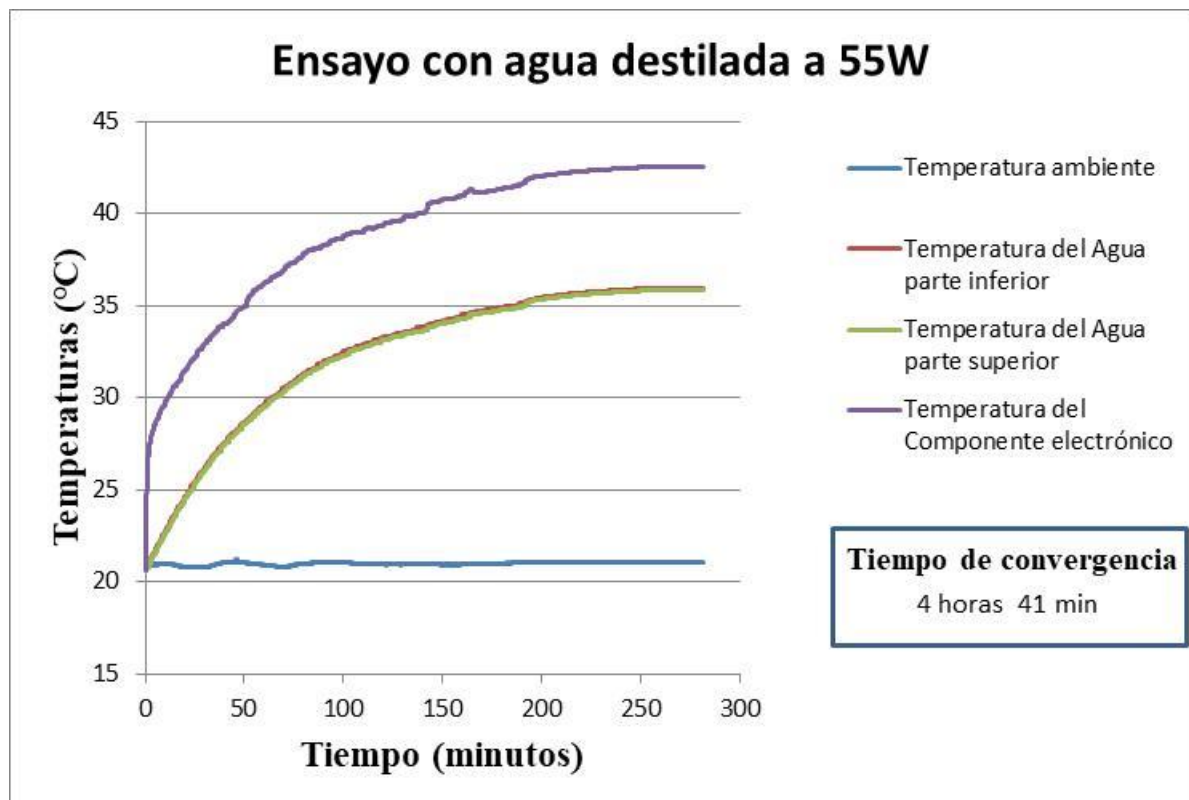


Figura A1-0-22 Gráfica ensayo con agua destilada a 55W.

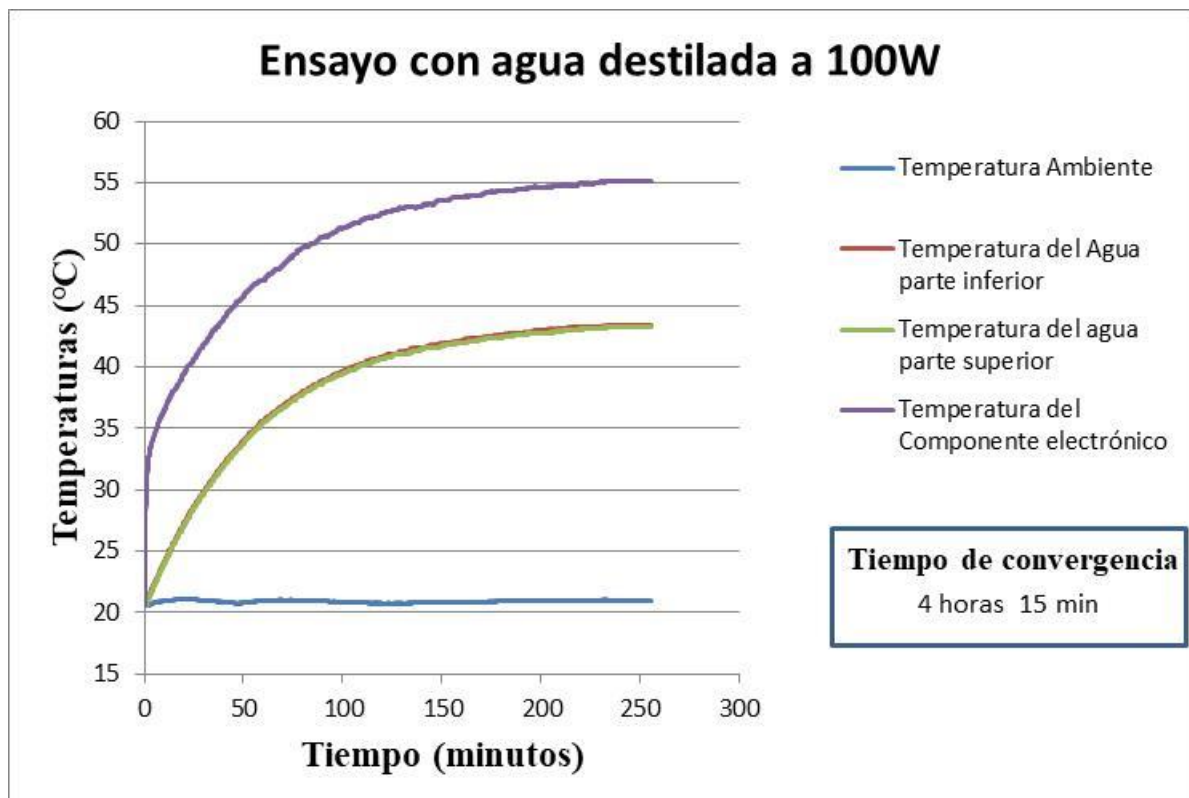


Figura A1-0-23 Gráfica ensayo con agua destilada a 100W.

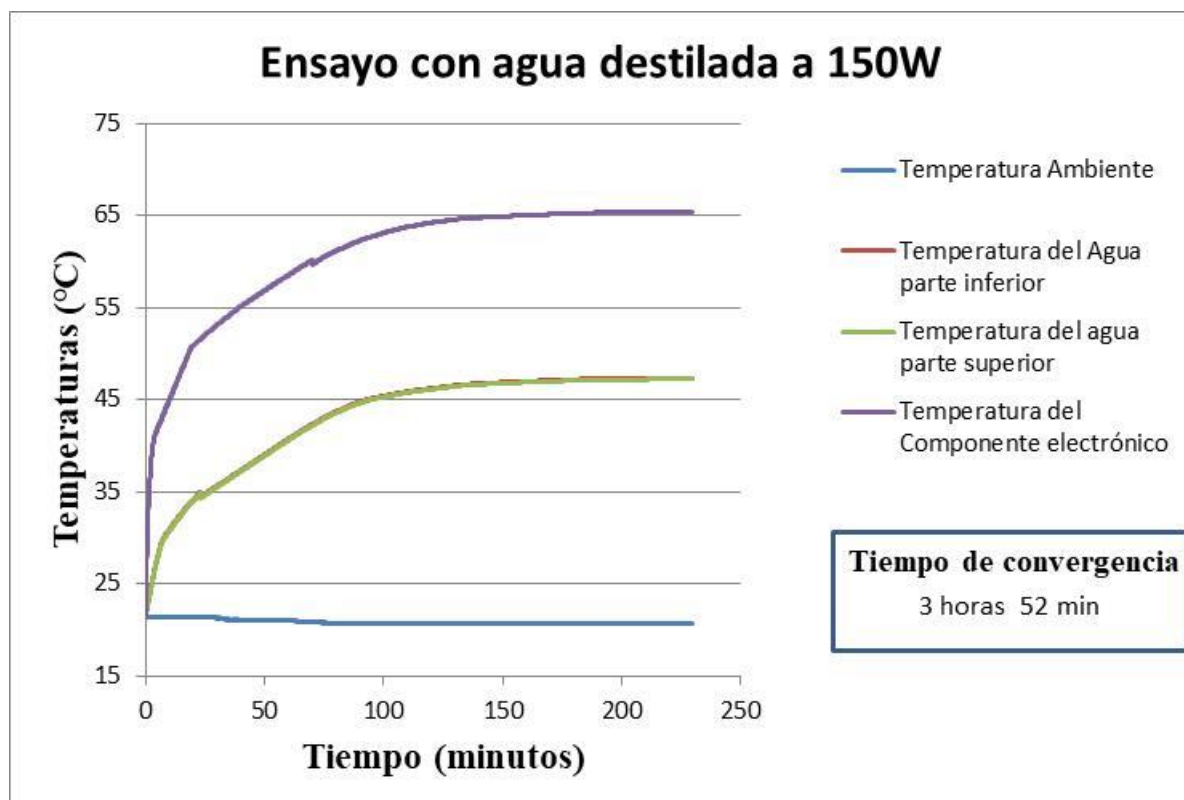


Figura A1-0-24 Gráfica ensayo con agua destilada a 150W.

