



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis energético del funcionamiento del sistema de absorción
utilizado en frigoríficos de pequeña capacidad*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Eduardo Isidro Martínez Boado

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes
Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis energético del funcionamiento del sistema de absorción
utilizado en frigoríficos de pequeña capacidad*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente trabajo analiza los sistemas de refrigeración por absorción como alternativa eficiente y sostenible frente a los sistemas de compresión de vapor. Tras una revisión bibliográfica detallada, se estudian los fundamentos termodinámicos, la evolución histórica de la refrigeración y las principales diferencias entre los sistemas de compresión y absorción, con especial énfasis en los ciclos de difusión-absorción. La parte experimental se centra en el análisis energético de dos frigoríficos de pequeña capacidad, modelos “Electrolux” y “ananké”, ambos basados en esta variante de la absorción convencional que emplea amoníaco-agua para su ciclo de refrigeración y presentan diferencias de diseño claves para entender sus principios de funcionamiento. Se han evaluado parámetros esenciales como el coeficiente de rendimiento, la capacidad frigorífica o la capacidad de aislamiento bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados confirman la viabilidad del uso de estos sistemas en aplicaciones específicas, destacando su simplicidad, bajo nivel de ruido y capacidad de operar con calor como fuente de alimentación. Como líneas futuras, se propone optimizar el diseño de componentes y explorar el uso de fuentes de energía renovables, fomentando así un mayor desarrollo de esta tecnología en entornos donde el uso de electricidad es limitado.

PALABRAS CLAVE

sistemas de refrigeración, absorción, compresión de vapor, difusión-absorción, amoníaco-agua

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores, D. Antón Cacabelos Reyes y D. Arturo González Gil, por su dedicación, orientación y compromiso durante la realización de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos, por guiarme con acierto y por transmitirme el interés por esta materia.

A toda mi familia, por su constante apoyo, comprensión y cariño incondicional durante todos estos años. Gracias por estar siempre ahí, animándome incluso en los momentos más complicados y por confiar en mí.

A Marichu, por su paciencia, motivación y por acompañarme de cerca a lo largo de este camino. Su apoyo emocional y su aliento han sido fundamentales para mantenerme firme y seguir adelante.

Por último, quiero dar las gracias a la promoción 425-155 por haber sido una segunda familia y por haber hecho posible que todos hayamos llegado a donde estamos hoy.

A todos, muchas gracias.

Contenido

Contenido	vi
Índice de Figuras	1
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción.....	6
1.1 Contexto	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura del Trabajo	7
2 Estado del arte	9
2.1 Generalidades.....	9
2.1.1 Origen y evolución histórica de los sistemas de refrigeración	9
2.1.2 Fundamentos Termodinámicos.....	11
2.2 Sistemas de Refrigeración por compresión de vapor.....	15
2.2.1 Principios de funcionamiento	15
2.2.2 Refrigerantes empleados.....	17
2.2.2.1 Tipología de líquidos refrigerantes	17
2.3 Sistemas de refrigeración por absorción	19
2.3.1 Principios de Funcionamiento	19
2.3.2 Pares de trabajo.....	20
2.3.3 Variantes del sistema de refrigeración por absorción.....	22
2.4 Sistemas de Difusión-Absorción.....	24
2.4.1 Principios de funcionamiento	24
2.4.1.1 Componentes del sistema y análisis de las diferentes fases.....	26
3 Metodología.....	33
3.1 Diseño Experimental.....	33
3.1.1 Objetivos del estudio	33
3.1.2 Material empleado	33
3.2 Descripción de los equipos frigoríficos	34
3.2.1 Frigorífico “Electrolux”	34
3.2.2 Frigorífico “ananké”	38
3.3 Análisis y evaluación del rendimiento	41
3.3.1 Objetivos específicos	41
3.3.2 Rendimiento en vacío	42
3.3.3 Rendimiento enfriando 1 litro de agua	43
3.3.4 Rendimiento enfriando 2 litros de agua.....	44
3.4 Análisis del flujo de calor	45

