

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de la refrigeración líquida de dispositivos electrónicos mediante un banco de ensayos

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jaime Cámara Colmenero

DIRECTORES: Jose Ignacio Iglesias Prado

Javier Pérez Vallejo

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de la refrigeración líquida de dispositivos electrónicos mediante un banco de ensayos

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidad de Vigo

RESUMEN

El problema de la refrigeración en dispositivos electrónicos a nivel mundial ha causado una ralentización en el avance de la tecnología de fabricación de microprocesadores. La creciente tendencia de estudio de modelos teóricos ha dejado obsoletos los ensayos experimentales, lo que provoca una falta de fiabilidad a la hora de innovar en nuevos métodos de refrigeración. En este trabajo se ha desarrollado un banco de ensayos de intercambiadores de calor para la refrigeración líquida de microprocesadores, del que se obtuvieron datos experimentales de cuatro fluidos diferentes. El banco de ensayos se validó en potencia, temperatura y coeficientes de convección para asegurar su correcto funcionamiento. Como resultado se obtuvieron los coeficientes de convección, así como un análisis adimensional Nusselt-Reynolds de los cuatro fluidos, lo que permitió observar una tendencia en función de la concentración de propilenglicol. A partir de este resultado, se creó una correlación experimental para su uso en convección forzada interna en intercambiadores de microcanales de sección circular, muy habituales en los sistemas de refrigeración líquida de dispositivos electrónicos.

PALABRAS CLAVE

Refrigeración, dispositivos electrónicos, convección, propilenglicol, Nusselt.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores D. Jose Ignacio Iglesias Prado y D. Javier Pérez Vallejo por su dedicación y apoyo durante la realización del Trabajo Fin de Grado. Gracias a sus conocimientos y dirección fue posible la realización del trabajo.

A mi familia y amigos por acompañarme en los momentos más difíciles del curso y animarme cuando era necesario.

CONTENIDO

Índice de Figuras 3

Índice de Tablas 5

1 Introducción y objetivos 6

1.1 Introducción 6

1.2 Objetivos 7

2 Estado del arte 8

2.1 Introducción 8

2.2 Métodos de refrigeración 11

2.2.1 Convección natural o libre 12

2.2.2 Convección de aire forzada 12

2.2.3 Convección de líquido forzada 13

2.2.4 Evaporación liquida 13

2.3 Tipos de refrigerante 15

2.3.1 Aire 15

2.3.2 Agua 15

2.3.3 Etilenglicol 16

2.3.4 Aceite 16

2.3.5 Amoniaco 16

2.4 Trabajos experimentales y numéricos 17

3 Desarrollo del TFG 20

3.1 Montaje experimental 20

3.1.1 Estructura del banco de ensayos 20

3.1.2 Circuito hidráulico 21

3.1.3 Circuito eléctrico 24

3.1.4 Sistema de adquisición de datos 26

3.2 Procedimiento de ensayo 32

3.3 Análisis de datos 33

3.3.1 Variables físicas de entrada 33

3.3.2 Formulación del problema 34

3.3.3 Coeficiente de convección 34

3.3.4 Parámetros adimensionales 35

3.3.5 Correlaciones teóricas 36

3.4 Fluidos estudiados 37

4 Validación y resultados 40
4.1 Validación del equipo experimental 40
4.1.1 Validación de la medida de temperaturas 40
4.1.2 Validación de potencias 41
4.1.1 Determinación del régimen de flujo 42
4.1.2 Validación de coeficientes de convección 42
4.2 Análisis de los resultados obtenidos 43
4.2.1 Resistencias térmicas 43
4.2.2 Coeficientes de convección 45
4.2.3 Análisis de números adimensionales 45
4.2.4 Correlación de datos experimentales 46
5 Conclusiones y líneas futuras 48
5.1 Conclusiones 48
5.2 Líneas futuras 48
6 Bibliografía 52
ANEXO I: IMPLICACIONES AMBIENTALES Y ECONÓMICAS 56
ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES 58
ANEXO III: PRESUPUESTO 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Avance de los microprocesadores durante el siglo XXI. Fuente propia. 10

Figura 2-2 Factor de fallo de un microprocesador. [12] 10

Figura 2-3 Temperatura de estrangulamiento del microprocesador. [13] 11

Figura 2-4 Flujo de calor eliminado por los diferentes métodos de refrigeración. Fuente propia.11

Figura 2-5 Refrigeración natural con y sin aletas de refrigeración [14]. 12

Figura 2-6 Refrigeración por convección de aire forzado [15]. 12

Figura 2-7 Refrigeración por convección de líquido forzado. Fuente propia....13

Figura 2-8 Evaporación líquida. Fuente propia. Fuente propia 14

Figura 3-1 Estructura del montaje. Fuente propia. 21

Figura 3-2 Circuito hidráulico. Fuente propia 21

Figura 3-3 Mecanizado del orificio para la instalación de una Pt-100 en el interior del intercambiador de calor. Fuente propia....22

Figura 3-4 Intercambiador de calor seccionado. Fuente propia....22

Figura 3-5 Intercambiador de calor modelado en Autodesk. Fuente propia 22

Figura 3-6 Intercambiador de calor con aislamiento. Fuente propia 23

Figura 3-7 Esquema del circuito eléctrico. Fuente propia 24

Figura 3-8 Disposición de circuito eléctrico. Fuente propia....25

Figura 3-9 Soldadura de Pt-100. Fuente propia 27

Figura 3-10 Intercambiador con Pt-100 midiendo temperatura de pared (derecha) y temperatura superficial (izquierda). Fuente propia 27

Figura 3-11 Ecuación del conversor. Fuente propia 28

Figura 3-12 Ajuste del conversor. Fuente propia 28

Figura 3-13 Esquema principal de banco de ensayos. Fuente propia 30

Figura 3-14 Modulo de configuración de sensores Pt-100. Fuente propia 31

Figura 3-15 Configuración del diagrama de bloques. Fuente propia 31

Figura 3-16 Módulo de transformación de señal. Fuente propia 31

Figura 3-17 Modulo de presentación y fichero de datos. Fuente propia 32

Figura 3-18 Corte de la vista del intercambiador de calor. Fuente propia....34

Figura 4-1 Validación de los sensores de temperatura. Fuente propia 41

Figura 4-2 Validación de potencias con el calor absorbido y disipado. Fuente propia 41

Figura 4-3 Reynolds frente a caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia 42

Figura 4-4 Validación de coeficientes de convección experimentales con correlaciones teóricas. Fuente propia.....43

Figura 4-5 Variación de las resistencias térmicas del agua con el caudal. Fuente propia 43

Figura 4-6 Resistencias térmicas total (arriba izquierda), convectiva (arriba derecha), capacitiva (abajo izquierda) y conductiva (abajo derecha) frente al caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia.....44

Figura 4-7 Coeficiente de convección frente a caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia 45

Figura 4-8 Nusselt frente a Reynolds para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia.....46

Figura 4-9 Correlación Nusselt experimental frente a Nusselt de correlación. Fuente propia.....47

Figura 5-1 Intercambiador de calor de resina. Fuente propia. 49

Figura AI-1 Cambio en la temperatura global media [33].....56

Figura AI-2 Cambio de temperatura respecto a período 1850-1900 [33].....57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa de métodos de refrigeración. Fuente propia 15

Tabla 2-2 Comparativa de tipos de refrigerante. Fuente propia 17

Tabla 3-1 Dimensiones del intercambiador de calor. Fuente propia 34

Tabla 3-2 Coeficientes de los líquidos refrigerantes. Fuente propia 38

Tabla AIII-1 Presupuesto de material. Fuente propia 61

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El avance y la automatización de procesos tecnológicos e industriales está marcando una nueva era en la que el uso masivo de superordenadores está transformando radicalmente nuestra sociedad. Desde los inicios de la revolución industrial hasta el presente, hemos sido testigos de una serie de avances que han redefinido la forma en que vivimos y trabajamos. La tecnología y la automatización no solo han mejorado la eficiencia y la productividad en una amplia gama de industrias, sino que también han abierto la puerta a soluciones innovadoras y sofisticadas para problemas complejos. Los superordenadores, en particular, han sido clave en esta revolución al expandir enormemente nuestra capacidad de procesamiento de datos. Estos nos han permitido conseguir avances significativos en campos como la inteligencia artificial, la simulación de sistemas complejos y la investigación científica, abriendo nuevas fronteras de conocimiento y posibilidades.

Sin embargo, este progreso también conlleva desafíos, especialmente en lo que respecta a la gestión de la energía térmica. La fabricación industrial y la manipulación de grandes cantidades de datos generan calor como subproducto inevitable de las operaciones mecánicas y eléctricas. A medida que las máquinas y los dispositivos electrónicos realizan su trabajo, parte de la energía que consumen se convierte en calor, lo que puede provocar un aumento significativo de la temperatura en los entornos de trabajo. Este exceso de calor puede ser perjudicial si no se controla adecuadamente, afectando tanto al rendimiento de las máquinas como al bienestar de los trabajadores. Por ejemplo, un aumento excesivo de la temperatura en un microprocesador puede ocasionar una pérdida de potencia debido al incremento de la resistencia eléctrica y la dilatación de los componentes, lo que a su vez puede afectar negativamente al funcionamiento del equipo en su conjunto. Por lo tanto, es crucial implementar sistemas efectivos de refrigeración y gestión del calor en entornos industriales para evitar sobrecalentamientos y garantizar un funcionamiento óptimo de los equipos. Este desafío es relevante en diversos ámbitos, desde el usuario doméstico con su ordenador personal hasta el entorno industrial con centros de datos que albergan cientos de racks de microprocesadores.

Es necesario reconocer que el avance tecnológico está estrechamente ligado al desarrollo de soluciones eficientes de refrigeración. Ambos campos deben avanzar de la mano para asegurar un crecimiento equilibrado y sostenible. Sin embargo, en los últimos años, la refrigeración ha quedado rezagada en comparación con el rápido avance de los componentes electrónicos, lo que ha llevado a una ralentización en el desarrollo de tecnologías más avanzadas y eficientes. Para superar este desafío, es fundamental invertir en investigación y desarrollo en el campo de la refrigeración. Esto incluye explorar nuevas técnicas de refrigeración, desarrollar materiales avanzados para disipadores de calor y diseñar sistemas de gestión térmica más eficientes. Al abordar estos problemas de manera integral, podemos

avanzar hacia un futuro en el que la refrigeración sea una parte integral y efectiva de la evolución tecnológica.

1.2 Objetivos

El objetivo de nuestro Trabajo de Fin de Grado es desarrollar un banco de ensayos funcional para investigar el rendimiento de la refrigeración líquida en microprocesadores. A través de este banco de ensayos, su busca evaluar el comportamiento de varios fluidos de refrigeración y analizar cómo afectan al proceso de disipación de calor en el microprocesador. Nuestro enfoque se centra en la recopilación de datos experimentales y su posterior interpretación para comprender mejor las relaciones entre los diferentes parámetros.

Uno de los parámetros fundamentales que nos interesa obtener es el coeficiente de convección, dado su papel crucial en la selección del refrigerante más adecuado para un circuito de refrigeración. Nuestro trabajo implica calcular y comparar estos coeficientes en diferentes condiciones de caudal, lo que nos permitirá extraer conclusiones significativas sobre el rendimiento relativo de cada refrigerante. Además, se analizarán los diferentes regímenes de flujo de Reynolds en los que puede operar el sistema y exploraremos su relación con el caudal y el coeficiente de convección. De esta manera, se busca obtener una comprensión integral de cómo se relacionan todos estos parámetros característicos de un fluido refrigerante, determinar cuál sería la mejor opción para nuestro circuito de refrigeración y obtener un montaje operativo para ensayos con líquidos refrigerantes.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La historia de los ordenadores comenzó en los años cuarenta con el ENIAC, un gigantesco computador que no se asemejaba nada a los ordenadores modernos. El ENIAC ocupaba nada menos que 167 m^2 y pesaba 27 toneladas. Su función inicial era resolver problemas numéricos para el cálculo avanzado de tablas de tiro de artillería. Con el tiempo y tras la Segunda Guerra Mundial, se desarrolló hasta un punto de poder resolver problemas de lanzamiento de bombas H.

La compañía que creó el ENIAC vio un gran potencial en el avance de la computación, lo que los llevó a fabricar el primer ordenador comercial, la UNIVAC. Este dispositivo tenía un costo que en la actualidad rondaría los nueve millones de dólares estadounidenses. Debido a su elevado precio, la UNIVAC estaba reservada para negocios con un alto poder adquisitivo e instituciones gubernamentales. A pesar de su alto costo, la UNIVAC logró hazañas impresionantes, como predecir el próximo presidente de los Estados Unidos con un muestreo de votos de la población, dejando atónitos a los ciudadanos estadounidenses [1] [2]. Estos ordenadores usaban tubos de vacío con resistencias bobinas y condensadores con un consumo aproximado de 200 kW refrigerados con aire acondicionado [3]. Pasaron dos décadas hasta que se superó este tipo de tecnología con el desarrollo del primer microprocesador, el Intel 4004. Este avance marcó un hito en la historia de la computación al permitir la miniaturización de los dispositivos y el desarrollo de ordenadores más potentes y compactos.

El microprocesador Intel 4004 constaba solamente de 2300 transistores, una cifra exponencialmente inferior a los que encontramos en la actualidad, como el chip M3 Max desarrollado por la compañía Apple, formado por nada menos que 93 trillones de transistores. Debido a que el microprocesador Intel 4004 no estaba pensado para realizar un gran volumen de cálculos complejos, consumía menos de 1 W, por lo que no era necesario equiparlo con un sistema de refrigeración propio. La refrigeración por convección natural era más que suficiente, acompañada de una sala con buena ventilación y espaciosa en la que fluyese el aire con facilidad [3], [4] y [5].

Con las asombrosas capacidades que nos ofrecían los ordenadores y la gran popularidad que alcanzaron en relativamente poco tiempo, se invirtieron grandes fondos en su estudio y desarrollo. Los siguiente microprocesadores más relevantes en las historia fueron el Intel 8088, microprocesador que se instaló en el famoso ordenador personal IBM PC. Con el microprocesador Intel 8088 se dio un gran salto hasta alcanzar los 29000 transistores, algo inédito en la época. Su consumo máximo era de unos 3W por lo que la convección natural casi bastaba, sin embargo, se le añadieron unas aletas de refrigeración para aumentar la superficie de contacto con el aire circundante [6].

El lanzamiento de la serie Intel Pentium marcó un salto significativo para la comunidad científica informática. El primer modelo de esta serie, el Pentium 60, llegó al mercado en 1993 y fue recibido con gran entusiasmo por parte de los compradores. Su potencia superior, tamaño reducido y la introducción

de tareas superescalares, que le permitían ejecutar más de una instrucción simultáneamente, lo posicionaron como líder del mercado, dejando atrás a competidores como AMD o Harris. El Pentium 60 estaba compuesto por una impresionante cantidad de 3,1 millones de transistores, lo que resultaba en un consumo de energía de alrededor de 15-20 W. Con estos niveles de consumo mucho más elevados que los de sus predecesores, se implementó la refrigeración por convección de aire forzada mediante ventiladores montados directamente sobre el encapsulado del microprocesador [7].

Entrado el año 2000, el cambio en la sociedad, economía y tecnología era más que evidente; los ordenadores habían logrado una capacidad de computación mucho mayor a la imaginada. Con el auge de internet y los ordenadores personales, los ingenieros informáticos se veían en la necesidad de introducir nuevos procesadores más pequeños y potentes. De este modo, en la primera década del nuevo siglo se revelaron al mercado las dos grandes familias de procesadores que hoy en día siguen siendo sin duda las más potentes, Intel Core y AMD Ryzen. Estas dos familias tan innovadoras fueron fruto de una concienciación medio ambiental a nivel mundial, debido al emergente problema con la capa de ozono y el efecto invernadero. A pesar de tener unos rendimientos hasta 10 veces superior al microprocesador Pentium 60, el consumo de energía era el mismo, no superior a 15 W; además de contar con 151 millones de transistores. Aunque el consumo de energía fuese el mismo que el de los microprocesadores anteriores, emergía un nuevo problema, el flujo calorífico por superficie (Heat flux, W/cm^2). Al ser los microprocesadores más pequeños y su densidad de transductores mucho más alta, el flujo de calor aumentaba con creces. De cierta manera, la refrigeración por convención de aire forzado ya no era suficiente para el funcionamiento del microprocesador, por lo que se empezaron a comercializar las refrigeraciones liquidas y a desarrollar las de vapor como alternativa eficaz.

En el año 2004, la iniciativa internacional de fabricación de electrónica (iNEMI) predijo que la relación de potencia por superficie de los microprocesadores alcanzaría un máximo de 190-360 W/cm^2, unas cifras que sin duda se escapan de la realidad hoy en día y que se superarán ampliamente en las próximas décadas [8]. La situación actual excede estas estimaciones iniciales, por ejemplo, en aplicaciones de inteligencia artificial, nos enfrentamos a flujos de calor que pueden llegar hasta 1000 W/cm^2 en microprocesadores como el DGX GH200 AI Supercomputer de nvidia [9] o el chip AMD EPYC [10] de AMD, lo que representa casi cinco veces más la cifra prevista inicialmente por iNEMI. Este aumento significativo en el flujo de calor ha planteado nuevos desafíos en el diseño y la implementación de sistemas de refrigeración más eficientes y avanzados para mantener los dispositivos electrónicos dentro de los límites térmicos seguros a largo plazo, ya que la refrigeración líquida y de vapor no son suficientes.

Conscientes de estos desafíos, se han desarrollado nuevas técnicas de refrigeración más complejas. Una de estas innovaciones es la refrigeración en inmersión de dos fases, este método implica sumergir completamente el microprocesador, tarjeta gráfica y la fuente de alimentación inclusive en un líquido refrigerante. Además, se han implementado métodos más sofisticados de refrigeración líquida, como el uso de nanofluidos combinados con cámaras de vapor y disipadores de calor que funcionan con ventiladores, como es el caso del microprocesador NVIDIA DGX GH200 Supercomputer. Otra técnica cada vez más utilizada es la refrigeración termoeléctrica, que se rige por el principio de Peltier. Este método genera una corriente eléctrica entre dos materiales, lo que resulta en la absorción de calor por parte de uno de ellos, dependiendo de la dirección de la corriente. Aunque no se utiliza tanto para refrigerar dispositivos electrónicos con una alta producción de calor, es muy efectivo para enfriar de manera precisa y controlada zonas específicas. Por su bajo nivel de ruido y eficiencia aceptable, es comúnmente empleado en ordenadores personales que no tienen requerimientos de procesos muy elevados.

A partir del 2020 con la revoluciona aparición de la inteligencia artificial, la necesidad computacional aumentó exponencialmente llevando a los ingenieros informáticos a una nueva era para el diseño de microprocesadores. Los avances que están llevando a cabo los científicos actualmente son

cruciales, equiparables en importancia al cambio que se produjo en los años 70 del computador UNIVAC al microprocesador Intel 4004.

Esta necesidad computacional ha impulsado el desarrollo de microprocesadores cada vez más pequeños y rápidos, lo que ha resultado en un aumento significativo en la densidad de transistores en estos dispositivos. Este crecimiento exponencial en la tecnología se vincula con la Ley de Moore [11]. Según esta ley, la cantidad de transistores en un microprocesador tiende a duplicarse aproximadamente cada año y medio. En consecuencia, hemos pasado de microprocesadores con alrededor de 3 millones de transistores en la década de 1990 a microprocesadores que contienen 96000 millones de transistores. En la Figura 2-1 podemos ver las modificaciones que se han implementado con el tiempo, a pesar de que la densidad de transmisores aumenta, el tamaño del microprocesador no disminuye en proporción directa a este aumento.