Ensayos realizados con el sistema de refrigeración por aire

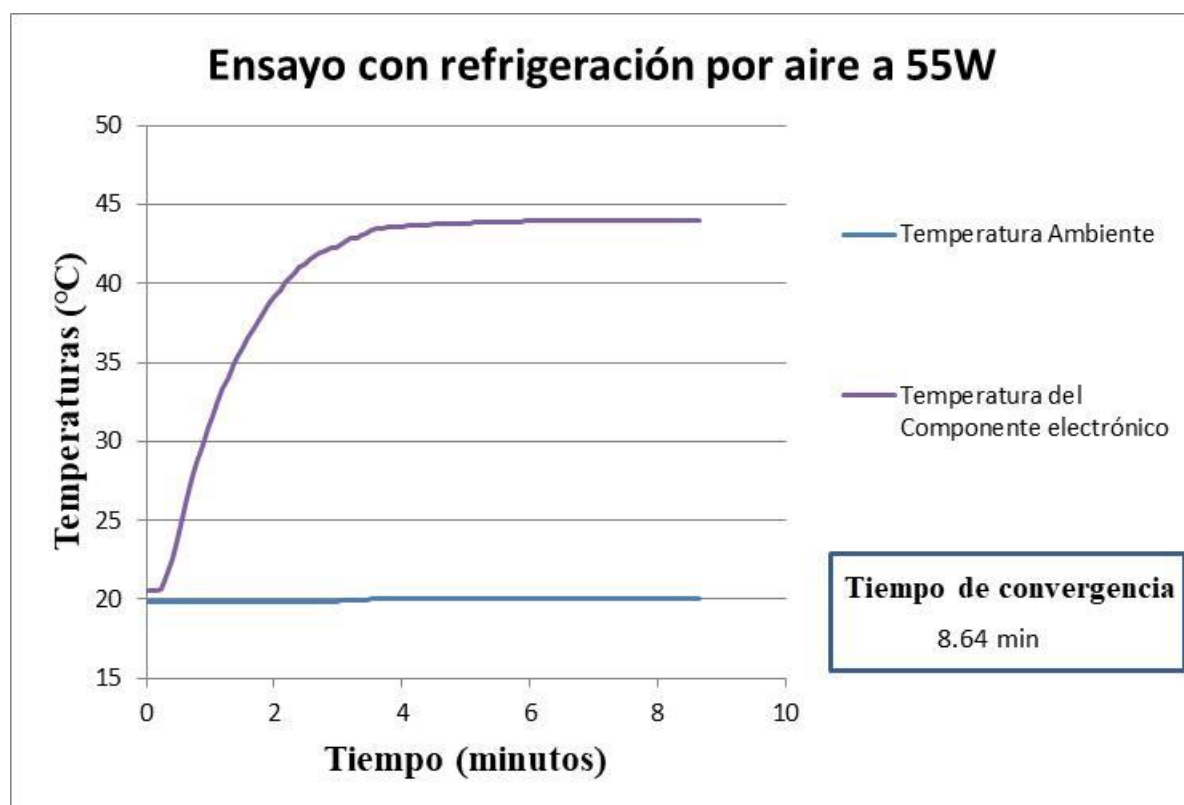


Figura A1-0-25 Gráfica ensayo con sistema de refrigeración por aire a 55W.

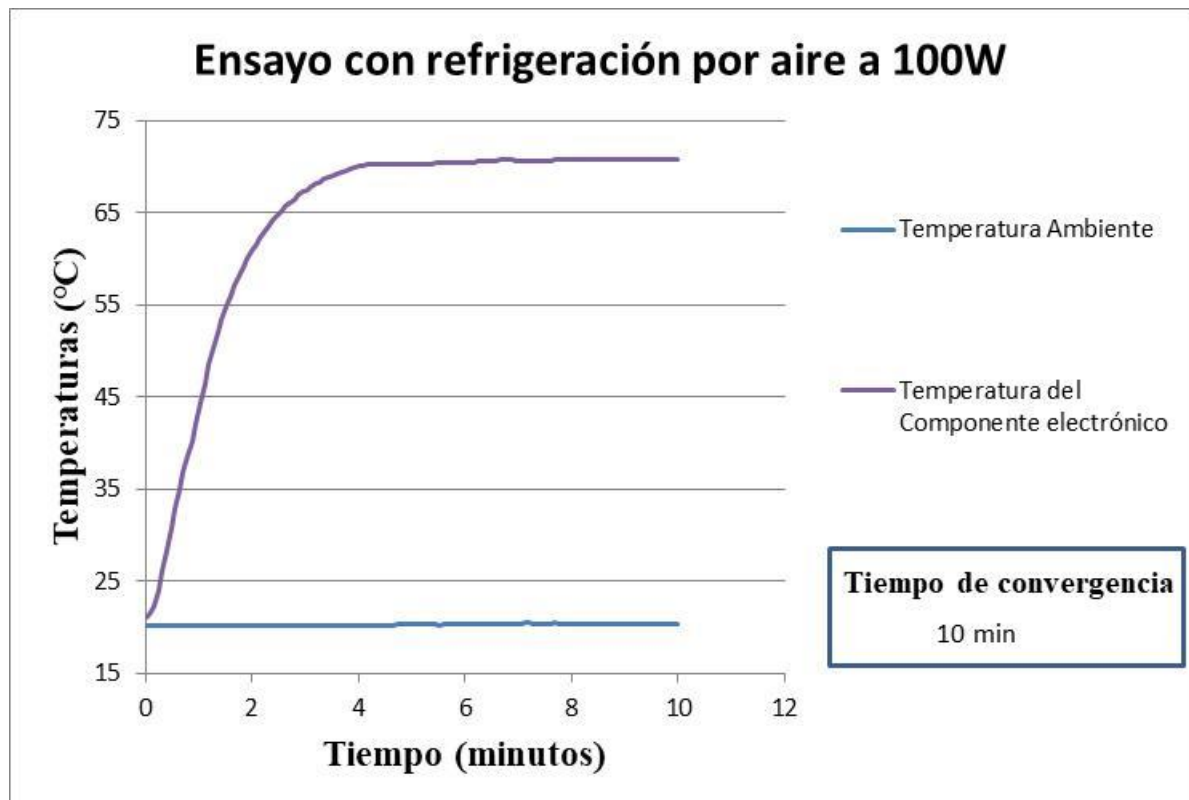


Figura A1-0-26 Gráfica ensayo con sistema de refrigeración por aire a 100W.