3.4.1 Objetivos específicos	45
3.4.2 Desarrollo del experimento.....	45
3.5 Evolución de las temperaturas del ciclo.....	46
3.5.1 Objetivos específicos	46
3.5.2 Desarrollo del experimento.....	46
3.6 Análisis específico del refrigerador “Electrolux”	47
3.6.1 Objetivos específicos	47
3.6.2 Desarrollo	47
4 Resultados	50
4.1 Análisis y evaluación del rendimiento	50
4.1.1 Rendimiento en vacío	50
4.1.2 Rendimiento enfriando 1 Litro de agua	57
4.1.3 Rendimiento enfriando 2 Litros de agua	60
4.2 Análisis del flujo de calor	63
4.3 Evolución de las temperaturas del ciclo.....	65
4.4 Análisis específico del refrigerador “Electrolux”	67
4.4.1 Capacidad de enfriamiento	67
4.4.2 Empleo de placas de aluminio	68
4.4.3 Hipótesis y razonamiento sobre los posibles fallos del ciclo.	69
5 Conclusiones y líneas futuras	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Líneas futuras	72
6 Bibliografía.....	73
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	77
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 William Cullen [1].....	9
Figura 2-2 Jacob Perkins [5]	10
Figura 2-3 “El invento de Carré” [6].....	11
Figura 2-4 Esquema de una maquina térmica [7].....	12
Figura 2-5 Ciclo de Carnot Inverso [9]	13
Figura 2-6 Aire acondicionado de una aeronave [10]	14
Figura 2-7 Ciclo de compresión de vapor [12].....	16
Figura 2-8 Evolución de los refrigerantes [15]	17
Figura 2-9 Aumento previsto de los gases HFC [20]	18
Figura 2-10 Ciclo de absorción convencional de simple efecto [22]	19
Figura 2-11 Ciclo de absorción de doble efecto [25]	20
Figura 2-12 Ciclo de Absorción-Resorción [23].....	22
Figura 2-13 Ciclo de Difusión-Absorción [21]	24
Figura 2-14 Fluidos de trabajo [36].....	25
Figura 2-15 Generador DAR.....	27
Figura 2-16 Bomba de burbuja DAR	28
Figura 2-17 Rectificador DAR	29
Figura 2-18 Condensador DAR.....	30
Figura 2-19 Evaporador DAR	31
Figura 2-20 Absorbedor DAR.....	32
Figura 3-1 Elementos de la fase experimental	34
Figura 3-2 Características de "Electrolux"	35
Figura 3-3 Frigorífico “Electrolux”	35
Figura 3-4 Evaporador "Electrolux".....	36
Figura 3-5 Resistencia "Electrolux"	36
Figura 3-6 Entrada de condensador "Electrolux"	37
Figura 3-7 Conducto de regreso de Hidrogeno "Electrolux"	38
Figura 3-8 Características de "ananké"	38
Figura 3-9 Frigorífico “ananké”	39
Figura 3-10 Evaporador "ananké"	39
Figura 3-11 Interior de "ananké"	40
Figura 3-12 Entrada condensador "ananké"	40

Figura 3-13 Conducto de regreso de hidrogeno "ananké"	41
Figura 3-14 Medición "Electrolux" en vacío.....	42
Figura 3-15 Medición "ananké" en vacío	42
Figura 3-17 Experimento de 1 L en "Electrolux"	43
Figura 3-16 Experimento de 1 L en "ananké"	43
Figura 3-18 Experimento de 2 L en "Electrolux"	44
Figura 3-19 Experimento de 2 L en "ananké"	44
Figura 3-20 Experimento evaporador "Electrolux"	47
Figura 3-21 Experimento evaporador "ananké"	47
Figura 3-22 Pieza de Aluminio.....	48
Figura 3-23 "Aleta" de aluminio	48
Figura 3-24 Empleo de placas de aluminio en "Electrolux"	49
Figura 4-1 COP en vacío a máxima capacidad	50
Figura 4-2 Evolución del COP a máxima capacidad respecto a la temperatura exterior	51
Figura 4-3 COP en vacío a media capacidad.....	51
Figura 4-4 Evolución del COP a media capacidad respecto a la temperatura exterior	52
Figura 4-5 COP en vacío a mínima capacidad	53
Figura 4-6 Evolución del COP a mínima capacidad respecto a la temperatura exterior.....	53
Figura 4-7 Curva de enfriamiento en vacío a máxima capacidad	54
Figura 4-8 Curva de enfriamiento en vacío a media capacidad	54
Figura 4-9 Curva de enfriamiento en vacío a mínima capacidad	55
Figura 4-10 Consumo energético en vacío a máxima capacidad	55
Figura 4-11 Consumo energético en vacío a media capacidad	56
Figura 4-12 Consumo eléctrico masa de aire a mínima capacidad	56
Figura 4-13 COP de 1 L de agua (26°C-16°C)	57
Figura 4-14 Consumo energético 1 L de agua (26°C-16°C).....	57
Figura 4-15 Evolución de temperaturas 1 L de agua (26°C-16°C)	58
Figura 4-16 COP de 1 L de agua (12°C a 8°C)	58
Figura 4-17 Consumo energético 1 L (12°C-8°C)	59
Figura 4-18 Evolución de temperaturas 1 L de agua (12°C-8°C)	59
Figura 4-19 COP de 2 L de agua (30°C-20°C)	60
Figura 4-20 Consumo energético 2 L de agua (30°C-20°C).....	60
Figura 4-21 Evolución de temperaturas 2 L de agua (30°C-20°C)	61
Figura 4-22 COP de 2 L de agua (14°C-11°C)	61
Figura 4-23 Consumo energético de 2 L (14°C-11°C).....	62
Figura 4-24 Evolución de temperaturas 2 L de agua (14°C-11°C)	62