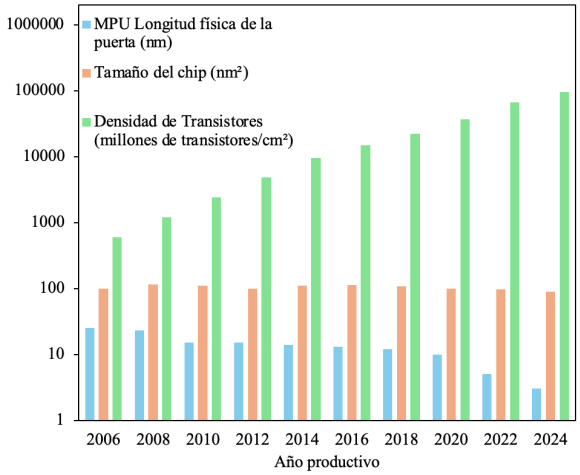


Figura 2-1 Avance de los microprocesadores durante el siglo XXI. Fuente propia.

A pesar de estos logros tecnológicos, la gestión térmica no ha progresado al mismo ritmo, lo que plantea un desafío sustancial para el desarrollo continuo de los procesadores. La alta densidad de transistores y las temperaturas resultantes están dando lugar a una notable reducción en la vida útil de los procesadores, así como a una disminución en su rendimiento cuando superan los 75 ºC. Es importante destacar que a medida que la temperatura aumenta, también lo hace la probabilidad de fallo del microprocesador. En la Figura 2-2 vemos gráficamente que la probabilidad de fallo aumenta exponencialmente cuando superamos la barrera de los 75 ºC. Esta situación subraya la importancia de abordar los desafíos relacionados con la gestión térmica en el diseño y la fabricación de los microprocesadores para garantizar una vida más extensa.

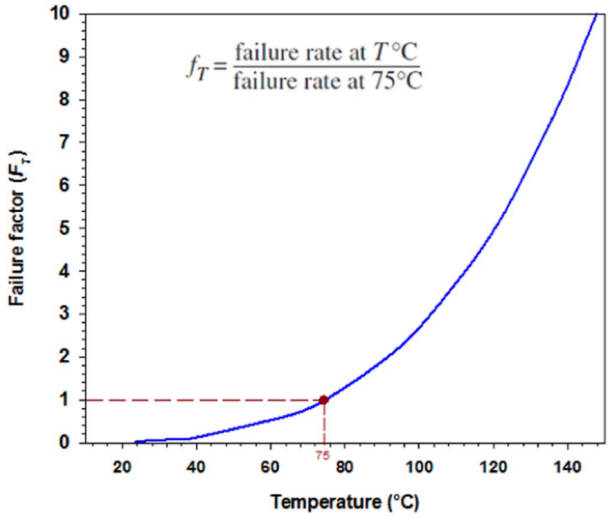


Figura 2-2 Factor de fallo de un microprocesador. [12]

Además del riesgo de fallo, otro problema que surge debido al aumento de temperatura es el estrangulamiento térmico, en la Figura 2-3 vemos gráficamente como cambia la frecuencia de la CPU a medida que la temperatura aumenta. Este fenómeno se manifiesta como una reducción de trabajo de la CPU para evitar temperaturas que afectarían a la integridad del microprocesador permanentemente. Cuando la temperatura del microprocesador supera el límite de los 75ºC se produce una reducción en la frecuencia de reloj del microprocesador, el sistema operativo y el hardware decrementan la velocidad de la CPU para disminuir el flujo calorífico [13]. Esto desencadena un rendimiento inferior del sistema, afectando negativamente a la experiencia del usuario y ejecución de tareas exigentes. Por lo tanto, el estrangulamiento térmico es otro aspecto importante para considerar en la gestión de la temperatura, ya que tiene un impacto significativo en su rendimiento.

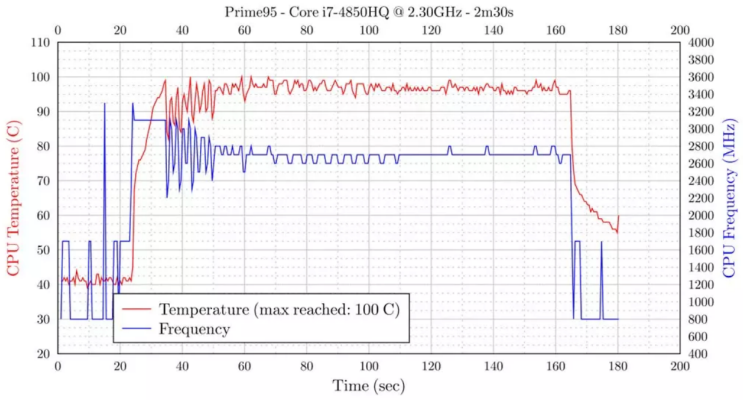


Figura 2-3 Temperatura de estrangulamiento del microprocesador. [13]

Una vez expuestos los problemas principales de la electrónica como el aumento excesivo de la temperatura del microprocesador con una limitada capacidad de enfriamiento, veremos que métodos de refrigeración y refrigerantes son los más comunes y los más eficientes para eliminar el flujo de calor presente en el cerebro de los ordenadores, el microprocesador.

2.2 Métodos de refrigeración

En este contexto, es crucial comprender los diversos tipos de refrigerantes disponibles y los métodos utilizados para la refrigeración, como observamos en Figura 2-4, en distintos entornos industriales y de consumo. Este conocimiento no solo nos permite seleccionar la solución más adecuada para cada aplicación específica, sino que también nos ayuda a optimizar el rendimiento y la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y económica de las operaciones industriales. En los siguientes apartados, realizaremos una revisión detallada y clasificación de estos aspectos, explorando las últimas innovaciones y tendencias en el campo de la refrigeración industrial y doméstica.

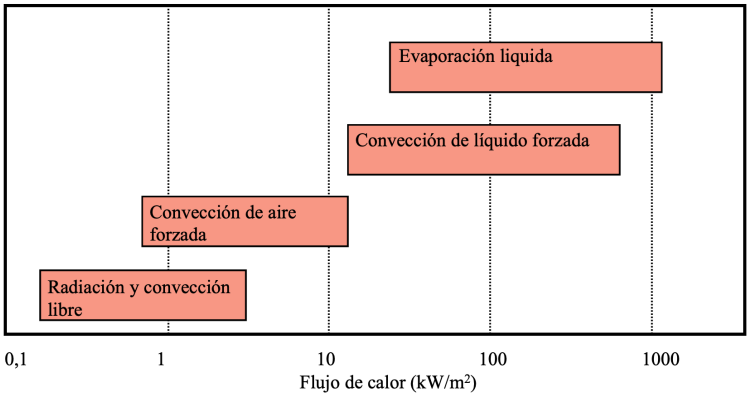


Figura 2-4 Flujo de calor eliminado por los diferentes métodos de refrigeración. Fuente propia

2.2.1 Convección natural o libre

La refrigeración pasiva se basa en el principio físico del comportamiento del aire ante cambios de densidad provocados por diferencias de temperatura: al calentarse, el aire se expande y asciende, mientras que, al enfriarse, se contrae y desciende. Este método aprovecha este ciclo natural de convección para transferir el calor del sistema hacia el entorno circundante de manera eficiente. Aunque la refrigeración pasiva ofrece ventajas en términos de simplicidad y bajo costo, su eficacia se ve limitada en aplicaciones de alta potencia. En tales casos, donde se requiere una mayor capacidad de refrigeración, suelen emplearse métodos activos que pueden disipar el calor de manera más efectiva. Un ejemplo común de este enfoque se encuentra en la refrigeración de microprocesadores, donde se utilizan aletas de refrigeración para aumentar la superficie de transferencia de calor. Estas aletas, además de ser simples y económicas, proporcionan una mayor área para la disipación de calor, lo que mejora la eficiencia del proceso de enfriamiento. En resumen, si bien la refrigeración pasiva es una opción adecuada en situaciones de baja demanda de enfriamiento, en entornos donde se requiere una mayor capacidad de disipación de calor, se recurre a métodos activos para garantizar un rendimiento óptimo del sistema.

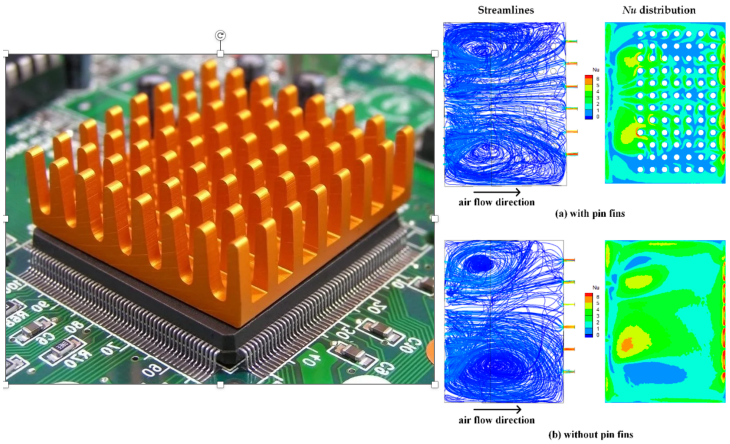


Figura 2-5 Refrigeración natural con y sin aletas de refrigeración [14].

2.2.2 Convección de aire forzada

El método de convección de aire forzada la disipación del calor, como se observa en la

Figura **2-6**, se logra a través de ventiladores u otros dispositivos que generan movimiento del aire. Este método de refrigeración destaca por su bajo costo, simplicidad y facilidad de mantenimiento, características que lo hacen comparable económicamente a la convección natural. Sin embargo, uno de los desafíos más importantes asociados es la acumulación de suciedad en los componentes mecánicos, lo que puede conducir a una paulatina disminución en la eficiencia del sistema con el tiempo. A pesar de este inconveniente, el uso de ventiladores y sistemas de convección forzada está ampliamente adoptado en la refrigeración de ordenadores y equipos electrónicos en general debido a su eficacia y asequibilidad.

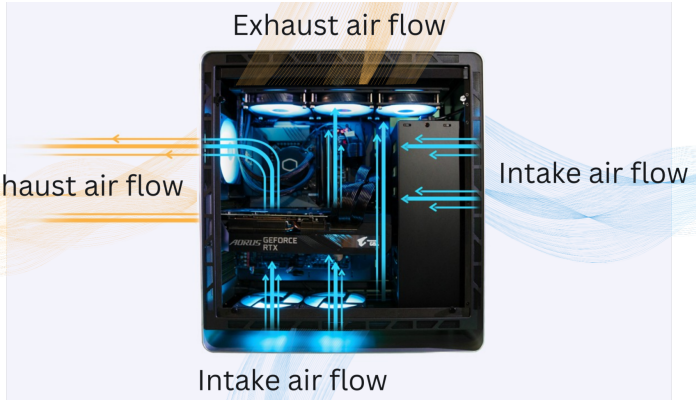


Figura 2-6 Refrigeración por convección de aire forzado [15].

2.2.3 Convección de líquido forzada

En el método de convección de líquido forzada, utilizamos un líquido refrigerante que es bombeado activamente a través del sistema mediante una bomba hidráulica. Este líquido absorbe el calor generado por el microprocesador y luego intercambia ese calor con el medio. En la Figura 2-7 se muestra un microprocesador refrigerado a través de un circuito hidráulico compuesto por un intercambiador de calor, un disipador con microcanales y un ventilador, un esquema exactamente igual a nuestro circuito. Este método permite una disipación más eficiente del calor, ya que el líquido refrigerante puede transportar el calor lejos del microprocesador hacia el intercambiador de calor, donde se disipa en el ambiente con la ayuda del ventilador. El inconveniente de la refrigeración líquida es la posible fuga del fluido por una mala estanqueidad, además debemos tener en cuenta la naturaleza corrosiva que tienen la mayoría de los líquidos como el agua natural. En resumen, la convección de líquido forzada es una técnica efectiva para el enfriamiento de microprocesadores, ya que aprovecha la capacidad del líquido refrigerante para transportar y disipar el calor de manera eficiente, aunque siempre hay que tener en cuenta las desventajas de tener un circuito hidráulico refrigerando nuestro microprocesador.

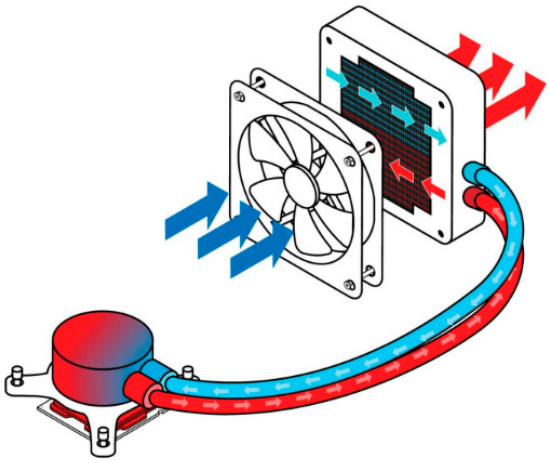


Figura 2-7 Refrigeración por convección de líquido forzado. Fuente propia

2.2.4 Evaporación liquida

La refrigeración mediante cámaras de evaporación líquida emerge como una de las soluciones más eficientes disponibles en la actualidad. Esta técnica se emplea especialmente en entornos donde las temperaturas ambientales son extremadamente altas, siendo común su aplicación en refrigeración electrónica, como en servidores de alto rendimiento o centros de datos, aunque también a nivel usuario ya que es el método por el que se refrigeran todos nuestros dispositivos móviles. La eficacia de este método radica en el hecho de que el calor latente de evaporación es superior al calor específico, lo que permite absorber una mayor cantidad de calor durante el cambio de fase, aumentando así su rendimiento. Además, estos sistemas se caracterizan por requerir menos partes móviles en comparación con las máquinas frigoríficas convencionales, lo que reduce la probabilidad de fallos y disminuye los costos de mantenimiento. Asimismo, al carecer de bombas y compresores, estos sistemas operan de manera más silenciosa, lo que resulta especialmente beneficioso en entornos sensibles al ruido.

Otra ventaja destacada de la refrigeración mediante cámaras de evaporación líquida es su flexibilidad en términos de instalación. Esto se debe a que no requiere de una infraestructura compleja, lo que facilita su implementación en una variedad de entornos y situaciones. En resumen, esta tecnología representa una opción altamente eficiente, rentable y versátil para satisfacer las demandas de refrigeración en entornos con altas temperaturas y necesidades específicas de rendimiento. En la Figura 2-8 vemos como se realiza un ciclo de refrigeración mediante evaporación líquida. Primero se absorbe el calor del microprocesador que produce la evaporación del líquido refrigerante, el vapor asciende hasta

el condensador donde se intercambia el calor absorbido con el medio. Una vez se condensa el líquido vuelve a la zona del evaporador, todo este sistema se encuentra en una cámara cerrada.

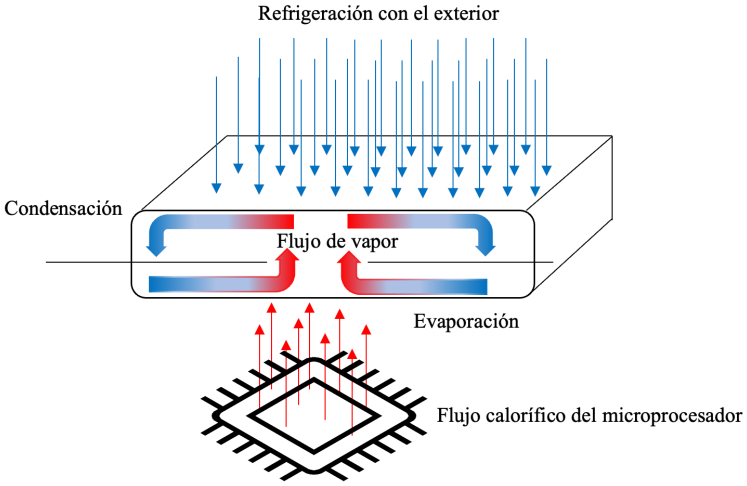


Figura 2-8 Evaporación líquida. Fuente propia. Fuente propia

Después de revisar los métodos de refrigeración más comunes, se presenta una síntesis de la información en la Tabla 2-1, junto con las aplicaciones en las que se utiliza cada uno de los métodos. Esta tabla proporciona una visión general de los diferentes métodos de refrigeración y sus respectivas áreas de aplicación, lo que facilita la selección del método más adecuado para una situación particular.

Método	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Convección natural (pasiva)	□ No hay consumo de energía □ No necesita mantenimiento □ Construcción simple □ Ni ruido ni vibración	□ Las superficies que se refrigeren deben estar libres de suciedad □ Baja disipación de calor □ No es posible controlar la disipación de calor.	□ Para equipos de baja densidad de potencia como iluminación. □ Sin ruido ni vibraciones, se usa en instrumentos de precisión.
Convección de aire forzada	□ Se puede ajustar el rendimiento de refrigeración al deseado por el usuario. □ Mayor disipación térmica que convección natural. □ La resistencia térmica se incrementa.	□ Requiere una fuente de energía auxiliar □ Posibilidad de encontrar polvo y suciedad en el sistema □ Requiere recambios y mantenimiento con frecuencia	□ Para equipos de media alta densidad de potencia □ En equipos industriales, de comunicaciones, electrónicos
Convección de líquido forzada	□ Horquilla de temperaturas de trabajo mayor □ Debido a su alta eficacia, aumenta la vida de los microprocesadores	□ Su complejidad y elevado valor económico □ Necesidad de intercambiador de calor □ Posibilidad de fugas	□ Aplicaciones de alta y muy alta densidad de potencia

Evaporación líquida	□ Mayor rendimiento y disipación de calor que otros medios □ No genera ruido □ Apenas coste de manteamiento □ Disipa el calor más rápidamente que otros métodos	□ No funciona bien en climas húmedos y extremadamente calurosos □ Consumo de energía elevado □ Coste elevado de los líquidos refrigerantes	□ Centro de datos de alto rendimiento □ Refrigeración electrónica

Tabla 2-1 Comparativa de métodos de refrigeración. Fuente propia

2.3 Tipos de refrigerante

2.3.1 Aire

El uso del aire como medio de refrigeración es comúnmente empleado en aplicaciones donde la eliminación de calor es limitada, como por ejemplo en ordenadores personales, como se observa en la

Figura 2-6, o en partes externas de motores de combustión. Esta elección se debe a que el aire ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, el aire es un medio de refrigeración económicamente accesible, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones de coste limitado. Además, el aire no requiere elementos mecánicos excesivamente complejos para su implementación, lo que simplifica el diseño y reduce la necesidad de mantenimiento costoso. Otra ventaja importante del uso del aire como medio de refrigeración es su facilidad de reparación, en caso de fallo o avería, los sistemas de refrigeración basados en aire suelen ser más fáciles de diagnosticar y reparar en comparación con sistemas más complejos que utilizan otros medios de refrigeración.

En resumen, el uso del aire como medio de refrigeración ofrece una combinación de bajo coste, simplicidad y facilidad de reparación, lo que lo convierte en una opción popular en una variedad de aplicaciones donde se requiere una eliminación de calor limitada.