Ensayos realizados sobre el ordenador convencional utilizando el sistema de refrigeración incluido de serie

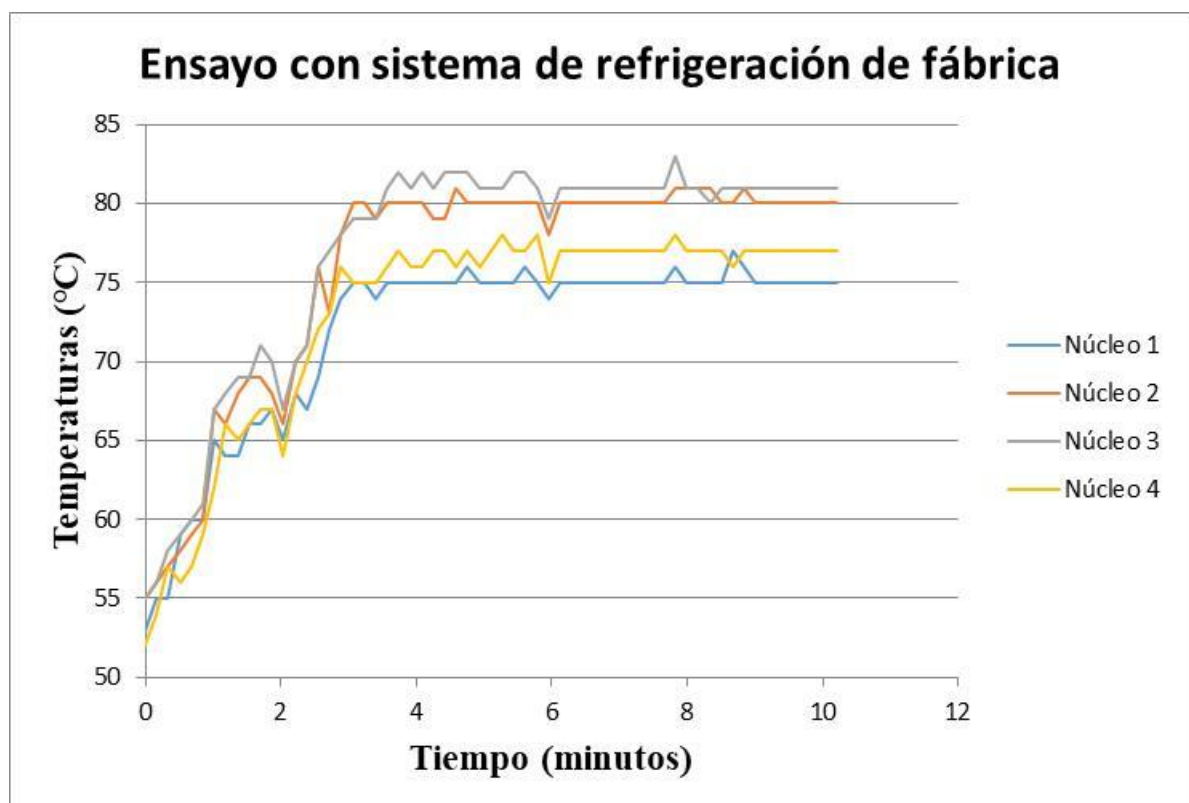


Figura A1-0-27 Registro de temperaturas obtenidas en cada núcleo durante la ejecución del ensayo utilizando el sistema de refrigeración incluido de serie.

Ensayos realizados sobre el ordenador convencional utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 7000 con vacío

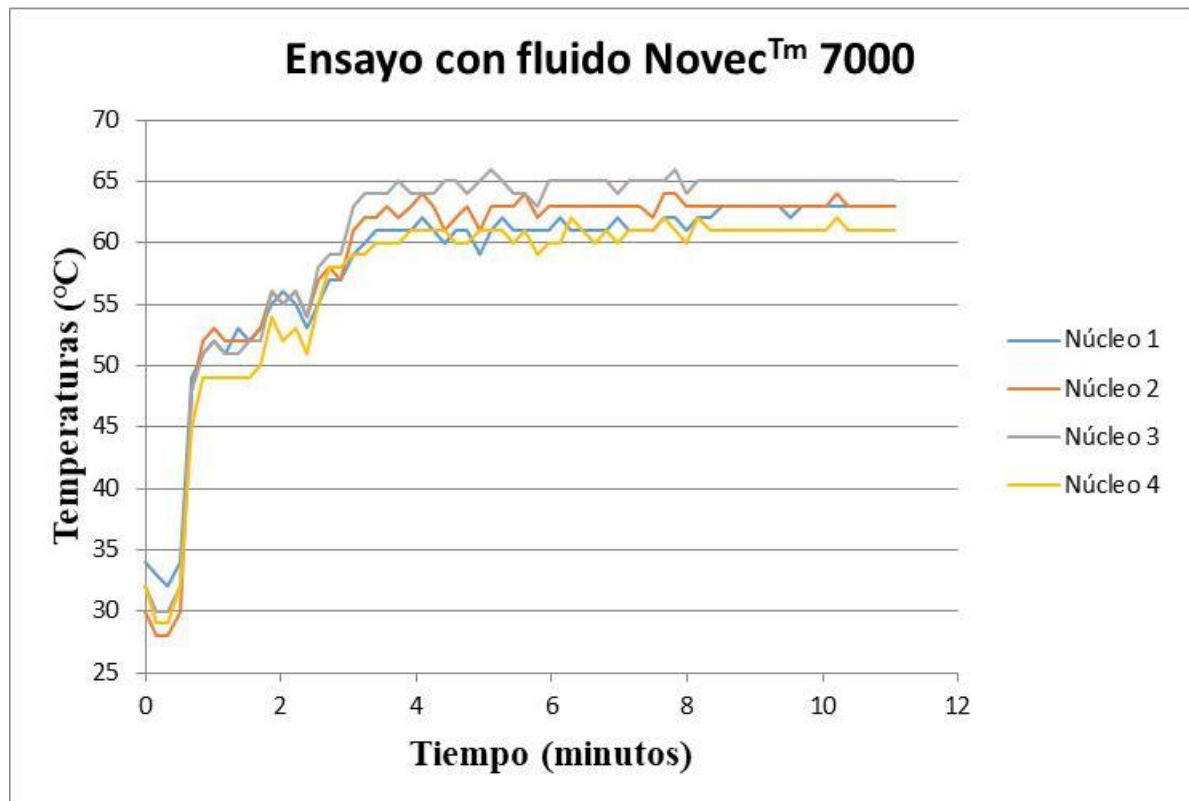


Figura A1-0-28 Registro de temperaturas obtenidas en cada núcleo durante la ejecución del ensayo utilizando como fluido refrigerante el fluido Novec[®] 7000 con vacío.

ANEXO II: HOJA TÉCNICA DE LOS FLUIDOS 3M™ NOVEC® 649 Y NOVEC® 7000

Product Information

3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid

Introduction

3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid is a clear, colorless and low odor fluid, one in a line of 3M products designed as replacements for ozone depleting substances (ODSs) and compounds with high global warming potentials (GWPs) such as sulfur hexafluoride (SF₆) and hydrofluorocarbons (HFCs), such as HFC-134a and HFC 245fa.

3M Novec 649 Engineered Fluid is an advanced heat transfer fluid, balancing customer needs for physical, thermal and electrical properties, with desirable environmental properties.

Typical Applications

Novec 649 fluid is an effective heat transfer fluid with a boiling point of 49°C. Novec 649 fluid is useful in heat transfer particularly where non-flammability or environmental factors are a consideration.

Examples of systems which benefit from use Novec 649 fluid include:

- Organic Rankine Cycle
 - Diesel Engines
 - Generators
 - Geothermal Applications
 - Solar Applications
- Electronics Cooling (Single or Dual Phase)
 - Power Electronics such as IGBTs or inverters
 - Transformers and other equipment (SF₆ replacement)
- Computer/Data Center Cooling

Properties Description

Composition of 3M™ Novec™ 649 Fluid	
Dodecafluoro-2-methylpentan-3-one	99.0 mole %, minimum
Chemical Formula	CF ₂ CF ₂ C(O)CF(CF ₃) ₂