Figura 4-25 Capacidad de aislamiento	63
Figura 4-26 Evolución de temperaturas UA "ananké"	64
Figura 4-27 Evolución de temperaturas UA "Electrolux"	64
Figura 4-28 Temperaturas del ciclo "ananké"	65
Figura 4-29 Temperaturas del ciclo "Electrolux"	66
Figura 4-30 Temperaturas de evaporador "ananké"	67
Figura 4-31 Temperaturas de evaporador "Electrolux"	67
Figura 4-32 Temperaturas del ciclo "Electrolux" con placas de aluminio	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Diferencias entre Absorción-Resorción y convencionales [Elaboración propia]	23
Tabla 2-2 Diferencias entre sistemas DAR y convencionales [Elaboración propia]	25

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

En la actualidad, la eficiencia energética se ha convertido en un pilar fundamental para abordar los desafíos globales relacionados con el cambio climático, la sostenibilidad y la creciente demanda de energía. A medida que los recursos energéticos tradicionales se agotan y los impactos ambientales asociados a su uso se vuelven más evidentes y significativos, surge la necesidad de optimizar el consumo energético en todos los ámbitos.

En un mundo cada vez más implicado con la sostenibilidad y la eficiencia energética, el análisis de los sistemas de refrigeración es de gran relevancia. Los frigoríficos de pequeña capacidad, comúnmente utilizados en hogares, oficinas y entornos específicos como habitaciones de hotel o incluso en medios de transporte, representan una solución práctica y efectiva para la conservación de productos alimenticios o medicinas en espacios reducidos. Sin embargo, su impacto energético, aunque individualmente sea menor, es de gran relevancia al considerar su uso masivo en todo el mundo.

Entre las tecnologías disponibles para la refrigeración, los sistemas de absorción se diferencian fundamentalmente por su capacidad de operar sin hacer uso de un compresor mecánico, empleando fuentes de calor como energía impulsora. Este principio de funcionamiento no solo los convierte en alternativas más silenciosas y compactas, sino también en una opción viable sin necesidad de hacer uso de la red eléctrica o donde las fuentes de energía convencionales no son accesibles. Además, los sistemas de absorción tienen el potencial de aprovechar fuentes de energía renovables o residuales, reduciendo su dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a la mitigación del cambio climático, siendo este uno de los temas más relevantes de la actualidad y que más alarma ha generado en nuestra sociedad.

A pesar de sus ventajas, los frigoríficos de pequeña capacidad que emplean sistemas de absorción presentan ciertas limitaciones técnicas, especialmente en lo que respecta a su eficiencia energética. Estas restricciones han condicionado su uso frente a otras tecnologías más consolidadas, como los sistemas de compresión de vapor. Sin embargo, su capacidad para operar sin electricidad y aprovechar fuentes de calor residual o renovable los convierte en una opción con un alto potencial. Por ello, en la actualidad, constituyen una línea activa de investigación orientada a mejorar su rendimiento y consolidarlos como una alternativa real y competitiva en el ámbito de la refrigeración sostenible.