2.3.2 Agua

El uso de agua como medio de refrigeración tiene un propósito similar al de la disipación por aire, pero ofrece una capacidad de eliminación de calor mejorada debido a su alto coeficiente de convección, que es casi el doble que el del aire. Su superior capacidad de conducción térmica permite una disipación más eficiente del calor en comparación con el aire. Sin embargo, es importante considerar los inconvenientes asociados con el uso del agua como medio de refrigeración. Estos pueden variar desde riesgos potenciales de fugas hasta la corrosión de los componentes metálicos en contacto con el agua. Estos factores pueden requerir medidas adicionales de mantenimiento y cuidado para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

Además, el uso de agua como medio de refrigeración tiende a ser más costoso que el de aire, ya que implica la necesidad de una bomba hidráulica para el movimiento del agua, así como el uso de agua destilada y desionizada para prevenir la acumulación de impurezas que podrían afectar el rendimiento del sistema en dispositivos electrónicos como radares. Es importante tener en cuenta que el punto de congelación del agua es de 0 ºC, lo que significa que, en ambientes al aire libre en países con climas fríos el uso de agua como medio de refrigeración podría no ser una opción efectiva debido al riesgo de congelación. Sin embargo, en nuestro caso no debería de preocuparnos debido a que muy rara vez los sistemas electrónicos están expuestos a semejantes temperaturas. Muchos barcos que refrigeran sus motores con agua del mar se han visto parados debido a la congelación de los tubos de refrigeración del

motor. Esto debe considerarse a la hora de seleccionar el método de refrigeración más adecuado para nuestra aplicación [16].

2.3.3 Etilenglicol

El etilenglicol es un compuesto orgánico miscible en alcohol y agua, disolución que vemos con frecuencia en el día a día. A pesar de ser frecuente en muchos aparatos a nivel usuario, es una sustancia toxica que hay que manejar y tratar meticulosamente. Debido a múltiples factores como su baja conductividad térmica en comparación con el agua y su alta viscosidad tiene una capacidad menor de refrigeración frente al agua. Sus puntos de ebullición y de fusión son 195 ºC y -13 ºC, siendo esto así, es muy utilizado en aplicaciones como aires acondicionados, en motores de coche o dispositivos electrónicos, sistemas los cuales necesitamos fiabilidad [17].

2.3.4 Aceite

El uso de aceite como refrigerante está poco extendido en dispositivos electrónicos debido a su alta viscosidad que impide la correcta circulación de este por el circuito. Como el aceite es un líquido extraordinario para lubricar, lo encontramos en toda clase de motores de combustión, cárteres e inyectores, entre otros. Ya que su coeficiente de convección es más bajo que el de los demás refrigerantes, no se usa para eliminar calor sino para lubricar componentes mecánicos. En resumen, en el mundo de la electrónica difícilmente encontraremos aceite como medio refrigerante [18].

2.3.5 Amoniaco

El amoniaco se destaca como uno de los refrigerantes naturales más accesibles y económicos disponibles en el mercado. Con temperaturas de ebullición y fusión de -33 ºC y -78 ºC respectivamente, se encuentra en estado gaseoso a presión atmosférica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de refrigeración por compresión de vapor en diversos sectores, como la industria alimentaria, la refrigeración industrial y la fabricación de fármacos. A pesar de sus ventajas en términos de disponibilidad y bajo costo, el amoniaco presenta ciertas limitaciones importantes que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, es crucial destacar su extrema toxicidad para los seres humanos, lo que lo hace inadecuado para aplicaciones a nivel personal. Además, incluso una pequeña fuga en el sistema de refrigeración puede generar un olor fuerte y desagradable, lo que supone un riesgo para la salud y el medio ambiente. La incompatibilidad del amoniaco con ciertos materiales, como el cobre y ciertos tipos de plásticos, puede ocasionar problemas de corrosión y fugas en el circuito de refrigeración, o problemas mayores. Por lo tanto, su uso requiere un enfoque cuidadoso y un montaje meticuloso del sistema para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuado. En resumen, el amoniaco puede ser una opción atractiva debido a su abundancia, respeto al medio ambiente y bajo costo, pero su uso debe ser precedido por un análisis detallado de los riesgos y una implementación cuidadosa para evitar cualquier problema potencial [19].

Como resumen de los diferentes refrigerantes, en la Tabla 2-2, podemos ver las ventajas y desventajas, así como las limitaciones de cada fluido.

Refrigerante	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
Aire	□ Energía térmica almacenamiento □ Sistemas fotovoltaicos □ Ordenadores personales	□ Disponible de forma gratuita □ Amigable con el medio ambiente □ Sin preocupación de hervir o congelar	□ Capacidad térmica menor, coeficiente de convección, calor específico

Agua	□ Radar AN/SPY-1 □ Microprocesadores de potencia media □ Motores de combustión de poca cilindrada	□ Bajo costo □ Alta conductividad térmica y calor específico □ Baja viscosidad □ No toxicidad	□ Naturaleza corrosiva □ Congelación por debajo de 0ºC
Propilenglicol	□ Industria alimenticia □ Energías renovables (Aerogeneradores) □ Climatización □ Refrigeración en centros de datos □ Refrigeración pistas de hielo □ Motores de combustión	□ Toxicidad media □ Propiedades anticongelante □ Viscosidad moderada □ Estabilidad térmica y compatibilidad con metales	□ Costo más elevado que otros refrigerantes □ Menor capacidad de enfriamiento □ Degradación con uso y temperaturas extremas
Aceite	□ Cárter de motores de combustión □ Inyectores	□ Muy buen lubricante	□ Viscosidad elevada □ Coeficiente de convección bajo
Amoniaco	□ Refrigeración en industrias con altas potencias caloríficas. □ Congeladores y cámaras frigoríficas	□ Excelente eficiencia energética □ Refrigerante con bajo GWP/ODP □ Alto calor latente de evaporización □ Se utiliza en una amplia horquilla de temperaturas	□ Corrosivo en metales y tejidos □ Muy toxico □ Mínima fuga en nuestro circuito produce un olor muy fuerte.

Tabla 2-2 Comparativa de tipos de refrigerante. Fuente propia

2.4 Trabajos experimentales y numéricos

A lo largo del siglo XXI se han realizado numerosos estudios en bancos de ensayos con disipadores de calor de microcanales debido a que se considera una tecnología con mucho potencial y con buenas capacidades para eliminar altos flujos de calor. Experimentos como el de Tuckerman y Pease en los años 80 fueron los primeros en realizarse con tecnología de microcanales, y hoy en día son referencia en la ciencia de la refrigeración debido a sus éxitos excepcionales para la época, siendo capaces de refrigerar hasta 700 W/cm^2, una cifra muy superior a la que se enfrentaban con los dispositivos electrónicos de su década.

Otros ensayos experimentales como el de Colgan et al. reafirmaba la mejora significativa de refrigeración con el uso de microcanales, afirmando que se podía refrigerar microprocesadores con densidades de potencia de 400 W/cm^2.También fue muy notable la aportación de Kandlikar y Upadhye, añadiendo que, con un flujo turbulento desarrollado y aletas disipadoras del calor, la eliminación del flujo de calor se incrementaba notablemente. El cambio de geometría del disipador de calor también jugaba un papel importante en la mejora de la disipación, ya que según los estudios de Dix y Cols, se optimizó el intercambio de calor variando la geometría que seguía el microcanal.

Durante el siglo XXI, se han llevado a cabo numerosos estudios en bancos de ensayos con disipadores de calor de microcanales, debido a que se considera una tecnología con un gran potencial y capacidades para eliminar altos flujos de calor. Los primeros experimentos llevados a cabo como el realizado por Tuckerman y Pease en los años 80 marcaron el inicio de esta línea de investigación. Sus resultados excepcionales para la época, siendo capaces de refrigerar hasta 700 W/cm^2, han establecido un referente en la ciencia de la refrigeración.

Además, estudios posteriores, como el llevado a cabo por Colgan et al., reafirmaron la mejora significativa en la refrigeración con el uso de microcanales. Sus investigaciones demostraron la posibilidad de refrigerar microprocesadores con densidades de potencia de hasta 400 W/cm^2. Otros aportes importantes, como los de Kandlikar y Upadhye, subrayaron la importancia de desarrollar un flujo turbulento y la incorporación de aletas disipadoras de calor para mejorar aún más la eficiencia de la disipación térmica.

El cambio en la geometría del disipador de calor también se ha identificado como un factor crucial en la mejora del intercambio de calor. Estudios realizados por Dix y colaboradores mostraron que optimizar la geometría del microcanal puede tener un impacto significativo en la eficacia del proceso de disipación térmica.

Estos avances y descubrimientos han contribuido de manera significativa al desarrollo y la evolución de los disipadores de calor de microcanales, convirtiéndolos en una opción atractiva y efectiva para la gestión del calor en una amplia gama de aplicaciones electrónicas [12].

Esta tendencia de realizar ensayos experimentales ha quedado atrás con la innovación de programas tecnológicos capaces de realizar simulaciones teóricas y numéricas, sin embargo, con falta de credibilidad a ojos de la comunidad científica. En la actualidad, nos enfrentamos a una notable falta de estudios experimentales, ya que la mayoría de los resultados disponibles son el producto de simulaciones numéricas, dejándonos como resultado una carencia de datos de fiabilidad científica debido a que los ensayos solo fueron simulador en un entorno informático y deberían ser respaldados experimentalmente.

En este Trabajo de Fin de Grado, nos centramos en los resultados experimentales de la refrigeración líquida con agua. Estos resultados, respaldados por cálculos, nos permiten determinar el coeficiente de convección, que es una pieza fundamental para elegir el refrigerante más adecuado. El coeficiente de convección cuantifica la cantidad de calor transferido entre los flujos, lo que nos proporciona una base sólida para tomar decisiones sobre qué método y líquido refrigerante son los más apropiados para aplicaciones específicas o en la vida cotidiana.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Montaje experimental

El trabajo previo al montaje experimental fue intenso debido a la cantidad de detalles que se tuvieron que considerar, desde calcular la potencia de la bomba hidráulica hasta planificar la disposición de los elementos y el tamaño del montaje, todo tuvo su importancia. Un paso crucial fue la disposición de las Pt-100 de tal manera que nos diesen la información óptima para realizar los cálculos que nos interesaban. También dedicamos tiempo al meticuloso mecanizado del intercambiador de calor para obtener mediciones precisas de la temperatura de la pared, así como a elegir una fuente de calor que se asemejase lo más fielmente posible a un microprocesador, y que se pudiesen regular con precisión. En el montaje del circuito eléctrico tuvimos que combinar corriente alterna y corriente continua, lo que requirió la inclusión de un rectificador. También, instalamos un regulador para las placas calefactoras, un filtro de corriente alterna, conversores para transformar la señal de resistencia eléctrica a intensidad de corriente y nuestra tarjeta de adquisición de datos para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema. En resumen, fue un proceso detallado y algo complicado, pero necesario para asegurarnos de que nuestro experimento fuera exitoso, en los siguientes apartados se explican en más detalle cada elemento.

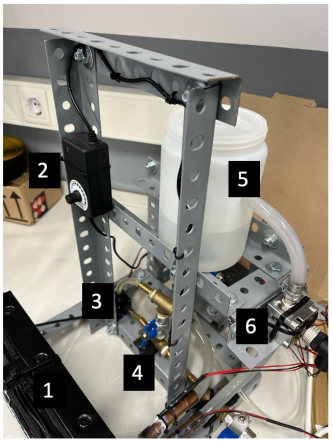
El montaje lo podemos dividir en grupos:

- Estructura
- Circuito hidráulico
- Circuito eléctrico
- Sistema de adquisición de datos

3.1.1 Estructura del banco de ensayos

El banco de ensayos debe disponer de una estructura que sirva de soporte para los diferentes componentes que lo conforman. Se optó por utilizar perfiles de estantería de acero debido a su resistencia y versatilidad. Estos perfiles fueron cuidadosamente medidos y cortados a mano con una sierra para adaptarlos a nuestras necesidades. Después de cortarlos, nos aseguramos de lijar los extremos para obtener un acabado suave y seguro. Una vez preparados los perfiles, procedimos a unirlos entre sí utilizando tornillos con arandelas y tuercas, creando el esqueleto del montaje quedando una base sólida y estable para el resto de los componentes del circuito. Los agujeros preexistentes en los perfiles de acero nos facilitaron en gran medida el acople de los componentes sobre la estructura. Elementos como el disipador de aire, la bomba hidráulica y el caudalímetro están fijado a la estructura mediante bridas, aprovechando estos agujeros en el perfil de acero.

En resumen, la adaptabilidad de perfiles de estantería de acero nos permitió construir una estructura robusta y funcional para nuestro circuito de una manera sencilla.

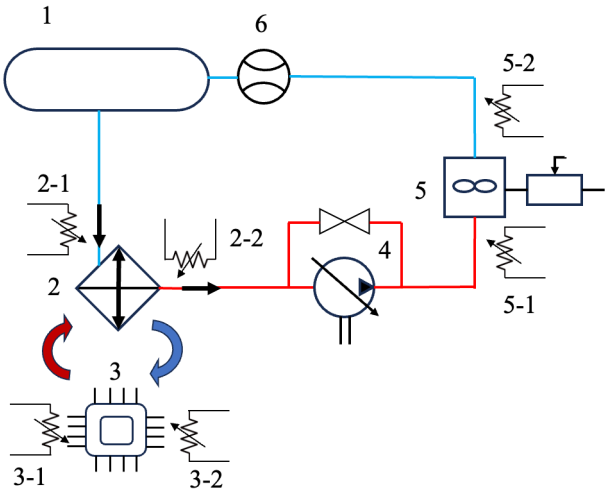


Número	Elemento
1	Disipador de calor
2	Potenciómetro
3	Bomba hidráulica
4	Bypass
5	Depósito
6	Caudalímetro

Figura 3-1 Estructura del montaje. Fuente propia.

3.1.2 Circuito hidráulico

El circuito hidráulico está compuesto por el intercambiador de calor objeto de estudio de este trabajo, así como por todos los elementos auxiliares que permiten el correcto funcionamiento del banco de ensayos. En la Figura 3-2, correspondiente al circuito hidráulico, vemos la disposición de las Pt-100 marcadas con una resistencia variable y también el recorrido que sigue el fluido refrigerante en el circuito. El fluido baja desde el depósito (1) al intercambiador de calor (2) donde absorbe el calor producido por las placas calefactoras (3), seguidamente es aspirado e impulsado por la bomba hidráulica (4) hacia el disipador de calor (5) para ceder el calor absorbido, por último, después de pasar por el caudalímetro (6) llega al depósito para comenzar un nuevo ciclo de refrigeración.



Número	Componente
1	Depósito
2	Intercambiador de calor
3	Placas calefactoras
4	Bomba hidráulica y llave de paso
5	Disipador de calor, ventilador y potenciómetro
6	Caudalímetro
2-1,2-2, 3-1,3-1, 5-1,5-2	Sensor de temperatura Pt-100

Figura 3-2 Circuito hidráulico. Fuente propia

A continuación, expondremos los elementos de los que se compone el circuito.

- Intercambiador de calor de aluminio: El intercambiador de calor desempeña un papel fundamental en nuestro circuito, ya que este Trabajo Fin de Grado se centra en el estudio de su comportamiento. Su tarea principal es facilitar el intercambio de calor desde el microprocesador, simulado por las placas calefactoras, hacia el líquido refrigerante que circula por su interior. Un parámetro que debemos conocer del intercambiador de calor es la temperatura de pared, así podremos hacer los cálculos para obtener los coeficientes de convección. Para obtener este dato se mecanizó el intercambiador de calor utilizando un taladro fijo Dremel de tal manera que la Pt-100 esta accesible para medir la temperatura de la pared interior por donde fluye el líquido refrigerante. Este paso involucró la creación de un agujero con un diámetro ligeramente superior

a 2,5 milímetros y una profundidad de 5 milímetros, Figura 3-3, lo cual fue esencial para integrar con precisión nuestro sensor de temperatura Pt-100 en el intercambiador de calor. La precisión en la realización de este agujero resultó fundamental para garantizar el correcto funcionamiento y monitoreo de la temperatura de pared.

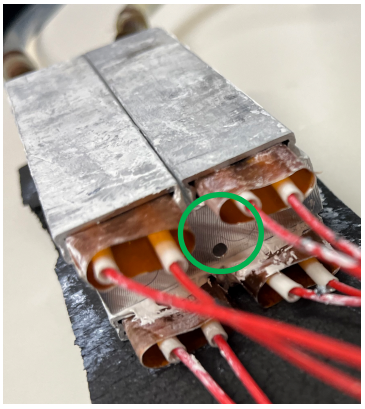


Figura 3-3 Mecanizado del orificio para la instalación de una Pt-100 en el interior del intercambiador de calor. Fuente propia

En vista a conocer la geométrica interna del intercambiador, como apreciamos en la Figura 3-4, se cortó el intercambiador para tomar medidas con un pie de rey de sus cuatro tubos internos y de sus dimensiones exteriores.

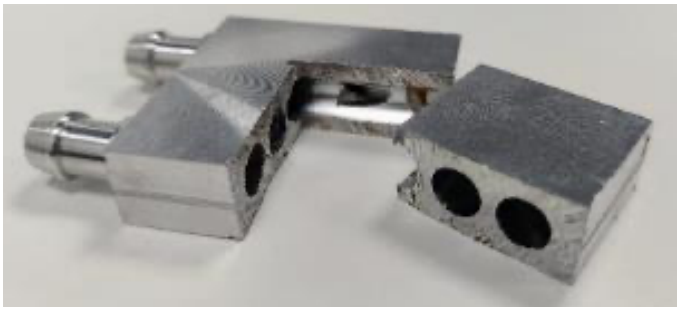


Figura 3-4 Intercambiador de calor seccionado. Fuente propia

Con el objetivo de obtener una comprensión más clara de nuestro intercambiador de calor y analizar posibles problemas en el flujo, se modeló el intercambiador en el software de diseño e ingeniería asistida por ordenador Autodesk Inventor. Apreciamos en la Figura 3-5 el intercambiador seccionado a la mitad con la dirección que sigue el flujo de líquido refrigerante y el cambio de temperatura que sufre en su recorrido.

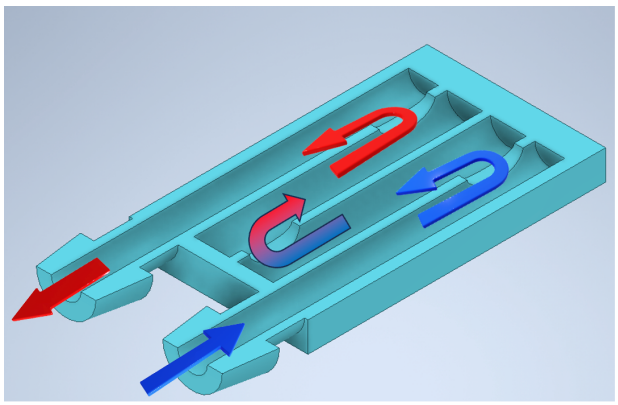


Figura 3-5 Intercambiador de calor modelado en Autodesk. Fuente propia

Para estudiar correctamente el comportamiento térmico-hidráulico del intercambiador de calor, fue necesario aislarlo, de tal forma que el calor generado en las placas calefactoras sea

completamente cedido al fluido refrigerante, reduciendo al máximo las pérdidas de calor al ambiente. En la Figura 3-6 vemos que decidimos recubrir tanto el intercambiador de calor como las placas calefactoras con aislamiento térmico de Armaflex.