Typical Physical Properties

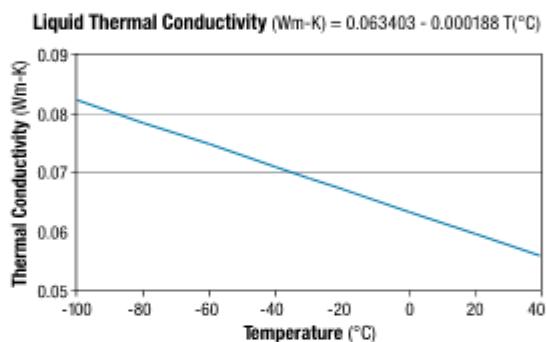
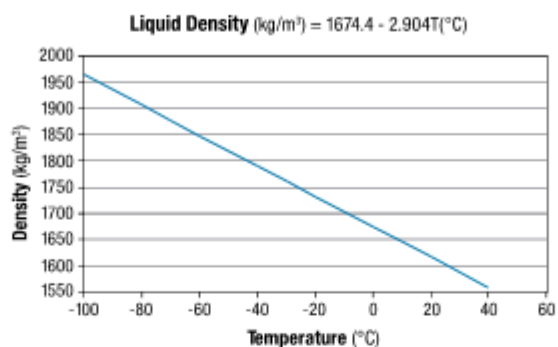
	3M™ Novec™ 649 Fluid
Boiling Point (°C)	49
Pour Point (°C)	-108
Molecular Weight (g/mol)	316
Critical Temperature (°C)	169
Critical Pressure (MPa)	1.88
Vapor Pressure (kPa)	40
Heat of Vaporization (kJ/kg)	88
Liquid Density (kg/m ³)	1600
Coefficient of Expansion (K ⁻¹)	0.0018
Kinematic Viscosity (cSt)	0.40
Absolute Viscosity (cP)	0.64
Specific Heat (J/kg-K)	1103
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.059
Surface Tension (mN/m)	10.8
Solubility of Water in Fluid (ppm by wt)	20
Dielectric Strength, 0.1" gap (kV)	>40
Dielectric Constant @ 1kHz	1.8
Volume Resistivity (Ohm-cm)	10 ¹²
Global Warming Potential (GWP)	1



3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid

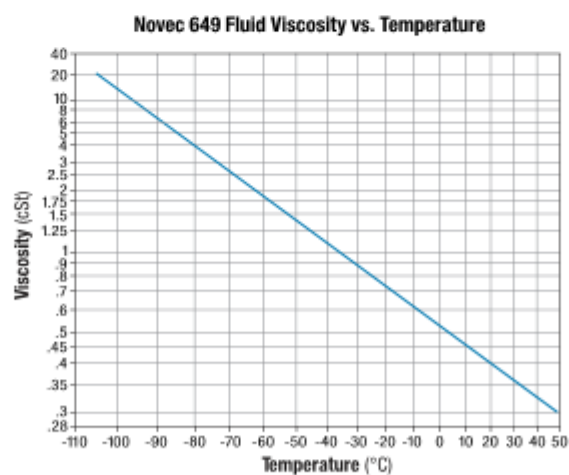
Thermophysical Properties

Not for
specification
purposes.



Liquid Specific Heat ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) = $1091.9 + 0.3419 T(^{\circ}\text{C}) + 0.0039T^2$

Vapor Pressure $\ln(P[\text{Pa}]) = -3545.3/T(\text{K}) + 22.492$



Features

The environmental profile, margin of safety, low viscosity, high molecular weight, low pour point and heat transfer performance of 3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid make it an ideal candidate for a variety of heat transfer applications.

Novec 649 fluid is compatible with a wide range of materials of construction and requires no special piping or handling systems, and is very stable in storage. Its high dielectric constant makes it safe for direct contact in most electronics/computing applications.

Physical Properties

Properties	3M™ Novec™ 649 Fluid	SF ₆	HFC-245fa	HFC-134a
Ozone Depletion Potential (ODP) ¹	0.0	0.0	0.0	0.0
Global Warming Potential ²	1	23900	1030	1,300
Atmospheric Lifetime (years)	0.014	3200	7.6	140

¹ World Meteorological Organization (WMO) 1998, Model-Derived Method.

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007 Method, 100 Year (TH).

Stability

Novec 649 fluid should be used in a sealed system to prevent interaction with water. Fluoroketones like Novec 649 fluid, though reactive with liquid water (ie. a separate water phase), are remarkably stable in its absence to over 300°C. 3M's applications engineers are available to discuss system design and trade-offs for Novec 649 fluid vs. alternative heat transfer fluids or solutions.

Environmental, Health and Safety

Studies by a third party laboratory (Massachusetts Institute of Technology) have shown that Novec 649 fluid has an estimated atmospheric lifetime of five days due to photolysis in sunlight.¹

The potential for Novec 649 fluid to impact the radiative balance in the atmosphere (i.e., climate change) is limited by this very short atmospheric lifetime. [Using a measured IR cross-section and the method of Pincock et.al., the instantaneous radiative forcing for Novec 649 fluid is calculated to be 0.50 Wm⁻²ppbV⁻¹.] This radiative forcing and a 5-day atmospheric lifetime result in a GWP value of about 1 [using the WMO 1999 method over a 100-year integration time horizon].

The photolysis of Novec 649 fluid is expected to rapidly produce fluorinated alkyl radicals similar to those produced by other fluorochemicals. Studies of the atmospheric chemistry of these radical species and their degradation products have concluded that they have no impact on stratospheric ozone. This combined with its very short atmospheric lifetime, leads to the conclusion that Novec 649 fluid has an ozone depletion of zero.¹

Before using this product, please read the current product Material Safety Data Sheet (available online or through your 3M sales or technical service representative) and the precautions and directions for use on the product package. Follow all applicable precautions and directions for use.

¹ N. Taniguchi, T.J. Wallington, M.D. Hurley, A.G. Guehin, L.T. Molina and M.J. Molina, *Atmospheric Chemistry of C₂F₅C(O)CF(CF₃)₂: Photolysis and Reaction with Cl Atoms, OH Radicals and Ozone*. *J Phys Chem A*, 2003, 107, 2674 – 2679.

Toxicity Profile

3M carefully characterizes the toxicity of new materials early in the product development process. These early studies and the subsequent studies conducted by independent laboratories indicate that Novec 649 fluid is very low in both acute and repeat dose toxicity. The No Observed Adverse Effect Level (NOAEL) for all endpoints of acute toxicity is 10% (100,000 ppmV) based on a cardiac sensitization study and a 4-hour acute inhalation study. The 8-hour time weighed average (TWA) exposure guideline for Novec 649 fluid is 150 ppmV. On this basis, foreseeable use under normal operating conditions results in a large margin of safety between anticipated exposure and the exposure guideline.

3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid

Recycle and Disposal Options

Used Fluid Return Program

3M offers a program for free pickup and return of used 3M specialty fluids in the U.S. A pre-negotiated handling agreement between users and our authorized service provider offers users broad protection against future liability for used 3M product. The fluid return program is covered by independent third-party financial and environmental audits of treatment, storage and disposal facilities. Necessary documentation is provided. A minimum of 30 gallons of used 3M specialty fluid is required for participation in this free program.

For additional information on the 3M Used Fluid Return Program, contact your local 3M representative or call 3M Customer Service at 800.810.8513.

Resources

3M™ Novec™ Engineered Fluids are supported by global sales, technical and customer service resources, with technical service laboratories in the U.S., Europe, Japan, Latin America and Southeast Asia. Users benefit from 3M's broad technology base and continuing attention to product development, performance, safety and environmental issues. For additional technical information on 3M™ Novec™ 649 Engineered Fluid in the United States or for the name of a local authorized distributor, call 3M Electronics Markets Materials Division: **800 810 8513**.

The 3M™ Novec™ Brand Family

The Novec brand is the hallmark for a variety of patented 3M products. Although each has its own unique formula and performance properties, all Novec products are designed in common to address the need for safe, effective, sustainable solutions in industry-specific applications. These include precision and electronics cleaning, heat transfer, fire protection, lubricant deposition and several specialty chemical applications.

3M™ Novec™ Engineered Fluids • 3M™ Novec™ Aerosol Cleaners • 3M™ Novec™ 1230 Fire Protection Fluid • 3M™ Novec™ Electronic Coatings • 3M™ Novec™ Electronic Surfactants

United States
3M Electronics Markets
Materials Division
800 810 8513

China
3M China Ltd.
86 21 6275 3535

Europe
3M Belgium N.V.
32 3 250 7521

Japan
Sumitomo 3M Limited
813 3709 8250

Korea
3M Korea Limited
82 2 3771 4114

Product Use: All statements, technical information and recommendations contained in this document are based on tests or experience that 3M believes are reliable. However, many factors beyond 3M's control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application, including conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge and control, it is essential that the user evaluate the 3M product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application.

Warranty and Limited Remedy: Unless stated otherwise in 3M's product literature, packaging inserts or product packaging for individual products, 3M warrants that each 3M product meets the applicable specifications at the time 3M ships the product. Individual products may have additional or different warranties as stated on product literature, package inserts or product packages. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. User is responsible for determining whether the 3M product is fit for a particular purpose and suitable for user's application. If the 3M product is defective within the warranty period, your exclusive remedy and 3M's and seller's sole obligation will be, at 3M's option, to replace the product or refund the purchase price.

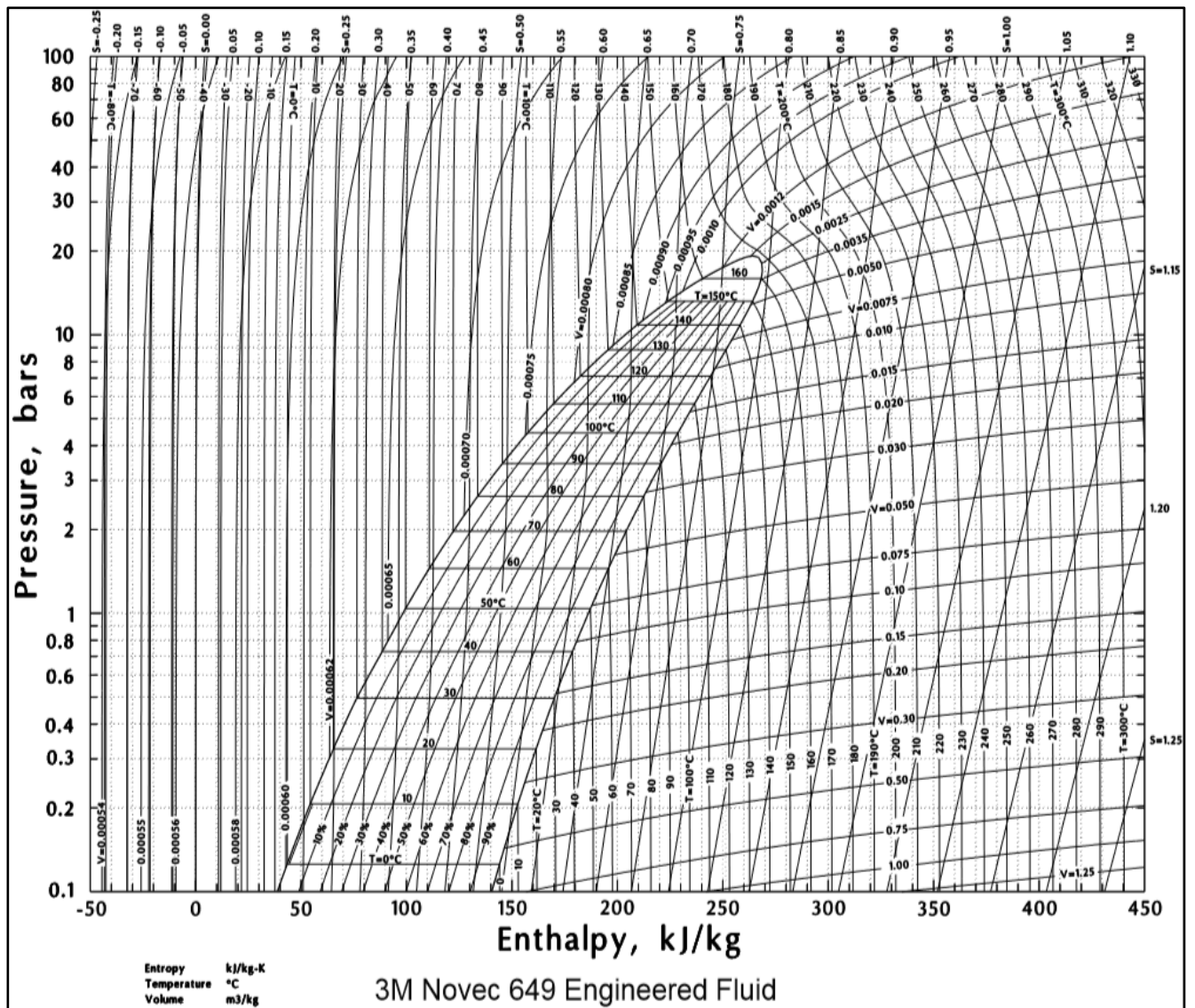
Limitation Of Liability: Except where prohibited by law, incidental, or consequential regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.



Electronics Markets Materials Division
3M Center, Building 224-3M-11
St. Paul, MN 55144-1000
www.3M.com/novec
1-800-810-8513

Please recycle. Printed in USA.
Issued: 9/09 © 3M 2009.
All rights reserved. 7009HB
60-5002-0392-6

3M and Novec are trademarks of 3M.
Used under license by 3M subsidiaries and affiliates.



3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid

Introduction

3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid, 1-methoxyheptafluoropropane, is a non-flammable, low global warming potential (GWP) heat transfer fluid capable of reaching -120°C. It is also useful as a direct expansion refrigerant.

Applications

For information on other applications, contact your 3M representative or 3M authorized distributor.

- Semiconductor
 - Ion implanters
 - Dry etchers
 - CVD/PVD tools
 - Electronic Automated Test Equipment (ATE)
- Industrial/Pharmaceutical
 - Chemical reactors
 - Freeze dryers
 - VOC capture
- Fuel cells
- Electronic Cooling
 - Supercomputers
 - Sensitive military electronics
 - High voltage transformers
- Electronics
 - Reliability testing
 - Temperature calibration
- Autocascade refrigeration
 - HCFC-123 replacement
- Medical Lab
 - Histobath working fluid

Benefits

- Low GWP (530, 100-year ITH)
- Excellent dielectric properties
 - In event of leakage or other failure, will not damage electronic equipment
- Zero ozone depletion potential (ODP)
- Good materials compatibility
- Low toxicity
- Non-flammable
- Non-corrosive
- Good thermal stability
- Useful at extreme low temperatures
 - Viscosity is less than 20 cSt at -120°C

Material Description

Ingredients	Novec™ 7000 Engineered Fluid
1-methoxyheptafluoropropane (C ₃ F ₇ OCH ₃)	99.5% by weight
Appearance	Clear, colorless
Non-volatile residue (NVR)	25.0 ppm maximum



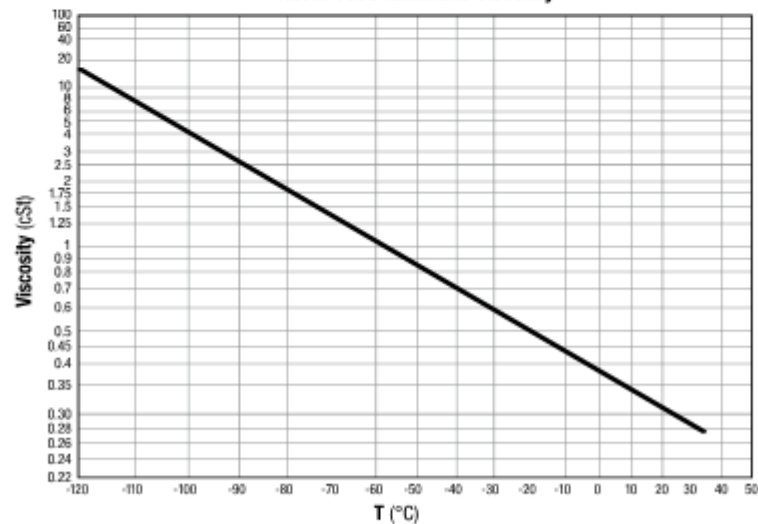
3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid

Typical Physical Properties

Not for specification purposes. All values @ 25°C unless otherwise specified.