Figura 3-6 Intercambiador de calor con aislamiento. Fuente propia

- Bomba hidráulica: La bomba hidráulica es el siguiente elemento por el que pasa el líquido refrigerante después de salir de intercambiador de calor y desarrolla un trabajo crucial en el banco de ensayos ya impulsa el fluido. Funciona con corriente continua y se alimenta de la fuente de alimentación de 24 V CC. La bomba tiene un by-pass que permite ajustar el caudal que circula por el intercambiador de calor-, mediante la apertura y cierre de una llave de paso. Las características más destacadas de la bomba hidráulica incluyen:

  - Input: 24 V 5,8 W
  - Altura máxima: 3 m
  - Caudal máximo: 240 l/h

- Disipador de calor: El disipador de calor está compuesto por dos ventiladores y un serpentín de microcanales por donde circula el líquido refrigerante. En esta etapa del circuito se realiza el intercambio de calor del líquido con el ambiente mediante la convección forzada del aire. Los microcanales están dispuestos en patrón de zigzag a lo largo del panel para maximizar la superficie de contacto entre el aire y el fluido refrigerante; el aumento en la superficie de contacto mejora significativamente la eficiencia en el proceso de convección. De esta manera, el disipador de calor cumple una función esencial al contribuir al enfriamiento efectivo del sistema. El disipador de calor se montó sobre los perfiles de acero utilizando bridas y aprovechando los agujeros preexistentes en dichos perfiles, al igual que el potenciómetro que regula la velocidad de los ventiladores. Este trabajo garantizó la fijación adecuada del disipador para su correcto funcionamiento.

- Depósito: El depósito de plástico tiene una capacidad de 500 ml y permite cargar el circuito hidráulico con el fluido refrigerante de interés. Se llevaron a cabo dos perforaciones: una en la parte inferior para la salida del fluido y otra en el lateral para el retorno de este, dado que se trata de un circuito cerrado. Para garantizar un sellado efectivo se empleó una tubería de rosca y una tuerca, entre medias de ambos una junta de goma, lo que impide la fuga del agua. Además, se fortaleció el sellado utilizando silicona para proporcionar una capa adicional de protección y estanqueidad. Este método asegura que el

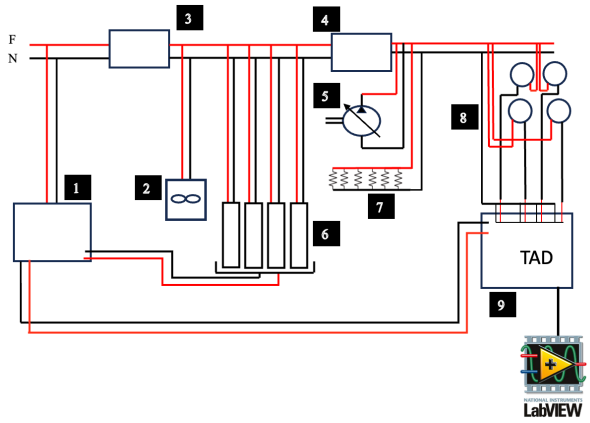
depósito mantenga la integridad del fluido en el sistema hidráulico, evitando cualquier pérdida no deseada.

Durante el montaje hidráulico se prestó especial atención en todas las juntas de fontanería, incluyendo codos y conexiones rectas, con el propósito de prevenir posibles fugas. La cinta de teflón fue un elemento muy importante para asegurar la estanqueidad y la conexión entre piezas de fontanería. Además, se emplearon abrazaderas de acero para asegurar las tuberías de plástico, garantizando así un agarre fuerte y confiable en todo el sistema. Este cuidadoso trabajo de la instalación aseguró la integridad del circuito hidráulico, minimizando cualquier riesgo de pérdida de fluido.

En vista a mejorar la adquisición de los datos, se agregaron tramos de tubo de cobre en la entrada y salida del disipador de calor, así como en el intercambiador de calor. Esta modificación tiene como objetivo mejorar la transferencia de calor ya que permite una mejor conducción térmica y, por lo tanto, mediciones más precisas de temperatura con las Pt-100 ubicadas en estos puntos críticos del sistema.

3.1.3 Circuito eléctrico

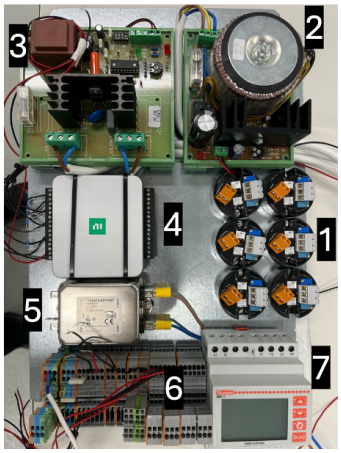
El montaje del circuito eléctrico fue un paso importante que requirió un estudio paciente de los componentes y las conexiones entre ellos, de tal manera que su posición fuese la más cómoda y funcional a la hora de cablear. Durante el montaje surgieron numerosos inconvenientes que fueron solventados rápidamente, aun así, nos obligaron a modificar la disposición pensada inicialmente, de tal manera que el montaje final quedó normalizado como vemos en la Figura 3-7.



Número	Elemento
1	Controlador de placas
2	Ventilador
3	Filtro de corriente
4	Rectificador
5	Bomba hidráulica
6	Placas calefactoras
7	PT-100 x6
8	Conversores x4
9	Tarjeta de adquisición de datos

Figura 3-7 Esquema del circuito eléctrico. Fuente propia

Después de muchas alternativas se optó por utilizar una placa de acero como base que a la vez se introdujo en un armario eléctrico cerrado, ya que es la mejor alternativa para que los elementos queden bien fijos. La disposición elegida para los elementos se muestra en la Figura 3-8, lo que nos permite una modificación eficiente de los componentes si fuese necesario durante los ensayos, y la resolución de posibles errores en el circuito en el futuro. Esta estructura proporciona una plataforma sólida y versátil para el montaje de los componentes eléctricos, facilitando así el mantenimiento y la optimización continua del sistema durante los ensayos.



Numeración	Elemento
1	Conversores
2	Rectificador
3	Regulador de placas
4	Tarjeta de adquisición
5	Filtro de AC
6	Racks de placas calefactoras, pt-100, ventilador y bomba hidráulica
7	Analizador de redes Lovato

Figura 3-8 Disposición de circuito eléctrico. Fuente propia

A continuación, describiremos todos los elementos eléctricos utilizados.

- Placas calefactoras: Una placa calefactora opera convirtiendo la energía eléctrica en calor mediante una resistencia interna. Las resistencias garantizan una distribución uniforme del calor a lo largo de toda la superficie de la placa, lo que proporciona una temperatura homogénea en toda su extensión. El control de estas placas se lleva a cabo típicamente mediante un termostato, el cual regula la temperatura deseada ajustando la cantidad de energía eléctrica suministrada a la resistencia interna. De esta manera, se puede mantener una temperatura constante y controlada en la placa calefactora, lo que la hace ideal para una variedad de aplicaciones que requieren calor uniforme a una determinada temperatura. En nuestro caso, las placas no funcionan con termostato, sino que se desea controlar la potencia a suministrar. Fijándonos en la Figura 3-10 el intercambiador de calor está cubierto por placas calefactoras, dos arriba y dos abajo unidas mediante bridas, que a su vez están embadurnadas en pasta térmica para garantizar un adecuado contacto térmico.

- El regulador de placas CEBEK R28 AC 1500: Su principio de funcionamiento se basa en variar la corriente eléctrica que se aplica sobre las placas calefactoras para controlar su potencia. Para esta tarea, suele emplearse un semiconductor conocido como Triac, que limita la cantidad de corriente que fluye a través del regulador. El regulador recibe una señal de 0-10 V que es directamente proporcional a la horquilla de potencias que puede generar, 0-1500 W, y la manda a las placas. Algunos reguladores también pueden integrar sensores Pt-100 y operar en modo automático, lo que les permite determinar el porcentaje de potencia necesario para mantener el circuito a una temperatura específica. Este dispositivo ofrece un control de las placas que es totalmente necesario para realizar ensayos a diferentes temperaturas, recibiendo las órdenes a través de la tarjeta de adquisición de datos, Figura 3-7 que a su vez recibió la orden por el usuario desde LabVIEW. Como podemos comprobar un componente esencial porque tienen el control preciso de nuestras placas, algo primordial a la hora de realizar cualquier ensayo.

- Potenciómetro del disipador de calor: Como se comentó anteriormente, el disipador cuenta con dos ventiladores que fuerzan el movimiento de aire enfrentado a la batería de microcanales. Mediante un potenciómetro se puede controlar la velocidad de

ambos ventiladores. La alimentación de este potenciómetro se encuentra en los racks que vemos en la Figura 3-8, alimentándose directamente de la corriente 230 V CA.

- Filtro de corriente: Un filtro de corriente es un componente electrónico diseñado para suprimir los picos de frecuencia que podrían ser perjudiciales para componentes electrónicos sensibles. Además de esta función primaria, también se utiliza para atenuar el ruido eléctrico no deseado y suavizar la corriente eléctrica, lo que contribuye a garantizar un suministro eléctrico más estable y limpio para el sistema de adquisición de datos del banco de ensayos. Los filtros de corriente tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos, que van desde las telecomunicaciones hasta la industria automotriz. En esencia, estos dispositivos desempeñan un papel importante en la protección y el funcionamiento eficiente de equipos electrónicos y sistemas eléctricos en una variedad de entornos y aplicaciones.

- Fuente de alimentación CEBEK FE136 24 V: La fuente de alimentación convierte el voltaje de entrada de 230 V CA en una salida estable de 24 V CC, indispensable para los elementos del sistema de adquisición de datos y la bomba hidráulica que trabajan en corriente continua. Esta conversión se realiza de manera segura incluso sufriendo posibles fluctuaciones que pueda experimentar la corriente de entrada de 230 V AC. Gracias a la incorporación de un filtro de corriente, cualquier variación indeseada se elimina antes de que la corriente llegue a la fuente de alimentación, lo que garantiza una salida constante y segura sin picos ni caídas de potencia.

3.1.4 Sistema de adquisición de datos

En este apartado explicaremos todos los elementos involucrados en la toma y muestra de datos, así como el funcionamiento de estos.

- Sensor de temperatura Pt-100: Uno de nuestros sensores clave en el sistema de refrigeración es sin duda la Pt-100. Gracias a su ubicación en las zonas más críticas del circuito, como se muestra en la Figura 3-2 del montaje hidráulico, podemos llevar a cabo un análisis más detallado y preciso del funcionamiento del sistema. La Pt-100 opera en base a una diferencia de resistencia eléctrica, esta resistencia eléctrica la convertimos en señal analógica estándar de 4-20 mA a través de un conversor dedicado. Fabricadas con platino, de ahí el nombre "Pt", las Pt-100 se rigen por la ecuación de Callendar-Van Dusen, la cual hace una relación entre la resistencia y la temperatura termorresistente del platino, siendo a 0 ºC la resistencia de 100 ohmios. Su precisa y milimétrica medición las hace ideales para obtener con precisión las fluctuaciones de temperatura en un circuito de refrigeración y muchos otros experimentos de investigación, de ahí que sean comúnmente utilizadas. En la Figura 3-9 podemos observar cómo se soldaron las Pt-100 a los cables con hilo de estaño.

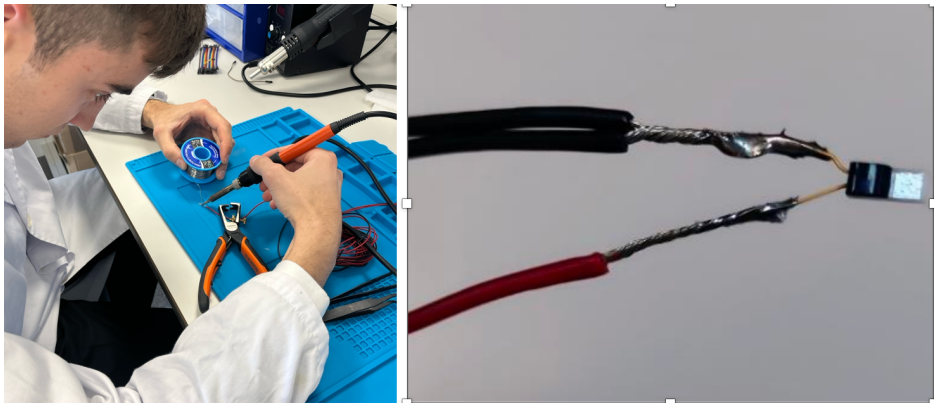


Figura 3-9 Soldadura de Pt-100. Fuente propia

En nuestro intercambiador de calor se han instalado dos sondas Pt-100: una destinada a medir la temperatura de la pared interior de los canales del intercambiador y otra para medir la temperatura superficial. Esta configuración nos permite obtener datos relevantes sobre la distribución del flujo de calor en el interior de este. Al monitorizar ambas temperaturas podemos evaluar de manera más completa el rendimiento térmico del intercambiador y detectar posibles áreas de interés o anomalías. Este enfoque nos proporciona información crucial para optimizar el diseño y el funcionamiento del sistema de refrigeración, garantizando un rendimiento óptimo y una eficiencia energética adecuada. En la Figura 3-10 se puede observar la disposición de las PT-100 con pasta térmica en el intercambiador de calor. Si nos fijamos detenidamente en la Figura 3-10 vemos como se ha introducido la Pt-100 en el agujero que mecanizamos con el taladro fijo Dremel, (ver Figura 3-3).

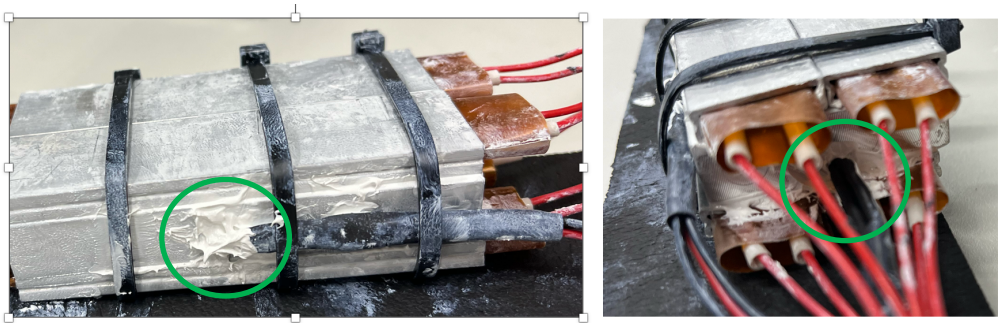


Figura 3-10 Intercambiador con Pt-100 midiendo temperatura de pared (derecha) y temperatura superficial (izquierda). Fuente propia

- Conversores o transmisores de temperatura: Un conversor es un elemento que se encarga de transformar la medida de resistencia eléctrica recibida de las Pt-100 a una señal analógica estándar de 4-20 mA. De esta manera somos capaces de transformar una fuente de datos en otra para compatibilizarla con otros elementos como la tarjeta de adquisición de datos y LabVIEW.

Para calibrar el conversor y garantizar mediciones precisas necesitamos dos resistencias, primero una de 100 Ω y después otra de 140 Ω. Para transformar las señales de analógica a digital encontramos dos tornillos, Zero y Span, que ajustan la ecuación de cálculo por la que rige el conversor (ver Figura 3-11). La ecuación que define el conversor es de tipo lineal $y = ax + b$. Lo primero que debemos hacer es ajustar el corte con el eje de ordenadas, 'b', usando una resistencia de 100 Ω y el tornillo de Zero. Una vez obtenido el parámetro 'b', ajustamos la pendiente de la recta, 'a', con una resistencia de 140 Ω y el tornillo de Span. Las señales que debemos obtener respectivamente son 4 y 20 mA, correspondientes al mínimo y máximo de nuestra horquilla de intensidad.

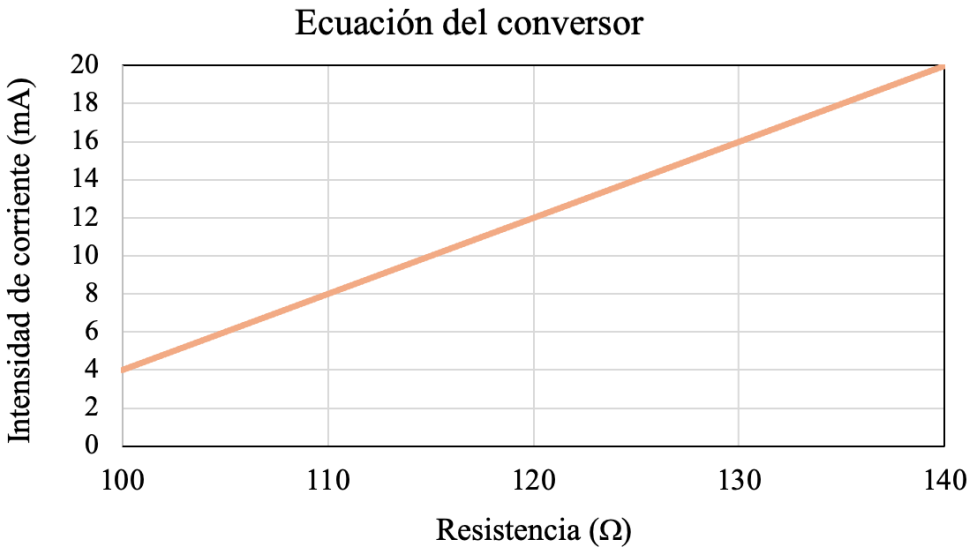


Figura 3-11 Ecuación del conversor. Fuente propia

Esta configuración se lleva a cabo en el programa LabVIEW ya que nos permite monitorizar la señal digital de intensidad de corriente que recibimos de los conversores, al igual que muchos otros parámetros del circuito. La Figura 3-12 nos muestra el ajuste que hicimos de un conversor usando el tornillo Zero, podemos apreciar que la base de la señal está en los 4 mA.

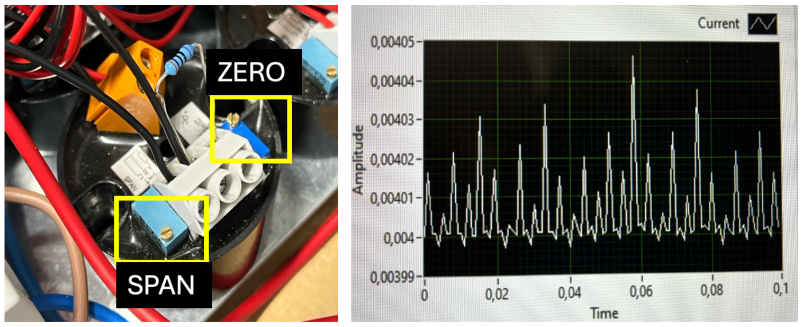


Figura 3-12 Ajuste del conversor. Fuente propia

- TAD: La tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (TAD) se puede considerar un intermediario entre el usuario y el circuito, ya que está encargada de capturar y procesar las señales procedentes de diversos sensores como el caudalímetro o el conversor y presentarlas al usuario. La tarjeta de adquisición de datos nos permite medir tanto en monopolar como en diferencial, su diferencia principal radica de donde tomamos el punto de referencia para medir la diferencia de potencial. En monopolar tenemos ocho salidas mientras que de diferencial cuatro. La tarjeta de adquisición de datos recibe las señales de los diferentes sensores, las cuales son escaladas, acondicionadas y presentadas al usuario en el ordenador a través del programa LabVIEW. Otra capacidad que fue mencionada en el apartado Circuito eléctrico es la de enviar órdenes a través de la tarjeta al controlador de placas. En resumen, la tarjeta de adquisición National Instrument es un intermediario entre el usuario y el sistema totalmente necesario para la realización de ensayos.