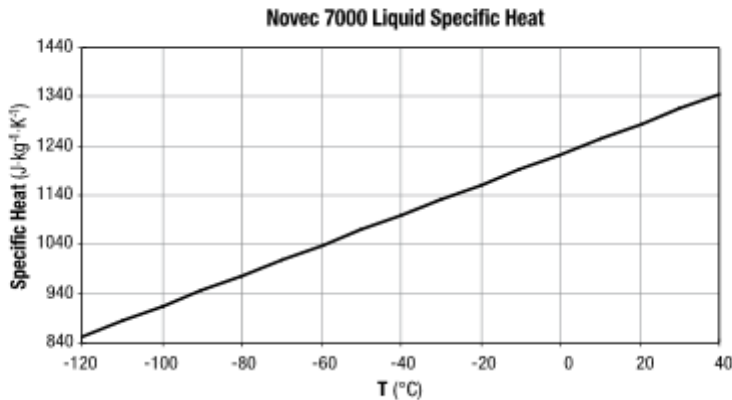
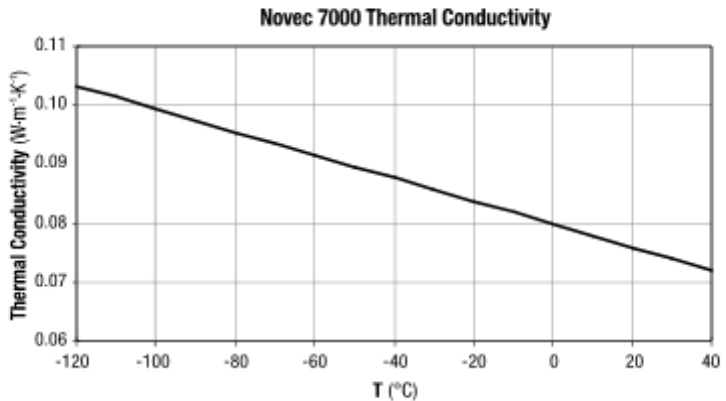
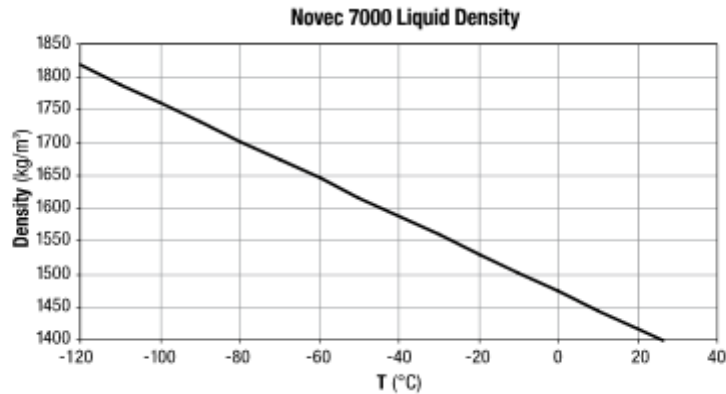
Properties	3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid
Molecular Weight (g/mol)	200
Boiling Point @ 1 atmosphere (°C)	34
Freeze Point (°C)	-122.5
Liquid Density (kg/m³)	1400
Kinematic Viscosity (cSt)	0.32
Kinematic Viscosity @ -80°C (cSt)	2.0
Kinematic Viscosity @ -120°C (cSt)	17
Coefficient of Expansion	0.00219 K⁻¹
Critical Density (kg/m³)	553
Critical Pressure (MPa)	2.48
Critical Temperature (°C)	165°C
Dielectric Constant	7.4
Dielectric Strength (kV)	~40
Flash Point	None
Latent Heat of Vaporization (kJ/kg)	142
Solubility of water in fluid (ppmw)	~60
Solubility of air in fluid (vol %)	~35
Specific Heat (J·kg⁻¹·K⁻¹)	1300
Surface Tension (dynes/cm)	12.4
Thermal Conductivity (W·m⁻¹·K⁻¹)	0.075
Vapor Pressure (kPa)	64.6
Volume Resistivity (ohm-cm)	108

Novec 7000 Kinematic Viscosity



Typical Physical Properties (continued)

Not for specification purposes. All values @ 25°C unless otherwise specified.



3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid

Novec 7000 Vapor Pressure

$$\ln(P[\text{Pa}]) = -3548.6/T[\text{K}] + 22.978$$

$$-30^{\circ}\text{C} < T < T_g$$

Toxicity Profile

Not for specification purposes. All values @ 25°C unless otherwise specified.

The toxicological testing completed on 3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid indicates low acute and sub-acute toxicity. A 28-day inhalation study conducted at 1000, 10,000 and 30,000 ppm helped establish an exposure guideline of 250 ppmv for an average 8 hour work day. The No Adverse Effect Level (NOAEL) in this study was 1000 ppm. This data suggests there is a large margin of safety for use of this fluid in relatively non-emissive heat transfer systems.

Toxicological Test Results

Properties	Novec™ 7000 Engineered Fluid
Acute Lethal Concentration (ppmv)	>30,000
8 hr Exposure Guideline (ppmv)	250
Skin Irritation	Negative ¹
Mutagenicity	Negative ¹
Ecotoxicity (water solubility < 2.5 ppb)	Very low aquatic toxicity
Acute Oral Toxicity	LD50 > 2000 mg/kg ¹
28-day Inhalation	NOAEL=1000 ppm

¹ A. Sekiya and S. Misaki, "The potential of hydrofluoroethers to replace CFCs, HCFCs and PFCs" J. of Fluorine Chemistry, 101, 2000, pp. 215-221.

Environmental Properties

Properties	Novec™ 7000 Engineered Fluid
Ozone Depletion Potential ¹ (ODP)	0.0
Global Warming Potential ² (GWP)	530
Atmospheric Lifetime (years)	4.9

¹ CFC-11 = 1.0

² GWP 100-year integrated time horizon (ITH), IPCC 2013.

Environmental, Health and Safety

Before using this product, please read the current product Safety Data Sheet (available through your 3M sales or technical service representative) and the precautionary statement on the product package. Follow all applicable precautions and directions.

3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid is non-flammable. The fluid is resistant to thermal breakdown and hydrolysis during storage and use. Recommended handling procedures are provided in the Safety Data Sheet, which is available from your local 3M representative upon request.

Materials Compatibility

Novec 7000 fluid is compatible with most metals and hard polymers such as:

Metals	Plastics
Stainless Steel	Polypropylene
Brass	Polyethylene
Copper	Nylon
Aluminum	Polyacetyl
	PEEK
	PTFE

Elastomeric materials should be limited to those compounds that contain the least amount of extractible plasticizer. 3M engineers can suggest appropriate compounds or assist with test procedures.

Heater Selection

The critical heat flux of Novec 7000 fluid is 18 W/cm² when boiling from a horizontal 0.5 mm diameter platinum wire in a quiescent pool of saturated fluid. The maximum heat flux obtainable in forced convection applications will be significantly higher, but depends strongly upon the geometry and flow conditions. A safety interlock between the pump and heater is strongly recommended in applications with heat fluxes exceeding 15 W/cm².

Regulatory Status

Novec 7000 fluid is available for commercial sale in the United States, China, Malaysia, Singapore and Taiwan and is currently under review by regulatory agencies in Europe, Japan, the Philippines and Korea.

Contact your local 3M representative for an update on the regulatory status of Novec 7000 fluid.

3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid

Recycle and Disposal Options

Used Fluid Return Program

3M offers a program for free pickup and return of used 3M specialty fluids in the U.S. A pre-negotiated handling agreement between users and our authorized service provider offers users broad protection against future liability for used 3M product. The fluid return program is covered by independent third-party financial and environmental audits of treatment, storage and disposal facilities. Necessary documentation is provided. A minimum of 30 gallons of used 3M specialty fluid is required for participation in this free program.

For additional information on the 3M Used Fluid Return Program, contact your local 3M representative or call 3M Customer Service at 800.810.8513.

Resources

3M™ Novec™ Engineered Fluids are supported by global sales, technical and customer service resources, with technical service laboratories in the U.S., Europe, Japan, Latin America and Southeast Asia. Users benefit from 3M's broad technology base and continuing attention to product development, performance, safety and environmental issues. For additional technical information on 3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid in the United States or for the name of a local authorized distributor, call 3M Electronics Materials Solutions Division: **800 810 8513**.

The 3M™ Novec™ Brand Family

The Novec brand is the hallmark for a variety of proprietary 3M products. Although each has its own unique formula and performance properties, all Novec products are designed in common to address the need for safe, effective, sustainable solutions in industry-specific applications. These include precision and electronics cleaning, heat transfer, fire protection, protective coatings, immersion cooling, advanced insulation media replacement solutions and several specialty chemical applications.