- Analizador de redes: El analizador de redes Lovato MG110 es un dispositivo destinado al monitoreo de redes trifásicas. Equipado con una pantalla, este analizador ofrece una amplia gama de mediciones eléctricas, incluyendo voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, frecuencia y consumo, entre otros parámetros. Su función principal es proporcionar

información detallada sobre el estado y el rendimiento de la red eléctrica, lo que permite una gestión más eficiente y un diagnóstico preciso de cualquier anomalía o problema que pueda surgir en el sistema eléctrico. En nuestro circuito tomará especial relevancia a la hora de indicarnos la potencia consumida por las placas calefactoras en vista a ajustar nuestros ensayos.

- Caudalímetro: El caudalímetro registra la cantidad de flujo volumétrico que pasa a través de un circuito en un período de tiempo determinado, su funcionamiento se basa en un rotor interno que gira impulsado por el flujo del circuito. Este rotor está equipado con imanes que inducen pulsos eléctricos cada vez que giran siguiendo el principio del efecto Hall. Los pulsos eléctricos generados por el sensor se cuentan y registran, siendo la frecuencia de los pulsos proporcional al caudal del fluido: a mayor flujo, más rápido gira el rotor y más pulsos se generan en un período de tiempo dado. Por lo tanto, el número total de pulsos generados en un intervalo de tiempo determinado proporciona una medida del caudal volumétrico en litros por hora. Esta señal digital se envía en forma de diferencia de voltaje a la tarjeta de adquisición de datos. En LabVIEW, la señal digital de caudal volumétrico se recibe desde la tarjeta de adquisición de datos en forma de pulsos y se visualiza en una interfaz gráfica de usuario en litros hora. Esto permite al usuario monitorear el flujo del fluido en tiempo real y realizar análisis o ajustes según sea necesario. Nuestro caudalímetro está limitado a 240 l/h y a una presión máxima de 50 bar, proporcionando 1100 pulsos por litro.

- LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de desarrollo de software que permite la medición, el control y la realización de pruebas en diversos tipos de circuitos, convirtiéndose en el núcleo de los ensayos con capacidad de automatización. La principal ventaja y popularidad de LabVIEW radica en su entorno de programación gráfica. Los programas se crean mediante la conexión de los llamados "diagramas de bloques", lo que simplifica enormemente la programación para usuarios con poca experiencia en este ámbito. Tanto la tarjeta de adquisición de datos como el programa LabVIEW son productos de National Instruments, lo que mejora la integración y el trabajo conjunto de estos dos componentes fundamentales de manera fluida y sin errores. Nuestro programa de LabVIEW lo podemos dividir en 2 sección bien diferenciadas.

    - Esquema principal banco de ensayos

      En esta sección del programa, nos encontramos con un lenguaje de alto nivel que hemos diseñado previamente para que sea comprensible a nivel usuario, siendo además muy intuitivo. En la Figura 3-13, se representan los ensayos que se pueden realizar con nuestro circuito junto con la ubicación de los sensores de temperatura y

el caudalímetro. Además, tenemos la capacidad de regular la potencia que reciben las placas calefactoras.

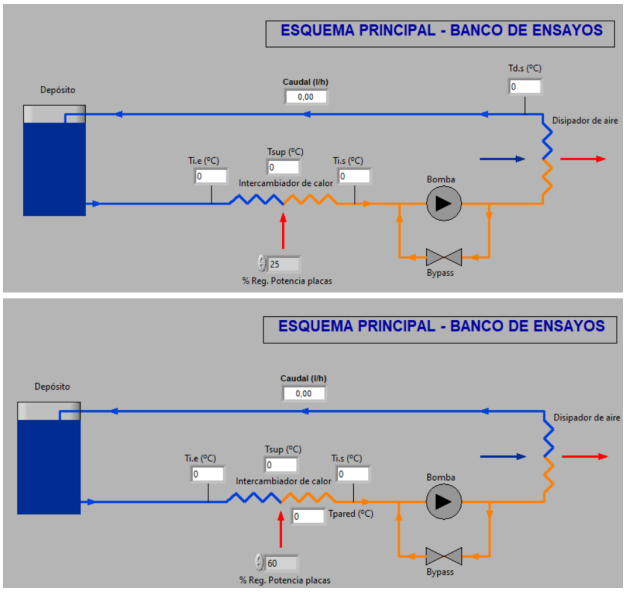


Figura 3-13 Esquema principal de banco de ensayos. Fuente propia

- Diagrama de bloques

Esta segunda ventana del programa LabVIEW es el entorno de programación, donde creamos los bloques de comandos para automatizar los ensayos y visualizar los datos en el esquema principal, así como guardarlos en un archivo en nuestro ordenador. Consta de un bucle principal dividido en diferentes procesos: lectura de los sensores, escalado y acondicionamiento de las señales, guardado de datos y mostrado en pantalla.

Para la lectura de las temperaturas de interés en el circuito, se empleó el módulo DAQ Assistant (Figura 3-14), que facilita la programación sin necesidad de recurrir a funciones básicas de LabVIEW. El formato de medición de nuestros sensores se establece como diferencial, en el que los bornes positivo y negativo de los conversores se cablean a los positivo y negativo de las entradas analógicas de la TAD. Las entradas analógicas de la tarjeta trabajan en el rango de tensiones 0-10 V, por lo que es necesario incluir una resistencia eléctrica de 499 Ω en paralelo a los bornes de la tarjeta, de tal forma que permita la equivalencia con la señal 4-20 mA de los conversores.

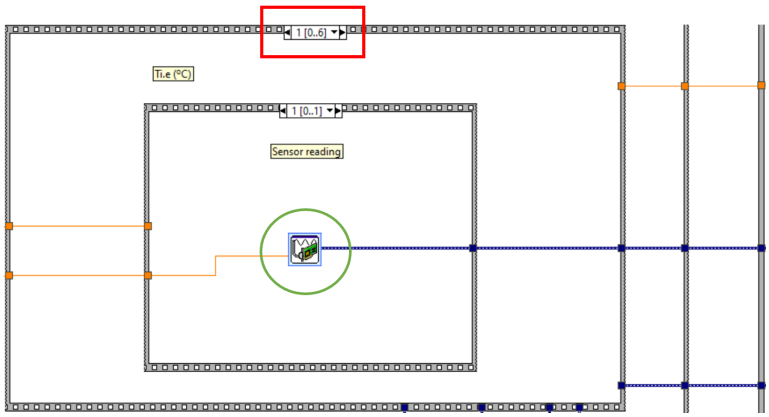


Figura 3-14 Modulo de configuración de sensores Pt-100. Fuente propia

En Figura 3-15 vemos rodeadas en rojo todos los parámetros que debimos modificar, el valor de resistencia, la configuración diferencial utilizada para la TAD (RSE), así como los máximos, mínimos y unidad en la que se mide

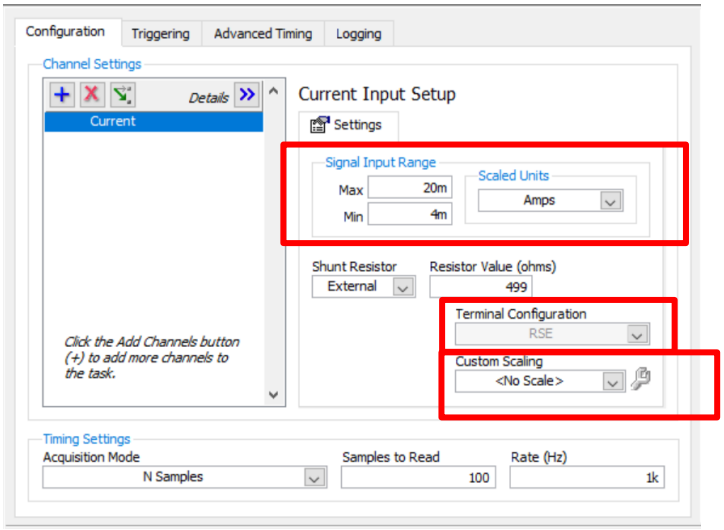


Figura 3-15 Configuración del diagrama de bloques. Fuente propia

El siguiente módulo que se construyó se encarga de transformar la señal adquirida de la Pt-100 en temperatura (ºC). La Figura 3-16 nos muestra que en primer lugar, se realiza el promedio de las 100 muestras tomadas con el DAQ Assistant mediante la función Mean. A continuación, se realiza el escalado que transforma la señal analógica 4-20 mA en resistencia eléctrica, mediante la función Scaling. Para ello se tiene en cuenta el rango en el que operan los conversores (0-100 ºC) para obtener una equivalencia en resistencia eléctrica (aproximadamente 100-140 Ω) con la que se realiza el escalado. Después, obtenemos la temperatura en grados centígrados a través de la ecuación de Callendar-Van Dusen que se visualiza en el esquema principal.

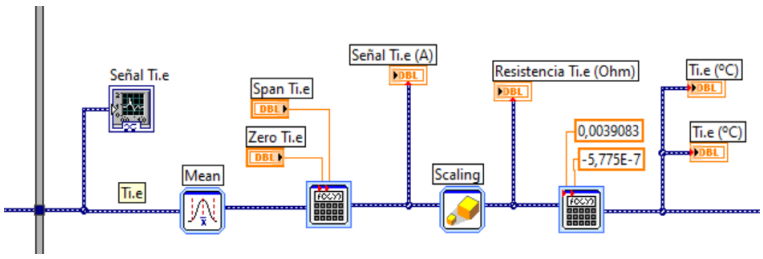


Figura 3-16 Módulo de transformación de señal. Fuente propia

Una vez obtenidas las temperaturas en grados centígrados con el módulo anterior, se deben mostrar al usuario en ESQUEMA PRINCIPAL y guardar los datos obtenidos en un fichero. Además de realizar los dos cometidos que acabamos de mencionar, en la Figura 3-17 vemos que en el diagrama de bloques tenemos la opción de configurar el regulador de las placas calefactoras que veíamos en nuestro esquema principal.

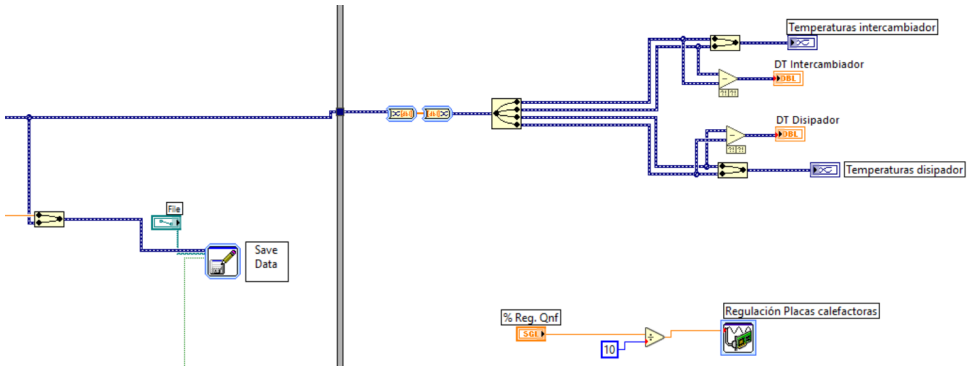


Figura 3-17 Modulo de presentación y fichero de datos. Fuente propia

3.2 Procedimiento de ensayo

A la hora de realizar nuestros ensayos es de rigurosa necesidad establecer previamente unas instrucciones de actuación. De este modo, los diferentes ensayos que hagamos serán bajo las mismas condiciones sin que el resultado pueda verse afectado por realizarlos en condiciones diferentes. Para un ensayo general en nuestro circuito las instrucciones a seguir son las siguientes.

- Procedimiento general:

1. Cargar Fluido de interés vertiéndolo en el depósito a la vez que se vacía el fluido que estaba previamente en el circuito, si lo hubiese. De esta manera nos aseguramos de que se elimina todo el líquido anterior y solo queda en el circuito el nuevo fluido de interés.

2. Purgar el circuito. En este apartado eliminamos el aire que tenemos en el interior de nuestro circuito. Primero, conectamos la corriente para que la bomba haga circular el fluido, después, abrimos y cerramos el by-pass para producir cambios de presión que nos facilitan la expulsión del aire residual. Para eliminar completamente este aire uno de los métodos más efectivos es el de mover

de orientación el circuito por completo de tal manera que el aire se fuerce a circular y no a quedarse estancado en microcanales, codos o incluso dentro del intercambiador.

3. Establecemos las condiciones de ensayo. Estudiamos y decidimos cuáles son los parámetros que queremos para la toma de datos y estado inicial del circuito.

3.1. Ajustamos el caudal con el by-pass.

3.2. Regulamos la temperatura o el porcentaje de potencia que queremos en las placas.

3.3. Cambiamos la temperatura en el disipador de calor variando giro de los ventiladores con el potenciómetro.

3.4. Dependiendo del ensayo que vayamos a realizar, ordenar a las placas calentamiento superior, inferior o en ambas caras.

3.5. Decidimos qué sensores Pt-100 vamos a usar, las del disipador, las del intercambiador, la de pared o la superficial.

4. Esperamos a la estabilización del sistema hasta alcanzar el estado estacionario con todos nuestros parámetros constantes.

5. Guardar datos en LabVIEW. Establecemos el número de lecturas que deseamos y el intervalo entre ellas.

6. Una vez hemos realizado el ensayo y los datos se han tomado, volvemos al apartado 3 para establecer nuevas condiciones.

7. Una vez acabados todos los ensayos con un fluido de interés, lo evacuamos fuera del banco de ensayos mediante la toma de vaciado habilitada para ese propósito.

Para nuestros ensayos la tarjeta de adquisición de datos se configura en modo diferencial por lo que solo podremos tomar datos de cuatro Pt-100. Debido a esto necesitamos definir otro ensayo.

En este apartado se desarrollarán los principios físicos y las ecuaciones que permitan el análisis de los datos recopilados durante los ensayos, de tal forma que permitan la determinación de los parámetros necesarios para obtener conclusiones sobre el proceso de intercambio de calor.

3.3 Análisis de datos

3.3.1 Variables físicas de entrada

Las variables que se obtienen a partir de las medidas directas en los diferentes ensayos son las siguientes:

- T_{ie}: temperatura de entrada al intercambiador de calor.
- T_{is}: temperatura de salida del intercambiador de calor.
- T_{sup}: temperatura de superficie del intercambiador de calor.
- T_{de}: temperatura de entrada al disipador.
- $\dot{V}$: caudal volumétrico del fluido en el circuito.

Como se comentó anteriormente, también es posible obtener las temperaturas de salida del disipador (T_{ds}) y la temperatura de la pared de los canales del intercambiador (T_{pared}), cambiando las conexiones de las Pt-100 en el bornero del armario eléctrico.

Además, es necesario conocer minuciosamente la geometría del intercambiador. En la **Figura 3-18** vemos un esquema del corte transversal con todas las medidas necesarias.

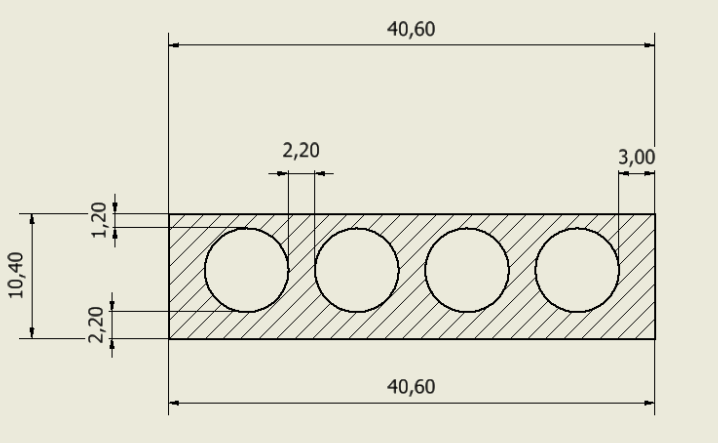


Figura 3-18 Corte de la vista del intercambiador de calor. Fuente propia

A partir de estas medidas, se obtuvieron los parámetros geométricos que caracterizan el proceso de transferencia de calor, que se resumen en la **Tabla 3-1**.

Parámetro	**Valor (m)**
L	0,0800
W	0,0406
δ□	0,0022
d	0,0070

Tabla 3-1 Dimensiones del intercambiador de calor. Fuente propia

3.3.2 Formulación del problema

Por lo tanto, se pretende estudiar el proceso de transferencia de calor en el intercambiador de calor que disipa el calor generado por las placas calefactoras, simulando aquel que tiene lugar en un sistema de refrigeración líquida de microprocesadores. Se van a tomar en consideración las siguientes hipótesis:

1. El fluido es incomprensible, isotrópico y homogéneo.
2. El proceso de intercambio de calor se produce en estado estacionario.
3. No se producen efectos disipativos debido a fuerzas viscosas en el fluido.
4. Las placas calefactoras producen un flujo de calor constante y homogéneo a lo largo de toda la superficie del intercambiador.
5. No se producen pérdidas de calor, por lo que, el calor generado en las placas calefactoras es absorbido completamente por el fluido que pasa por el interior del intercambiador de calor.
6. Los efectos de transferencia de calor por conducción en la dirección axial a las paredes de los canales del intercambiador son despreciables.

3.3.3 Coeficiente de convección

Bajo la aplicación de las hipótesis enumeradas, se puede obtener el calor absorbido por el fluido a su paso por el intercambiador, mediante la aplicación de un balance energético:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}\, c_p\, (T_{is} - T_{ie}) = \rho\, \dot{V}\, c_p\, (T_{is} - T_{ie})$$

donde las propiedades del fluido son obtenidas a la temperatura media del intercambiador (T_{mi}), definida como el promedio de T_{ie} y T_{is}. Haciendo uso del equivalente eléctrico del proceso de transferencia de calor, se puede definir la resistencia térmica (R_T) a partir de la máxima diferencia de temperatura entre las placas calefactoras y el fluido, de la siguiente manera:

$$R_T = \frac{T_{sup} - T_{ie}}{\dot{Q}_i}$$

Haciendo uso del equivalente eléctrico del proceso de transferencia de calor, se puede separar esta resistencia térmica total en tres componentes: la resistencia térmica de conducción en el intercambiador (R_k), la resistencia térmica de convección interna en el intercambiador (R_c) y la resistencia térmica capacitiva del fluido a su paso por el intercambiador (R_{cap}). Así, la resistencia térmica total es la suma de estas tres componentes:

$$R_T = R_k + R_c + R_{cap}$$

Cada una de las tres resistencias térmicas que conforman la resistencia térmica total pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$R_k = \frac{\delta}{\lambda_s \, A_k}$$

$$R_c = \frac{1}{h \, A_c}$$

$$R_{cap} = \frac{1}{\rho \, \dot{V} \, c_p}$$

siendo λ_s la conductividad térmica del sólido (intercambiador de calor), h el coeficiente de convección y A_k y A_c las áreas de transferencia de calor por conducción y convección, respectivamente, las cuales se pueden obtener como:

$$A_k = L \, W$$

$$A_c = 4 \, \pi \, d \, L$$

Conocidas la resistencia térmica total, así como las resistencias térmicas de conducción y capacitiva, se puede calcular la resistencia térmica de convección:

$$R_c = R_T - R_k - R_{cap}$$

Y, por lo tanto, se puede obtener el coeficiente de convección:

$$h = \frac{1}{R_c \cdot A_c}$$

3.3.4 Parámetros adimensionales

Una práctica común en el análisis de procesos de intercambio de calor consiste en el uso de parámetros adimensionales, de tal forma que sea comparable a otros sistemas con diferentes estructuras o geometrías. El problema de la obtención del coeficiente de convección en procesos de transferencia de calor es equivalente a la determinación de la siguiente relación funcional:

$$Nu = Nu(Re, Pr)$$

siendo Nu, Re y Pr los números adimensionales de Nusselt, Reynolds y Prandtl. El número de Nusselt compara la transferencia de calor por convección frente a la conducción a través de una superficie, definido de la siguiente forma:

$$Nu = \frac{\lambda\, d}{h}$$

El número de Reynolds indica cómo es el movimiento del fluido, relacionando las fuerzas viscosas e inerciales presentes en el fluido:

$$Re = \frac{\rho\, v\, d}{\mu}$$

donde v es la velocidad del fluido, que se puede obtener a partir del caudal volumétrico:

$$v = \frac{4\,\dot{V}}{\pi\, d^2}$$

El número de Prandtl indica el cociente entre la tasa de difusión debida a las fuerzas viscosas y la tasa de difusión térmica en un fluido:

$$Pr = \frac{c_p\, \mu}{\lambda}$$

3.3.5 Correlaciones teóricas

En nuestro análisis del intercambio de calor en el circuito, nos enfrentamos a diferentes regímenes de flujo, cada uno con sus propias características y comportamientos térmicos. Así, para cada uno de ellos, existen diferentes correlaciones teóricas, obtenidas anteriormente y publicadas en la literatura, que tratan de predecir el comportamiento térmico de un intercambiador similar al empleado en este trabajo. A continuación, se reseñan las correlaciones teóricas más importantes para este tipo de sistema:

- Flujo laminar

En esta correlación partimos de la base que el flujo de calor es constante y homogénea en toda su superficie, así como la existencia de flujo laminar hidrodinámicamente desarrollado, de tal manera que el número de Nusselt lo obtenemos [20]:

$$Nu_{m,q} = \left[Nu_{m,q,1}^3 + 0{,}6^3 + \left[Nu_{m,q,2} - 0{,}6\right]^3\right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde [21]:

$$Nu_{m,q,1} = 4{,}364$$

$$Nu_{m,q,2} = 1{,}953\sqrt[3]{RePrd_i/l}$$

Además de esta correlación teórica, existen otras en las que se considera flujo laminar hidrodinámica y térmicamente desarrollado, entre ellas [22]:

$$Nu_{m,q} = \left[Nu_{m,q,1}^3 + 0{,}6^3 + \left[Nu_{m,q,2} - 0{,}6\right]^3 + Nu_{m,3}^3\right]^{\frac{1}{3}}$$

donde:

$$Nu_{m,q,3} = 0{,}924\sqrt[3]{Pr}\sqrt{Re(d_i/l)}$$

- Flujo transitorio

Una de las ecuaciones más relevantes para tuberías de sección circular es la correlación de Gnielinski [23]:

$$Nu_m = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)RePr}{1+12{,}7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)}\left[1 + (d_i/l)\right]^{2/3}$$

siendo f el factor de fricción, que se obtiene como:

$$f = (1{,}8 \log_{10} Re - 1{,}5)^{-2}$$

Además de Gnielinski encontramos la correlación de Wu-Little, que la definimos como [24]:

$$Nu = 0{,}0022 Re^{1{,}09} Pr^{0{,}4}$$

- Flujo turbulento

Para la refrigeración de cualquier dispositivo electrónico nos interesa circular el líquido refrigerante en un régimen turbulento debido a su eficacia, existen numerosos estudios para la correlación de régimen turbulento debido a su relevancia. Nuevamente, para flujo turbulento completamente desarrollado, Gnielinski aportó la siguiente correlación [25]:

$$Nu_m = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re\ Pr}{1 + 12{,}7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

donde f es el factor de fricción, obtenido como:

$$f = (1{,}8 \log_{10}(Re) - 1{,}5)^{-2}$$

Un ejemplo de correlación para régimen turbulento en microcanales de sección circular es la correlación de Yu [26]:

$$Nu = 0{,}0007\ Re^{1{,}2} Pr^{0{,}2}$$

3.4 Fluidos estudiados

Para el estudio del intercambiador de calor, se emplearon cuatro fluidos diferentes: agua y mezclas de agua con propilenglicol en cuatro porcentajes en peso distintos (30%, 20% y 10% de propilenglicol). Las propiedades termofísicas de los fluidos que influyen en los procesos de transferencia de calor son: densidad, calor específico, conductividad térmica y viscosidad. Para la determinación de los valores de cada una de estas propiedades a diferentes temperaturas para cada uno de los fluidos estudiados, se emplearon las siguientes relaciones funcionales:

$$\rho = A_0 + A_1 T + A_2 T^2$$

$$c_p = B_0 + B_1 T + B_2 T^2$$

$$\lambda = C_0 + C_1 T + C_2 T^2$$

$$\mu = D_0 + D_1 T + D_2 T^2 + D_3 T^3$$

Los coeficientes de estas ecuaciones fueron obtenidos mediante regresión de los valores de los trabajos de Lemmon [27] para el agua y Melinder [28] para las mezclas de propilenglicol y agua, cuyos valores se recogen en la Tabla 3-2.

	Agua	PG:A 10-90%	PG:A 20-80%	PG:A 30-70%
A_0	–0,004122	−0,0022	−0,00223	−0,00223
A_1	2,207	0,9386	0,9662	0,9664
A_2	705,8	918,4	927,9	927,9
B_0	0,005639	0,00089	0,000003	0,00000002
B_1	−5,209	0,8300	2,000	2,000
B_2	5215	3755	3393	3393
C_0	−0,0000097	−0,000004	−0,000002	−0,000004
C_1	0,0075	0,0038	0,0023	0,0037
C_2	–0,7546	0,1949	0,0013	0,1949
D_0	0,0313	0,0954	0,2407	0,0954
D_1	−0,0002	0,00078	0,0020	−0,00079
D_2	0,0000003	0,000002	0,00005	0,00002
D_3	0,000002	0,000002	0,00000005	0,00002

Tabla 3-2 Coeficientes de los líquidos refrigerantes. Fuente propia

4 VALIDACIÓN Y RESULTADOS

4.1 Validación del equipo experimental

Para comprobar la fiabilidad de los sensores y circuito se hizo una triple validación, de las temperaturas, de la potencia suministrada por el controlador de placas calefactoras y de los coeficientes de convección. Una vez desarrollados y aprobados estos ensayos tenemos la seguridad de que los parámetros de medición y trabajo del circuito están dentro una horquilla aceptable la cual nos asegura que los datos obtenidos son válidos.

4.1.1 Validación de la medida de temperaturas

En este apartado, nuestro objetivo es verificar si los sensores de temperatura Pt-100 están midiendo correctamente o si presentan alguna anomalía. Antes de iniciar el ensayo, realizamos una comprobación de las Pt-100 con un polímetro. Si obtenemos un valor de aproximado de 108 Ω (correspondiente a una temperatura aproximadamente de 20 ºC), confirmamos que funcionan correctamente y que están bien soldadas. Una vez verificado que los sensores están bien soldados, procedemos a ajustar los conversores. La Figura 3-12 muestra cómo podemos realizar esta tarea utilizando los tornillos SPAN, ZERO, dos resistencias de precisión de 100 y 140 Ω y el programa LabVIEW. Después de ajustar los elementos del conversor, estamos listos para realizar el primer ensayo.

Para esta prueba, dejamos el banco de ensayos funcionando durante 3 horas para que se estabilice a temperatura ambiente. Una vez el banco de ensayos se encontraba a una temperatura estable, se realizaron dos ensayos para tener lo máximos datos posibles, además de recopilar información de todos los sensores Pt-100. Esto nos asegura que los datos recopilados sean representativos y precisos. Una vez archivadas las temperaturas en nuestro documento Excel, procedemos a analizar los datos y a graficar nuestros resultados

La Figura 4-1 nos muestra todas las temperaturas del circuito, y al analizar los datos, observamos que no difieren entre sí en más de 0,15 ºC. En nuestro circuito contamos con Pt-100 Clase A, sujetas a una precisión de $0{,}15 + 0{,}002t$, siendo t la temperatura en grados Celsius. Como hemos obtenido desviaciones menores a 0,19 ºC (precisión de la Pt-100 Clase A a una temperatura de 19 ºC), podemos concluir que nuestros sensores están perfectamente calibrados.

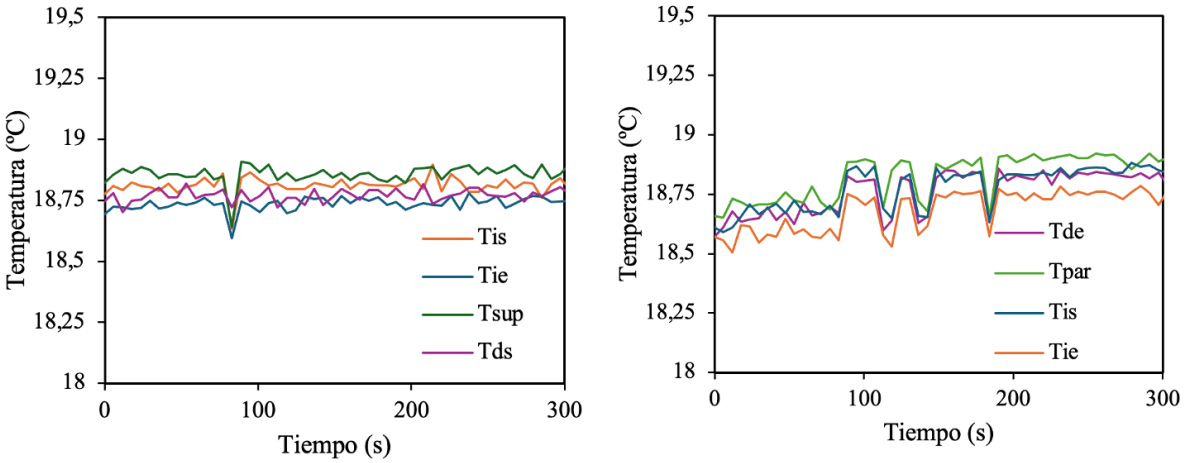


Figura 4-1 Validación de los sensores de temperatura. Fuente propia

4.1.2 Validación de potencias

El propósito de este ensayo es verificar que el circuito funciona correctamente y proporciona una refrigeración adecuada en diferentes niveles de potencia aplicados a través de nuestras placas calefactoras. Después de haber verificado el funcionamiento de los sensores de temperatura, ajustamos el flujo de calor proporcionado por las placas y configuramos el circuito en condiciones de máxima refrigeración, es decir, con el ventilador y el caudal de fluido refrigerante al máximo. Una vez que el circuito alcanza un estado estacionario, tomamos las temperaturas de entrada y salida del intercambiador de calor, así como las temperaturas de entrada y salida del disipador. Conocidas las características del fluido y el caudal, podemos calcular la cantidad de calor absorbido en el intercambiador y cedido en los microcanales del disipador. Teniendo en cuenta la configuración del banco de ensayos, ambas cantidades deben ser aproximadamente iguales.

Para visualizar mejor este intercambio de calor, utilizamos una representación gráfica en la Figura 4-2, donde comparamos el calor absorbido con el calor disipado. Idealmente, tal y como comentamos, se esperaría que el calor absorbido fuera igual al calor disipado ($Q_i = Q_d$), lo que se representaría como una línea diagonal en la gráfica ($y = x$). Sin embargo, en la práctica, esto no es posible y observamos que el calor disipado se desvía como máximo un 20%. De manera intuitiva, podemos deducir que el calor disipado siempre será menor que el calor absorbido, ya que parte de este calor se pierde en el recorrido desde el intercambiador de calor hasta el disipador, donde se transfiere al ambiente.

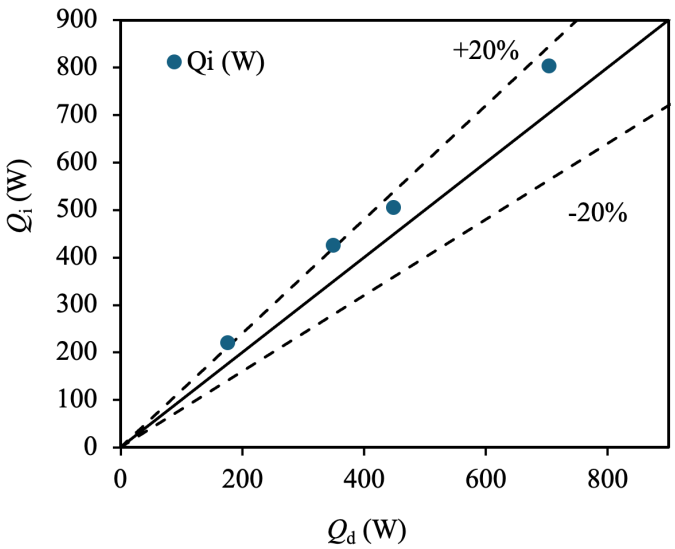


Figura 4-2 Validación de potencias con el calor absorbido y disipado. Fuente propia

4.1.1 Determinación del régimen de flujo

Para determinar los límites de los diferentes regímenes de flujo en los que opera nuestro equipo experimental, se recurrió al diagrama de Moody, una herramienta fundamental en la ingeniería de fluidos:

- Flujo laminar: $Re < 1200$.
- Flujo transitorio: $1200 < Re < 80000$.
- Flujo turbulento: $Re > 80000$.

Es importante destacar que todos los ensayos que realizamos se encuentran en régimen transitorio, como se puede observar en la Figura 4-3. Este dato es básico para el análisis de los resultados obtenidos en el banco de ensayos, ya que la interpretación de los datos y la aplicación de los modelos correspondientes deben realizarse de manera diferente según el régimen de flujo en el que se encuentre el sistema. Por lo tanto, al tener en cuenta el régimen transitorio del flujo, podemos aplicar las metodologías y fórmulas adecuadas para interpretar y analizar de manera precisa los datos recopilados en nuestros ensayos.

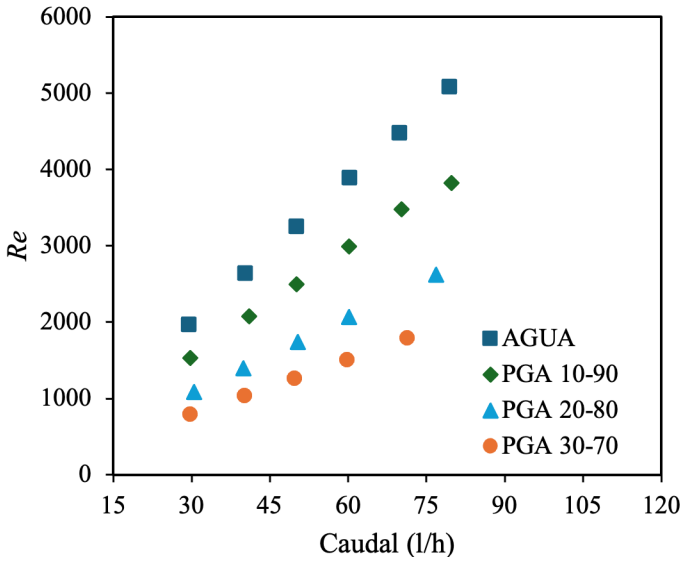


Figura 4-3 Reynolds frente a caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia

4.1.2 Validación de coeficientes de convección

La última de las validaciones tiene como objeto corroborar la consistencia del modelo de cálculo de los coeficientes de convección. Para ello, se realiza una comparativa entre los coeficientes obtenidos experimentalmente y aquellos obtenidos mediante las correlaciones teóricas expuestas en el capítulo anterior.

En la Figura 4-4 vemos una gráfica comparativa de los coeficientes de convección experimentales y teóricos obtenidos usando agua como fluido de trabajo. Se emplearon las correlaciones de Gnielinski y Wu-Little, ambas válidas para flujo transitorio. La línea central negra es la que deberían de seguir idealmente los coeficientes para que $h_{teo} = h_{exp}$, es decir, para una validación perfecta. Como vemos en la figura, los datos experimentales no difieren más de un 20% de los teóricos. Podemos concluir, por lo tanto, que el modelo de obtención de los coeficientes de convección experimentales es adecuado.

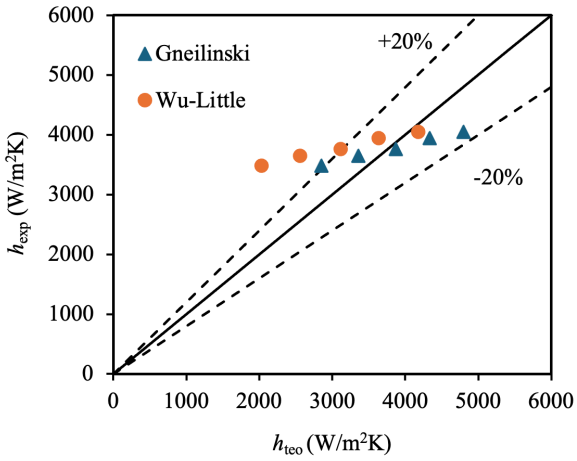


Figura 4-4 Validación de coeficientes de convección experimentales con correlaciones teóricas. Fuente propia

4.2 Análisis de los resultados obtenidos

Los ensayos se realizaron variando el caudal del circuito en un rango desde 10 l/h hasta 80 l/h, lo que permitió obtener más datos sobre el rendimiento de la refrigeración en diferentes condiciones de flujo. Una vez recopilados los datos, procederemos al análisis detallado para determinar el comportamiento térmico de cada fluido y su eficacia en el intercambiador de calor. Posteriormente, compararemos los resultados obtenidos con cada fluido y caudal para identificar tendencias y determinar cuál es la configuración más eficiente en términos de capacidad de refrigeración. Esta información será fundamental para optimizar el diseño y operación del intercambiador de calor en futuras aplicaciones.

4.2.1 Resistencias térmicas

En primer lugar, se analizará la contribución de las diferentes resistencias térmicas a la resistencia térmica total para cada uno de los caudales estudiados. En la Figura 4-5 se representan las resistencias conductiva, convectiva y capacitiva para el agua a diferentes caudales. Se puede observar que, mientras que la resistencia conductiva se mantiene constante con el caudal, las restantes resistencias térmicas disminuyen a medida que aumentamos el caudal, siendo la mayor de todas las resistencias la convectiva, R_c. Estos datos son considerados coherentes ya que el flujo de calor a través de sólidos como el aluminio es muy eficiente y apenas opone resistencia. Sin embargo, cuando hablamos de la resistencia de convección es muy diferente, ya que el movimiento del fluido alrededor del solido limita mucho la transferencia de calor. La resistencia a la convección varía con el caudal, ya que cuando disminuimos la capa límite que se encuentra pegada a las paredes del canal del intercambiador, aumenta la eficiencia de la transferencia de calor.