3M™ Novec™ Engineered Fluids • 3M™ Novec™ Aerosol Cleaners • 3M™ Novec™ 1230 Fire Protection Fluid • 3M™ Novec™ Electronic Grade Coatings • 3M™ Novec™ Electronic Surfactants • 3M™ Novec™ Dielectric Fluids

United States	China	Europe	Japan	Korea	Singapore	Taiwan
3M Electronics Materials Solutions Division 800 810 8513	3M China Ltd. 86 21 6275 3535	3M Belgium N.V. 32 3 250 7521	3M Japan Limited 81 3 6409 3800	3M Korea Limited 82 2 3771 4114	3M Singapore Pte. Ltd. 65 64508888	3M Taiwan Limited 886 2 2704 9011

Regulatory: For regulatory information about this product, contact your 3M representative.

Technical Information: The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that 3M believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed.

Product Use: Many factors beyond 3M's control and uniquely within user's knowledge and control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application. Given the variety of factors that can affect the use and performance of a 3M product, user is solely responsible for evaluating the 3M product and determining whether it is fit for a particular purpose and suitable for user's method of application.

Warranty, Limited Remedy, and Disclaimer: Unless an additional warranty is specifically stated on the applicable 3M product packaging or product literature, 3M warrants that each 3M product meets the applicable 3M product specification at the time 3M ships the product. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES OR CONDITIONS, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. If the 3M product does not conform to this warranty, then the sole and exclusive remedy is, at 3M's option, replacement of the 3M product or refund of the purchase price.

Limitation of Liability: Except where prohibited by law, 3M will not be liable for any loss or damage arising from the 3M product, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.

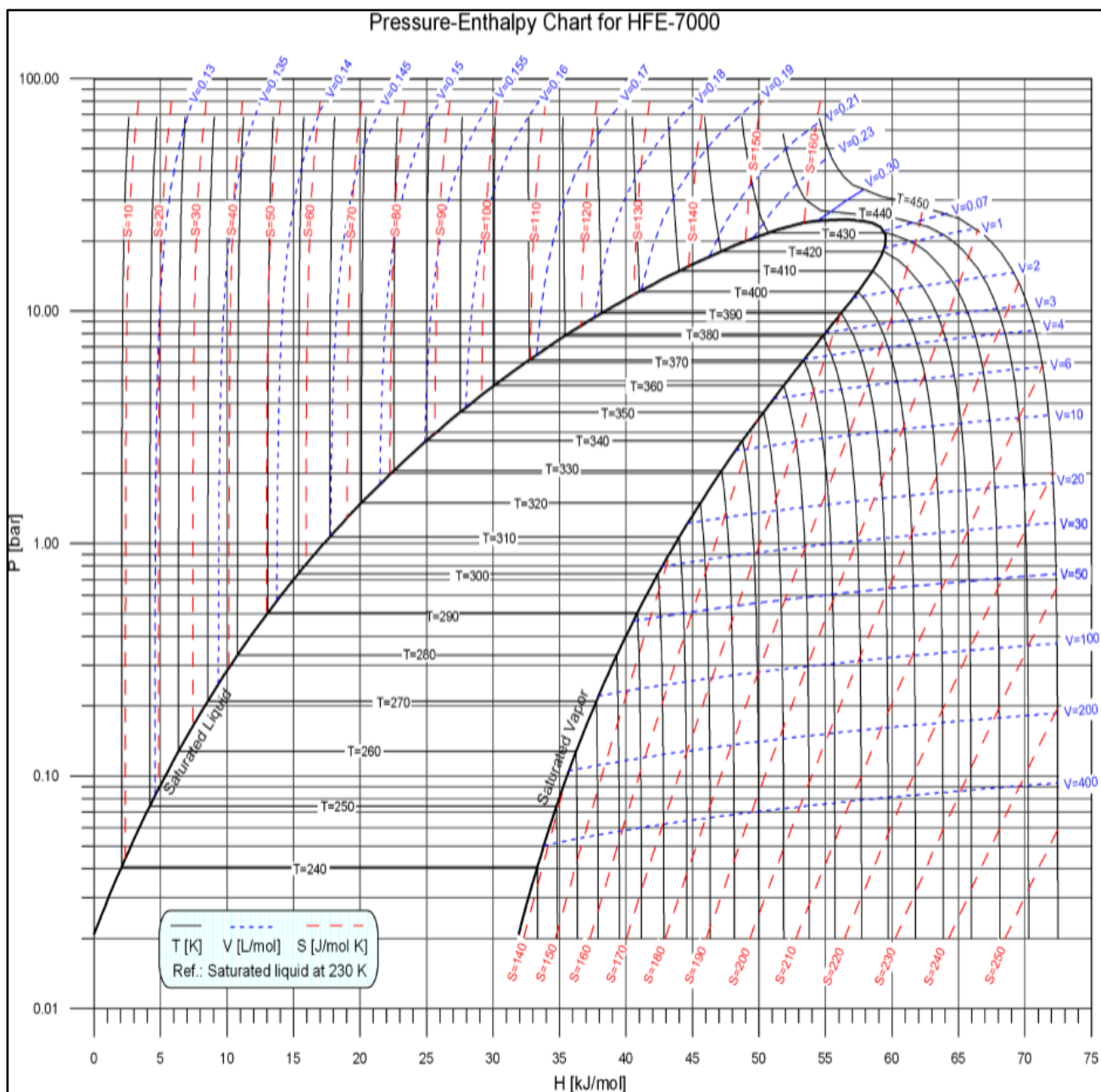


Electronics Materials Solutions Division

3M Center, Building 224-3M-11
St. Paul, MN 55144-1000
www.3M.com/novec
1-800-810-8513

Please recycle. Printed in USA.
Issued: 11/14 © 3M 2014.
All rights reserved. 10316HB
98-0212-2499-7

3M and Novec are trademarks of 3M Company.
Used under license by 3M subsidiaries and affiliates.



ANEXO III: MODELADO EN SIEMENS NX

Seguidamente se adjuntan imágenes de los distintos modelados 3D realizados a lo largo del trabajo así como una imagen comparativa en caso de haber sido llevada a cabo su impresión.

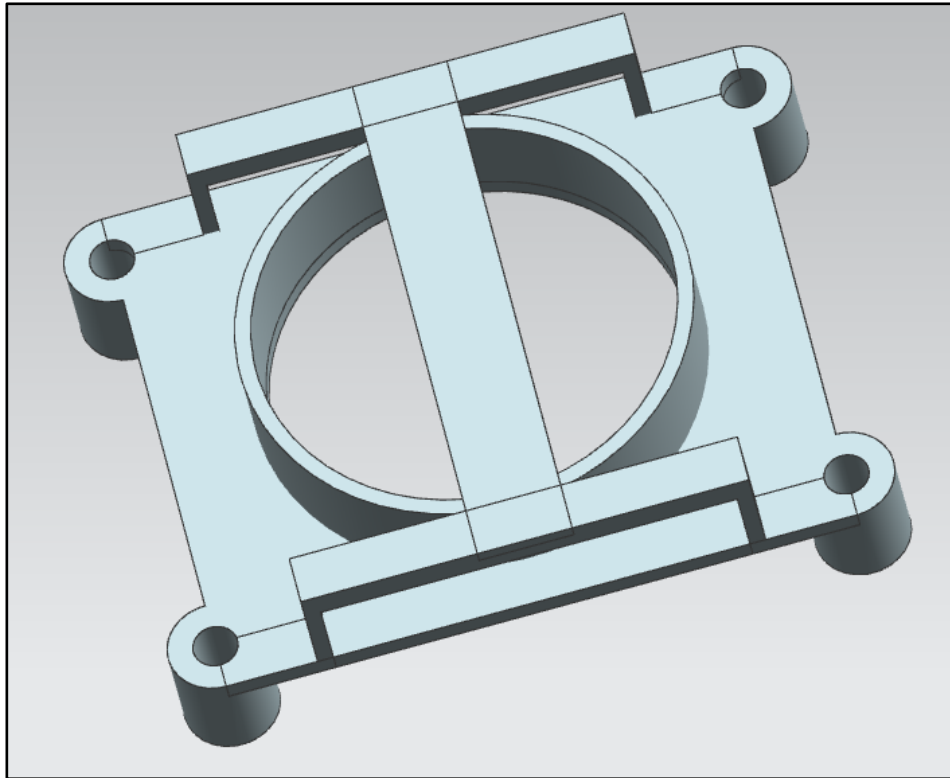


Figura A3-0-1 Primer diseño del mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.