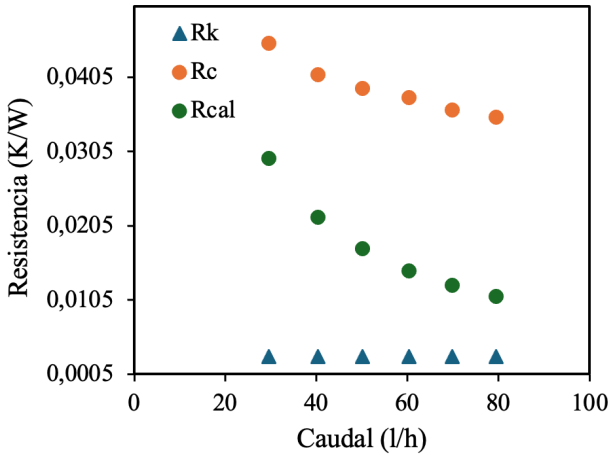


Figura 4-5 Variación de las resistencias térmicas del agua con el caudal. Fuente propia

Al analizar las resistencias, vemos que la R_k es constante debido a que la conductividad térmica del aluminio no sufre una variación significativa con la temperatura, la R_c y la R_{cap} disminuyen con el aumento del caudal ya que, al aumentar el movimiento de las partículas del fluido, el flujo de calor desde la superficie del intercambiador hasta el líquido se mejora. Para el caso del agua, la resistencia convectiva representa el 65% de la resistencia total, la resistencia capacitiva el 28% y la resistencia conductiva el 7%. Conocidos estos datos, podemos afirmar que la resistencia de convección es la resistencia controlante, y que una variación de esta es la que influirá notablemente en la capacidad de refrigeración del circuito.

Para comparar los demás fluidos con el agua, vemos en la
Figura 4-6 la dependencia de la resistencia térmica frente al caudal con todos los fluidos estudiados. Como apreciamos en el gráfico, el agua ofrece una menor resistencia térmica total de entre todos los fluidos, seguida por las mezclas propilenglicol agua en orden ascendente de concentración. La resistencia capacitiva es prácticamente la misma en los diferentes refrigerantes y la resistencia conductiva es la misma para todos los fluidos debido a que la conductividad térmica del aluminio varía de forma despreciable en el intervalo de temperaturas a las que opera el banco de ensayos y, por ende, la resistencia también. Como se mencionó anteriormente y volvemos a resaltar, la resistencia convectiva es la resistencia controlante que nos permite obtener un valor fiable del coeficiente de convección de cualquier fluido. Observando la figura podemos deducir que los coeficientes de convección más elevados serán los del agua, ya que la resistencia térmica total es menor.

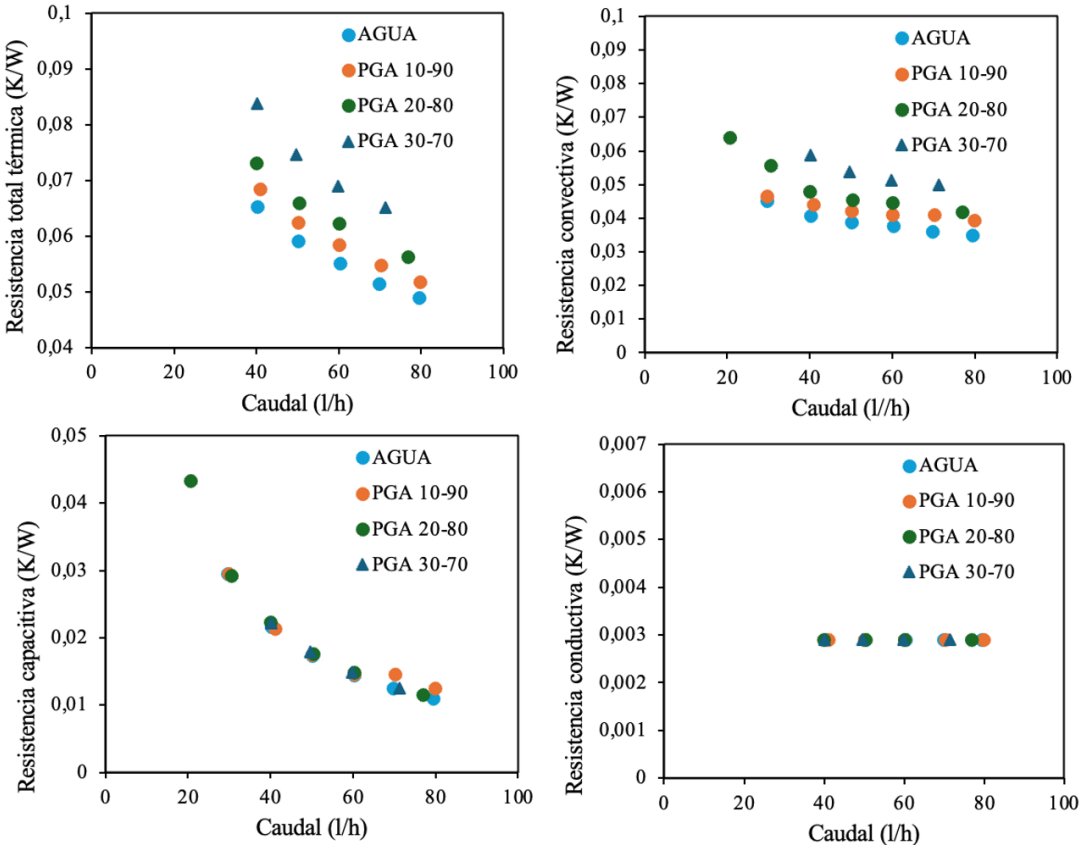


Figura 4-6 Resistencias térmicas total (arriba izquierda), convectiva (arriba derecha), capacitiva (abajo izquierda) y conductiva (abajo derecha) frente al caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia

4.2.2 Coeficientes de convección

Uno de los aspectos importantes para evaluar la eficiencia de un fluido como refrigerante es su coeficiente de convección, el cual nos proporciona información sobre su capacidad para disipar el calor. Al analizar los resultados de nuestros ensayos experimentales, observamos en la Figura 4-7 una relación entre el coeficiente de convección y el caudal que revela detalles sobre el comportamiento de los diferentes líquidos refrigerantes.

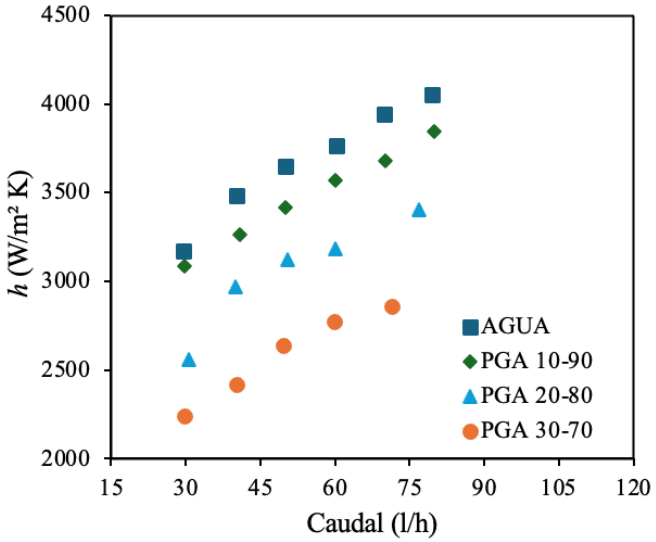


Figura 4-7 Coeficiente de convección frente a caudal para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia

El coeficiente de convección aumenta conforme el caudal es mayor para todos los fluidos. Además, se demuestra una relación entre el porcentaje de propilenglicol y el coeficiente de convección: en términos generales, a mayor contenido de propilenglicol, menor es su capacidad de disipar el calor. Los coeficientes de convección de las mezclas propilenglicol-agua 10-90%, 20-80% y 30-70% disminuyen de media un 6%, 18% y 33% respecto a los del agua, respectivamente. Es decir, el coeficiente de convección disminuye a medida que se incrementa la concentración de propilenglicol en el fluido refrigerante, siendo esta reducción atribuible a la disminución del número de Reynolds conseguido para el mismo caudal, fruto de una mayor densidad y viscosidad. A pesar de mantener un caudal constante, la viscosidad superior del propilenglicol impide una agitación eficiente de las partículas del fluido, lo que resulta en una transferencia de calor por convección menos efectiva en comparación con el agua.

4.2.3 Análisis de números adimensionales

Como se indicó en el capítulo anterior, el uso de números adimensionales permite comparar los resultados obtenidos en este trabajo con otros sistemas de transferencia de calor por convección. En la Figura 4-8 se representan el número de Nusselt en función del número de Reynolds para los cuatro fluidos estudiados. El número de Nusselt aumenta a medida que aumenta el número de Reynolds independientemente del líquido considerado. Además, se observa en la Figura 4-8 una tendencia de aumento de la pendiente de la relación *Nu-Re* cuanto mayor es la concentración de propilenglicol.

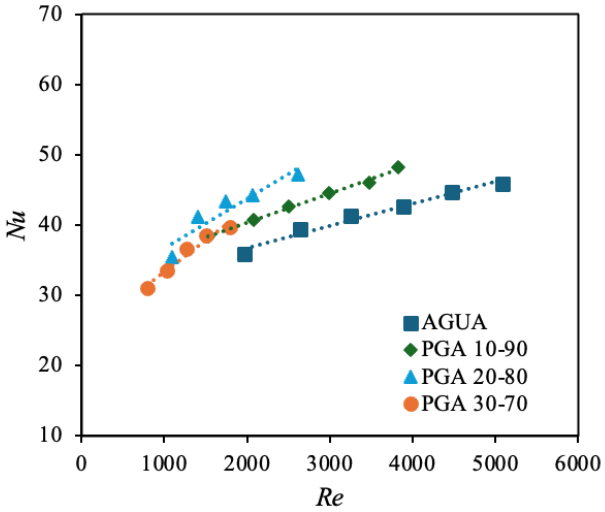


Figura 4-8 Nusselt frente a Reynolds para los cuatro fluidos estudiados. Fuente propia

Los ensayos realizados mostraron que, debido a la mayor viscosidad del propilenglicol, es difícil lograr un flujo con un número de Reynolds tan elevado como el del agua en las mezclas analizadas. Por lo tanto, el agua presenta números de Reynolds más altos, seguido por las mezclas cada vez más concentradas en propilenglicol.

El número de Nusselt es una medida importante que indica la eficiencia de transferencia de calor por convección respecto a transferencia por conducción en el sistema. Al aumentar el número de Reynolds, se produce una agitación mayor de las partículas que afecta en la eliminación de la capa límite presente en el intercambiador. La capa límite es una región del fluido que está en contacto directo con la superficie del intercambiador y donde la velocidad del fluido es prácticamente nula. Esta situación limita significativamente la transferencia de calor, además de aumentar la transferencia de calor por conducción en detrimento de la convección, debido a números de Nusselt menores. Esta situación ocurre para las mezclas de propilenglicol y agua, viéndose acrecentado tal efecto con el aumento de la concentración de propilenglicol. En cambio, al eliminar la capa límite, se promueve una mayor transferencia de calor por convección, ya que se facilita el movimiento del fluido a lo largo de la superficie del intercambiador, esto se refleja en un aumento en el número de Nusselt, como ocurre en el caso del agua.

4.2.4 Correlación de datos experimentales

Una vez analizados los resultados presentados en este capítulo, se puede inferir la existencia de una relación $Nu = Nu(Re, Pr, \phi)$. Por lo tanto, los datos experimentales de Nusselt frente a Reynolds se han correlacionado con una relación funcional como la que se indica a continuación:

$$Nu = aRe^{b}Pr^{c}(1-\phi)^{d}$$

donde *a*, *b*, *c* y *d* son coeficientes, los cuales fueron ajustados mediante regresión usando el método de mínimos cuadrados, obteniendo finalmente la siguiente expresión:

$$Nu = 1{,}163Re^{0{,}27}Pr^{0{,}33}(1-\phi)^{2{,}25}$$

Cuyos límites de validez son:

- $800 \leq Re \leq 5000$
- $5 \leq Pr \leq 16$
- $0\% \leq \phi \leq 30\%$

Esta correlación tiene una desviación absoluta máxima de 4,05 y una desviación relativa media de 3,6%. Asimismo, se comprobó que la desviación máxima es de un 10%, como se puede observar en la Figura 4-9. Por lo tanto, se puede considerar una correlación adecuada para la obtención de coeficientes de convección en intercambiadores de microcanales de sección circular, empleando mezclas de propilenglicol y agua como fluido refrigerante.

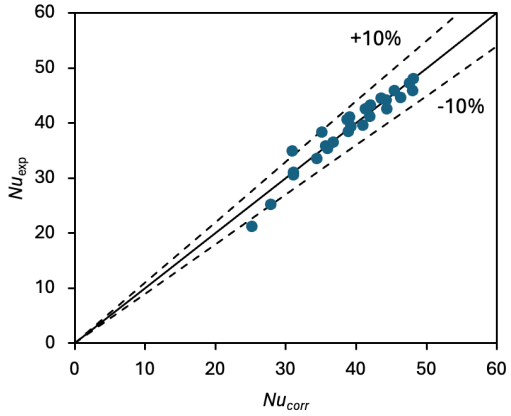


Figura 4-9 Correlación Nusselt experimental frente a Nusselt de correlación. Fuente propia

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Se ha desarrollado un banco de ensayos totalmente funcional en el cual podemos obtener los parámetros característicos de los fluidos refrigerante en vista a compararlos entre ellos. Así, podemos afirmar que hemos cumplido todos los objetivos de manera positiva, obteniendo datos coherentes con una precisión muy buena.

La validación y puesta a punto antes de los ensayos fue algo de rigurosa importancia para saber si los sensores que se utilizaron fueron calibrados correctamente. La validación de temperaturas, potencias y coeficientes de convección nos proporcionaron unos datos aptos para comenzar con los ensayos.

Se realizaron con éxito ensayos con cuatro fluidos diferentes, agua y mezclas de propilenglicol y agua, pudiendo así analizar diferentes características y compararlas entre fluidos. Gracias a la variedad de refrigerantes utilizados se pudo hacer una comparación rigurosa de cómo se elimina el flujo calorífico a la vez que varía la densidad, viscosidad y la conductividad térmica entre otros. Además, gracias a la incorporación de una llave de paso para variar el caudal y un disipador térmico de microcanales con potenciómetro, con cada fluido se pudieron realizar ensayos en condiciones diferentes, dándonos así una amplia variedad de análisis que realizar.

Se obtuvieron coeficientes de convección para los cuatro fluidos analizados, pudiendo establecer que, a mayor concentración de propilenglicol, menor es el coeficiente de convección obtenido. De esta forma los coeficientes de convección de la mezcla propilenglicol-agua 30-70% disminuyen hasta un 33% respecto a los del agua. Asimismo, a partir del análisis adimensional del sistema, mediante la comparativa de Nusselt frente a Reynolds, se observó una tendencia en el comportamiento de las mezclas de propilenglicol en agua. Esta tendencia consiste en que, a mayor concentración de propilenglicol, mayor pendiente tiene la relación *Nu-Re*. El análisis adimensional nos permitió crear una correlación en base a los números de Nusselt que obtuvimos con el banco de ensayos en función de los números de Reynolds y Prandtl y de la concentración de propilenglicol, con una desviación media de un 3,6%. Por lo tanto, esta correlación propuesta se considera adecuada para su uso en el análisis de la transferencia de calor por convección en intercambiadores de microcanales de sección circular, muy habituales en los sistemas de refrigeración líquida de microprocesadores.

5.2 Líneas futuras

Para futuros experimentos, la posibilidad de usar diferentes fluidos en el banco de ensayos abre un abanico de oportunidades para mejorar la refrigeración. La Tabla 2-2 proporciona una guía para seleccionar los mejores fluidos según nuestras necesidades y requisitos específicos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada refrigerante tiene sus propias ventajas y desventajas, por lo que se

debe realizar un análisis exhaustivo antes de tomar una decisión. Aspectos como la conductividad térmica, la viscosidad y la densidad del refrigerante deben ser considerados cuidadosamente, así como su compatibilidad con los componentes del circuito. Es posible que sea necesario realizar ajustes en la potencia de la bomba, evaluar la eficiencia del flujo a través del intercambiador de calor para garantizar el funcionamiento deseado o comprobar que el fluido fluye correctamente por los microcanales del disipador. En definitiva, experimentar con diferentes fluidos requiere un enfoque meticuloso y bien planificado para asegurar que el circuito funcione de manera eficiente y para obtener datos precisos y coherentes que impulsen la mejora continua del sistema de refrigeración.

Otra alternativa para optimizar el circuito es realizar un estudio del intercambiador de calor. Como bien sabemos, la geometría tanto interna como externa juegan un papel relevante en el intercambio de calor entre el microprocesador y el líquido refrigerante, tanto es así, que existe una gran variedad de intercambiadores. Se pueden aplicar múltiples distribuciones intercambiador de calor-microprocesador, podemos usar dos intercambiadores en serie, uno debajo del microprocesador y otro encima. Otra opción, un intercambiador de calor que rodee al microprocesador por completo, como si de una caja se tratase. Son muchas las modificaciones y alternativas para la elección del intercambiador de calor ya que es campo de la ingeniería térmica muy desarrollado.

Sin embargo, siempre debemos tener en mente cuáles son las limitaciones de la industrial a la hora de mecanizar piezas, ya que no todo es posible. Si consideramos geometrías complejas para el intercambiador de calor, una alternativa innovadora y que está desarrollándose rápidamente es la impresión 3D, la cual nos brinda la oportunidad de reproducir casi cualquier geometría que pudiésemos diseñar de una manera rápida y sencilla, sin olvidarnos del bajo coste que supondría en comparación con un intercambiador de metal convencional. Estas impresiones se podrían realizar a través de software como el Ultimaker Cura, ampliamente utilizado En la Figura 5-1 se muestra un intercambiador de calor diseñado e impreso en el Trabajo Fin de Grado para futuras investigaciones. Tener una réplica en exacta en formato digital nos facilita hacer múltiples ensayos numéricos como puede ser un análisis de fluidos en el programa ANSYS o realizar impresiones 3D a través de software como el Ultimaker Cura, como hemos mencionado. El interés en el intercambiador de calor y las posibles mejoras que se pueden implementar fue tan alto que en la vemos como procedimos a crear una réplica física utilizando una impresora 3D de resina. Además de poder estudiar diferentes alternativas de intercambiador de calor con este modelo de resina, en caso de tener un accidente y tener que cambiar el intercambiador, se tendría disponible en menos de 12 horas gracias a la impresión 3D. Por último, mencionar los materiales para la fabricación, nuestro intercambiador de aluminio podría ser reemplazado por otros materiales que favoreciesen la convección del flujo de calor y probarlos con las modificaciones ya mencionadas.

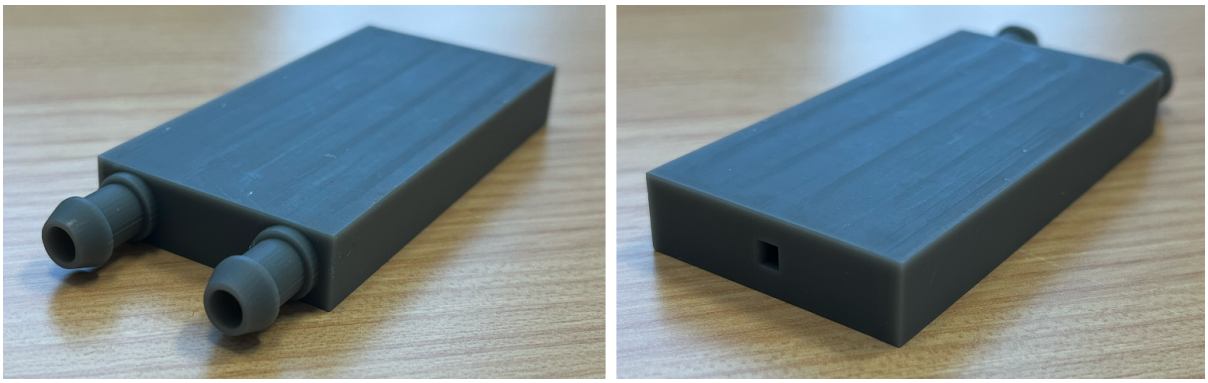


Figura 5-1 Intercambiador de calor de resina. Fuente propia.

Un parámetro que debemos inspeccionar con cautela es el caudal. El caudal, al igual que múltiples otros elementos es fundamental a la hora de intercambiar calor, no hablamos ya de la presión o el tipo de fluido que trabaja en nuestro circuito, sino del régimen en el que se dispone. El número de Reynols

se tiene muy en cuenta a la hora diseñar objetos que entren en contacto con fluidos. Con una buena estimación de este seremos capaces de saber la eficacia con la que el refrigerante fluye por el circuito y su resistencia para fluir. Teniendo esto presente, gracias a la llave de paso que tenemos en nuestro circuito para variar el caudal probaremos diferentes disposiciones, laminar con un flujo de agua mínimo y turbulento con el caudal a máxima capacidad. Hace más de un siglo que este término se conoce y ensaya con él, concluyendo en la mayoría de los experimentos en que el flujo turbulento es el más apropiado para la transferencia de calor debido a que promueve una mezcla y agitación del fluido lo que aumenta la velocidad de transferencia del flujo calorífico [29].

La propuesta más ambiciosa para mejorar nuestro sistema de refrigeración es adoptar la tecnología de refrigeración de inmersión en dos fases, una opción que está ganando popularidad rápidamente. Este método implica sumergir tanto el microprocesador como los componentes generadores de calor en una solución acuosa dieléctrica. Esta solución no solo debe ser dieléctrica para prevenir daños en caso de fugas, sino también anticorrosiva para proteger los componentes. Además, dado que el crecimiento de algas en el tanque refrigerante puede ser un problema, el líquido refrigerante también debe tener propiedades antibacterianas. Los refrigerantes más utilizados, como el 3M Novec, suelen ser compuestos orgánicos con un punto de ebullición muy bajo, alrededor de 60 ºC. En este proceso, el calor generado por el microprocesador y otros componentes hace que el líquido se evapore y luego se condense nuevamente en la parte superior, donde se encuentra el condensador, para volver a estado líquido. Todo este ciclo ocurre dentro de una cámara sellada para evitar pérdidas de refrigerante no deseadas, lo que convierte al sistema en un circuito cerrado. Antes de sumergir los componentes en el líquido, es crucial sellarlos correctamente para evitar cualquier contacto con el compuesto orgánico.

A pesar de los desafíos y las complejidades asociadas con la refrigeración en inmersión de doble fase, las ventajas y el progreso potencial que esta tecnología ofrece son innegables. La capacidad para manejar grandes cantidades de calor de manera eficiente y segura es una perspectiva muy llamativa, especialmente en el ámbito de los centros de datos y la computación de alto rendimiento. Apostar por esta tecnología en el futuro conduciría a avances significativos en términos de eficiencia energética, rendimiento y fiabilidad de los sistemas informáticos y electrónicos. Es por todo esto que consideramos que sería la línea futura más interesante, pero a la vez notablemente más compleja que las demás.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] T. Haigh, P. M. Priestley, y C. Rope, *ENIAC in action: Making and remaking the modern computer*. MIT press, 2016.

[2] W. A. Lea, M. F. Medress, y T. E. Skinner, «UNIVAC», 1972.

[3] M. V. Cortés, «Costo energético de la revolución informática», *Revista de libros*, n.º 65, pp. 30-31, 2002.

[4] «Intel celebra el 50º aniversario del Intel 4004». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.intel.la/content/www/xl/es/newsroom/news/intel-marks-50th-anniversary-4004.html

[5] «Apple presenta el M3, el M3 Pro y el M3 Max, los chips más avanzados para un ordenador personal - Apple (ES)». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.apple.com/es/newsroom/2023/10/apple-unveils-m3-m3-pro-and-m3-max-the-most-advanced-chips-for-a-personal-computer/#

[6] K. Kant, *Microprocessors and Microcontrollers: Architecture, Programming and System Design 8085, 8086, 8051, 8096*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.

[7] D. Bhandarkar y J. Ding, «Performance characterization of the Pentium Pro processor», presentado en Proceedings Third International Symposium on High-Performance Computer Architecture, IEEE, 1997, pp. 288-297.

[8] R. Pfahl y J. McElroy, «The 2004 international electronics manufacturing initiative (iNEMI) technology roadmaps», presentado en 2005 Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, IEEE, 2005, pp. 1-7.

[9] «NVIDIA DGX GH200 Technical White Paper», NVIDIA. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://resources.nvidia.com/en-us-dgx-gh200/technical-white-paper

[10] «EPYC Serie 9004 y 8004 de cuarta generación», AMD. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.amd.com/es/products/processors/server/epyc/4th-generation-9004-and-8004-series.html

[11] D. Burg y J. H. Ausubel, «Moore's Law revisited through Intel chip density», *PloS one*, vol. 16, n.º 8, p. e0256245, 2021.

[12] S. S. Murshed y C. N. De Castro, «A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 821-833, 2017.

[13] J. A. Chapman, «Microchip Analysis of Temperature and Humidity's Effect on the Performance of Supply Voltage and Age», 2022.

[14] R. C. Chu, R. E. Simons, M. J. Ellsworth, R. R. Schmidt, y V. Cozzolino, «Review of cooling technologies for computer products», *IEEE Transactions on Device and materials Reliability*, vol. 4, n.º 4, pp. 568-585, 2004.

[15] S. Naffziger *et al.*, «Pioneering chiplet technology and design for the amd epyc™ and ryzen™ processor families: Industrial product», presentado en 2021 ACM/IEEE 48th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), IEEE, 2021, pp. 57-70.

[16] N. Darwish, S. Al-Hashimi, y A. Al-Mansoori, «Performance analysis and evaluation of a commercial absorption–refrigeration water–ammonia (ARWA) system», *International Journal of refrigeration*, vol. 31, n.º 7, pp. 1214-1223, 2008.

[17] H. Yue, Y. Zhao, X. Ma, y J. Gong, «Ethylene glycol: properties, synthesis, and applications», *Chemical Society Reviews*, vol. 41, n.º 11, pp. 4218-4244, 2012.

[18] E. P. Bandarra Filho, L. Cheng, y J. R. Thome, «Flow boiling characteristics and flow pattern visualization of refrigerant/lubricant oil mixtures», *International journal of refrigeration*, vol. 32, n.º 2, pp. 185-202, 2009.

[19] M. T. Kelley, T. T. Do, y M. Baldea, «Evaluating the demand response potential of ammonia plants», *AIChE Journal*, vol. 68, n.º 3, p. e17552, 2022.

[20] S. W. Churchill y S. C. Zajic, «Prediction of fully developed turbulent convection with minimal explicit empiricism», *AIChE journal*, vol. 48, n.º 5, pp. 927-940, 2002.

[21] P. Konakov, «A new correlation for the friction coefficient in smooth tubes», *Berichte der Akademie der Wissenschaften der UDSSR*, vol. 51, p. 51, 1946.

[22] R. Gregorig, «The effect of a nonlinear temperature dependent Prandtl-number on heat transfer of fully developed flow of liquids in a straight tube», *Wärme-und Stoffübertragung*, vol. 9, n.º 2, pp. 61-72, 1976.

[23] V. Gnielinski, «New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow», *International chemical engineering*, vol. 16, n.º 2, pp. 359-367, 1976.

[24] P. Wu y W. Little, «Measurement of the heat transfer characteristics of gas flow in fine channel heat exchangers used for microminiature refrigerators», *Cryogenics*, vol. 24, n.º 8, pp. 415-420, 1984.

[25] T. Adams, M. Dowling, S. Abdel-Khalik, y S. Jeter, «Applicability of traditional turbulent single-phase forced convection correlations to non-circular microchannels», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, n.º 23, pp. 4411-4415, 1999.

[26] D. Yu, «An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes», presentado en ASME/JSME Thermal Engineering Conference, 1995, pp. 523-530.

[27] E. W. Lemmon, M. L. Huber, y M. O. McLinden, «REFPROP: Reference fluid thermodynamic and transport properties», *NIST standard reference database*, vol. 23, n.º 8.0, 2007.

[28] Å. Melinder, *Properties of Secondary Work Fluids*/for Indirect Systems:*/Secondary Refrigerants Or*

Coolants, Heat Transfer Fluids. International Institute of refrigeration, 2010.

[29] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, y A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, vol. 6. Wiley New York, 1996.

[30] «Alemania abraza con fuerza la quema de carbón y Europa asume dos años más de uso intensivo». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.eleconomista.es/energia/noticias/12144529/02/23/Alemania-abraza-con-fuerza-la-quema-de-carbon-y-Europa-asume-dos-anos-mas-de-uso-intensivo-.html

[31] «Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/registro-huella.html

[32] P. de Kioto, «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático», *Kioto, Japón*, 1998.

[33] «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC». Accedido: 25 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

[34] «Catalysing Ocean Finance», UNDP. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.undp.org/publications/catalysing-ocean-finance

[35] M. Moran, «Océanos», Desarrollo Sostenible. Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/

ANEXO I: IMPLICACIONES AMBIENTALES Y ECONÓMICAS

La crisis de combustibles fósiles, gas y electricidad, se ha convertido en una de las principales preocupaciones a nivel mundial, la creciente conciencia ambiental ha impulsado la necesidad de reducir la dependencia de estos combustibles, lo que ha llevado a un uso exponencial de la electricidad. Sin embargo, en situaciones como la reciente ocurrida en Alemania, donde el suministro de gas se vio interrumpido debido a tensiones geopolíticas por la guerra en Ucrania, se recurrió al uso de carbón para generar electricidad, alcanzando hasta 146 GW de capacidad [30]. Esta electricidad se utiliza para alimentar, entre otras cosas, vehículos con motores eléctricos y otra maquinaria que antes funcionaba con motores de combustión, lo cual resulta contraproducente. Es importante tener en cuenta que la quema de 1kg de carbón emite aproximadamente 2,8 kg de CO_2 a la atmósfera, estos gases representan un obstáculo significativo en la lucha contra el cambio climático y el control de las emisiones. Por lo tanto, resulta evidente que se necesita adoptar medidas más efectivas y sostenibles para abordar la crisis energética y ambiental actual.

Dentro de esta crisis energética podemos incluir el consumo de energía que conlleva la fabricación y utilización de microprocesadores de gama alta. Como hemos mencionado previamente en la Introducción del estado del arte un único microprocesador puede consumir hasta 1 kW, acercándose o superando incluso a muchos de los electrodomésticos de los que disponemos en casa. Teniendo en cuenta que un solo superordenador como el NVIDIA DGX GH200 contiene 256 microprocesadores Grace Hopper de 500 W, nos enfrentamos a un consumo de 128 kW por superordenador. Este consumo es equivalente al consumo de 17 domicilios españoles en un día según el Ministerio para la transición ecológica [31].

En la actualidad, existe una notable concienciación en la población respecto al cambio climático y la contaminación, atribuible en gran medida al incremento sin precedentes en los niveles de sustancias como el dióxido de carbono (CO_2) durante la década de los 2000. Como respuesta a situaciones como esta, surgieron iniciativas significativas, entre las cuales destaca el Protocolo de Kioto. El Protocolo de Kioto, junto con otros acuerdos similares, representa un compromiso internacional mediante el cual los países se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el óxido nitroso (N_2O) [32]. Estas emisiones son responsables del incremento generalizado de la temperatura media en la superficie terrestre Figura AI-1. Los efectos observados, como el deshielo de los polos, el aumento de la acidez en los océanos, la disminución en los periodos de retorno de fenómenos extremos, el incremento de la temperatura media global y los cambios en la biodiversidad, son evidencias de la influencia de la actividad industrial humana en el medio ambiente. El crecimiento exponencial de la tecnología y el nivel de vida ha contribuido de manera significativa al calentamiento global al que enfrentamos en la actualidad y que es un problema al que se debe hacer frente.

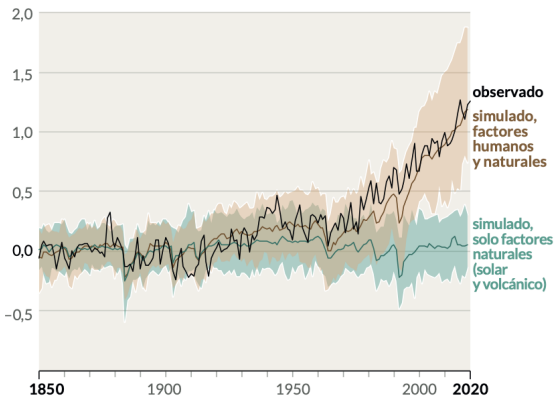


Figura AI-1 Cambio en la temperatura global media [33].

A continuación, vemos una representación gráfica Figura AI-2 del cambio en la temperatura global en la superficie y los posibles futuros de temperaturas medias, en comparación con el período de 1850-1900. Es importante destacar que en menos de una década existe la posibilidad de que se produzca un aumento medio de 5 ºC, lo que constituiría un cambio significativo en las condiciones de vida tanto para los seres humanos como para la fauna y la flora. En este escenario, la Tierra se encontraría en un punto crítico del cual sería difícil retornar, ya que se experimentarían condiciones climáticas extremas y fenómenos meteorológicos cada vez más intensos y frecuentes, lo que haría que la habitabilidad se dificultase con creces.

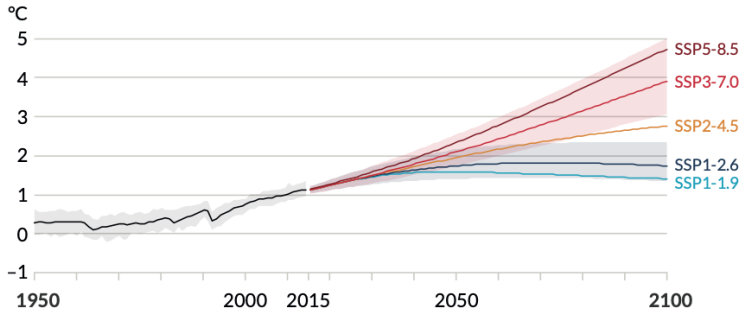


Figura AI-2 Cambio de temperatura respecto a período 1850-1900 [33].

Conforme a los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), si continuamos en la trayectoria socioeconómica conocida como SSP5, caracterizada por un desarrollo impulsado principalmente por combustibles fósiles; la actividad humana podría desembocar en la desaparición del hielo en los polos antes del año 2060. Esta proyección refleja la política actual adoptada por muchos países, la cual se fundamenta en mercados competitivos que fomentan el progreso tecnológico. En el SSP5 se complementan inversiones considerables en áreas como salud, educación e instituciones destinadas a mejorar la calidad de vida y la sociedad en general. No obstante, estas inversiones van de la mano de un elevado consumo de combustibles fósiles y un estilo de vida que depende en gran medida de los recursos naturales provenientes de los mismos. Este escenario global conlleva a un crecimiento poblacional y económico exponencial, lo que incrementa la presión sobre el medio ambiente y agudiza los efectos del cambio climático.

El PH de nuestros océano es un factor muy importante para considerar, cuando desciende por debajo de 7 se considera que el medio se vuelve ácido, un fenómeno que ocurre como resultado de la absorción de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Si esta absorción de CO_2 no tuviera lugar, según datos proporcionados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la cantidad disuelta de CO_2 en la atmósfera aumentaría en un 30% [34], empeorando aún más la situación atmosférica. Las consecuencias de la quema de combustibles fósiles al ritmo actual podrían desencadenar problemas de gran magnitud como la disminución en la concentración de iones de carbonato, un elemento crucial para la formación de esqueletos y conchas en organismos marinos. Además, los corales que son altamente sensibles a la acidificación del agua se verían gravemente afectados, poniendo en riesgo la biodiversidad marina. Este deterioro tendría un impacto directo en la vida humana, ya que la disminución de especies marinas llevaría a una escasez en la pesca [35].

En resumen, la refrigeración de microprocesadores para el avance sin límites de la tecnología podría llevar a la población a un consumo de energía mucho mayor al estimado y al que no se podría hacer frente, desencadenando un cambio en el clima del planeta de forma irreversible para los próximos siglos.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Existen numerosas formas de refrigeración que son más eficaces que las que se estudian y analizan hoy en día, como el uso de refrigerantes de hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Sin embargo, la sociedad y la comunidad científica tiene una responsabilidad social y moral de mejorar siendo respetosos con el medio ambiente y la salud de las personas, de tal manera que se progrese de una manera ética y respetuosa con el medio, las personas y animales. Es importante el compromiso social por parte de todos, además de cumplir los acuerdos internacionales a la hora de la fabricación y no usar componentes o materiales prohibidos por tal de aumentar la eficiencia y ahorrar en costes.

El desarrollo sostenible nos beneficiará de tal manera que podamos construir dispositivos electrónicos con recursos abundantes y no dañinos a la vida, que tengan una vida más longeva que los actuales, afianzando así un decrecimiento en el consumismo innecesario. Al actuar de una manera responsable también aseguramos el uso seguro de la nueva tecnología por parte de los usuarios.

En mi opinión, tanto en educación, investigación como en fabricación la sociedad esta concienciada y se están siguiendo los pasos correctos para mejorar nuestra calidad de vida a la vez que avanzamos tecnológicamente y facilitamos la vida de las personas. De seguir este modelo de vida, la sociedad y el planeta se verá sorprendido positivamente en las próximas décadas.

ANEXO III: PRESUPUESTO

El presupuesto que obtuvimos para nuestro proyecto fue adecuado basándonos en la cantidad de resultados y conclusiones que pudimos analizar. La balanza es favorable en la relación aprendizaje/ precio. El precio por elementos materiales fue el de la Tabla AIII-1.

Material	Coste €/Unidad	N.º unidades	Precio
Analizador de redes Display	212,16 €	1	212,16 €
200m de cable	28,30 €	1	28,30 €
Abrazaderas	0,05 €	20	1,00 €
Arandelas	0,05 €	30	1,50 €
Armario de electrónica	82,48 €	1	82,48 €
Bomba hidráulica	5,63 €	2	11,26 €
Bridas	0,02 €	50	1,00 €
Cable convertidor FTDI	37,50 €	1	37,50 €
Carril DIN	17,52 €	1	17,52 €
Caudalímetro	624,49 €	1	624,49 €
Cinta armaflex 50m	9,42 €	1	9,42 €
Conversor	13,15 €	6	78,90 €
Depósito	4,73 €	1	4,73 €
Disipador	28,72 €	1	28,72 €
Filtro 2A	21,45 €	1	21,45 €
Fuente de alimentación CEBEK	41,90 €	1	41,90 €
Funda termoretractil	0,49 €	1	0,49 €
Intercambiador de calor	4,90 €	1	4,90 €
Pasta térmica	4,90 €	1	4,90 €
Placas calefactoras	2,35 €	2	4,70 €
Regulador CEBEK	61,03 €	1	61,03 €
Regulador de potencia 250W	11,41 €	1	11,41 €
Resistencia 499 ohmios	0,06 €	10	0,60 €
Sensores de temperatura pt100	4,86 €	10	48,60 €
Tarjeta de adquisición	782,20 €	1	782,20 €
Tornillos	0,05 €	30	1,50 €
Tubería de cobre	16,70 €	1	16,70 €
Tubería de plástico	13,62 €	1	13,62 €
Tuercas	0,05 €	30	1,50 €

Ventiladores y potenciómetro	28,77 €	1	28,77 €
TOTAL			2.183,25 €

Tabla AIII-1 Presupuesto de material. Fuente propia