En la Figura A3-0-1 se puede observar el primer diseño de mecanizado del soporte del elemento en contacto con la CPU del sistema de refrigeración, no llevado a cabo debido que no se encontró la tornillería necesaria. Tras descartar la primera idea, se realiza un segundo diseño (Figura A3-0-2) que tampoco termina de ser útil, debido a que para realizar el montaje del elemento conductor era necesario desmontar todo el cableado, colocar el elemento, y posteriormente volver a instalarlo todo.

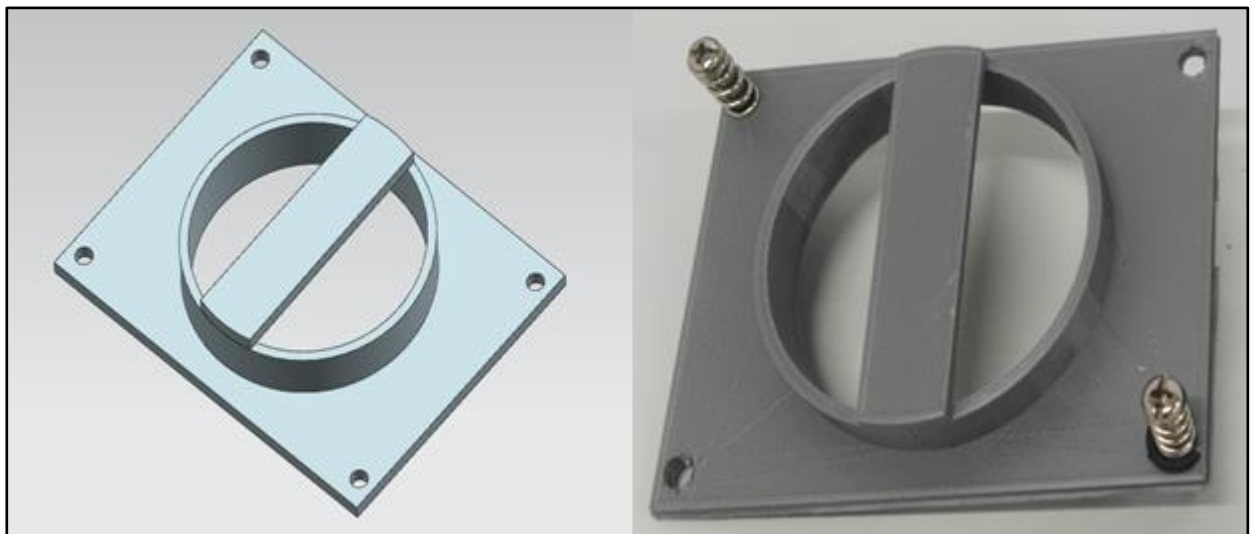


Figura A3-0-2 Segundo diseño del mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.

Finalmente con objeto de diseñar el mecanizado del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD, se realiza el modelo 3D que aparece en la Figura A3-0-3, el cual cumple con todos los requisitos para su correcta aplicación.

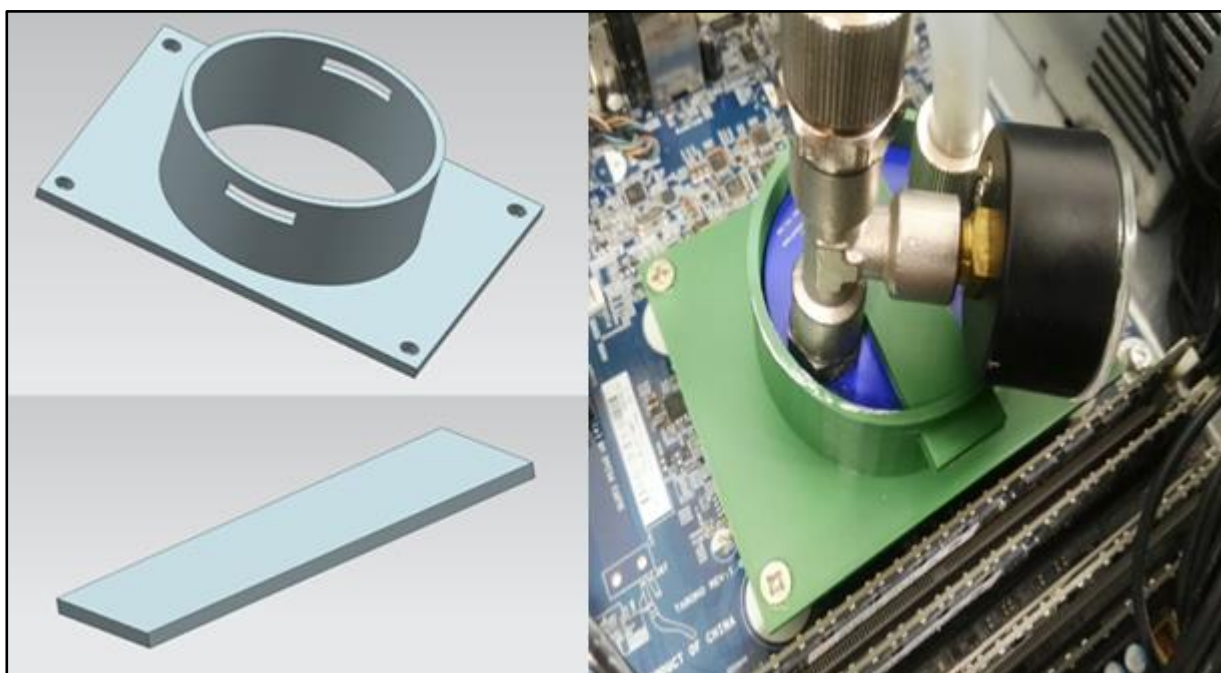


Figura A3-0-3 Mecanizado final del soporte del elemento ZM-WB2 GOLD.

El último mecanizado e impresión en 3D que se realiza es el del componente que sujeta el elemento refrigerador en contacto con la CPU de otro ordenador de menor potencia, reflejado en la Figura A3-0-4.

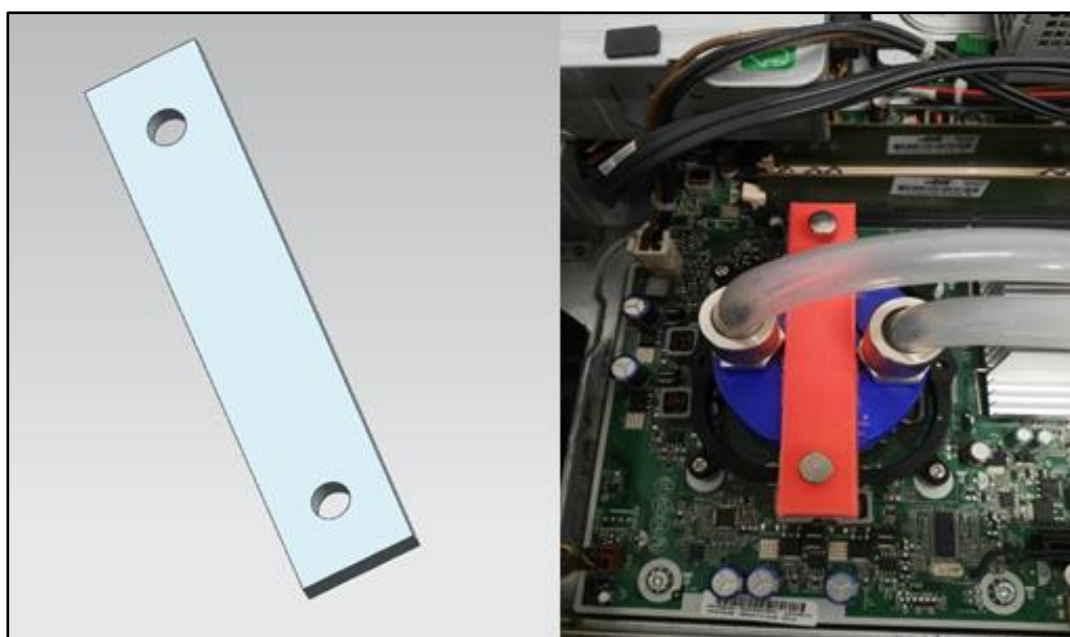


Figura A3-0-4 Mecanizado del soporte realizado para el ordenador de menor potencia.