En este trabajo se buscará identificar oportunidades de mejora y proponer recomendaciones que contribuyan a la optimización de estos sistemas, promoviendo un diseño más eficiente y sostenible. De este modo, se busca avanzar en el conocimiento técnico sobre los sistemas de absorción, así como aportar soluciones prácticas que respondan a los requerimientos actuales de eficiencia energética y protección del medio ambiente.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es analizar el comportamiento energético de frigoríficos de pequeña capacidad que emplean los sistemas de absorción, con el propósito de evaluar su eficiencia en condiciones reales de operación. Se pretende estudiar su rendimiento térmico, el consumo energético asociado y las diferencias de funcionamiento entre distintos modelos, con el fin de valorar su viabilidad como alternativa a los clásicos sistemas de refrigeración por compresión.

Entre los objetivos específicos, se encuentra la caracterización experimental de dos frigoríficos, “Electrolux” y “ananké”, los cuales funcionan mediante un ciclo de difusión-absorción, la cual es una variante de la absorción convencional que emplea hidrogeno para su correcto funcionamiento. Mediante el estudio de sus principios de funcionamiento y condiciones operativas se realizarán distintas pruebas de laboratorio analizar su rendimiento energético, su capacidad de enfriamiento y el comportamiento térmico bajo diferentes escenarios de carga, con el fin de establecer comparaciones y detectar posibles limitaciones.

Otro de los aspectos clave será realizar un estudio detallado del frigorífico “Electrolux”, el cual presenta ciertas anomalías en su funcionamiento. Se pretende analizar las posibles causas de estos fallos con el fin de comprender en mayor profundidad el comportamiento de los sistemas de absorción por difusión y, a partir de ello, identificar medidas preventivas o propuestas de mejora en el diseño que permitan optimizar su rendimiento y consolidarlos como una alternativa viable frente a los sistemas de compresión mecánica.

1.3 Estructura del Trabajo

El trabajo esta dividido en cinco apartados principales: la introducción, donde se aborda el empleo de los sistemas de refrigeración así como los objetivos que se han fijado para este trabajo, el estado del arte en el que se profundiza y analiza la teoría sobre el tema en cuestión, el desarrollo del proyecto a medida que se realizan los ensayos de laboratorio correspondientes, seguido de un apartado referente a los resultados obtenidos en dichos ensayos y el análisis y comparación con la información y documentación existente, finalizando con una conclusión de todos los aspectos principales que se han trabajado a lo largo del proyecto además de las posibles líneas futuras a seguir para su posterior desarrollo.

Estas cinco partes se han desarrollado en cinco apartados diferentes:

- **Introducción:** Se contextualiza al lector sobre el tema y se presenta una visión general sobre el trabajo en términos de sistemas de refrigeración, así como la presentación de los objetivos fijados para el presente trabajo.
- **Estado del arte:** Se lleva a cabo un análisis sobre la evolución histórica de los sistemas de refrigeración, profundizando en su funcionamiento y conociendo las diferencias y semejanzas entre los distintos tipos existentes. Se busca obtener la base de conocimiento que permita proseguir con el proyecto de manera adecuada.
- **Metodología:** En esta sección se presenta un análisis detallado de la información bibliográfica consultada, describiendo el método utilizado para evaluar el rendimiento del sistema de absorción. Este apartado también incluye las condiciones y los criterios empleados para realizar las simulaciones y análisis experimentales, así como la explicación de las herramientas utilizadas para interpretar los datos obtenidos.
- **Resultados:** Se presentan los datos obtenidos tras las pruebas de laboratorio. En base a la investigación bibliográfica y al análisis de dichos datos, se podrá discutir los aspectos más relevantes de un sistema de absorción, focalizándonos en las posibles mejoras de su funcionamiento, así como sus limitaciones.

- **Conclusiones:** Se realizará procesamiento de la información abstraída del presente trabajo y se exponen las posibles líneas futuras a seguir que podrían ser de interés para aplicación docente o incluso futuros trabajos de fin de grado en la Escuela Naval Militar.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades

2.1.1 Origen y evolución histórica de los sistemas de refrigeración

Comprender el origen y la procedencia de los sistemas de refrigeración es de vital importancia para poder trabajar en sus distintos elementos con el fin de analizar su funcionamiento y, si es posible, reducir sus limitaciones y mejorar su eficiencia. También ayudará en la evaluación de su impacto ambiental, desde el proceso de fabricación hasta su ciclo de vida, lo que resulta esencial en proyectos que buscan optimizar su funcionamiento o proponer mejoras sostenibles.

El desarrollo de los frigoríficos y los sistemas de refrigeración representa uno de los avances más importantes en la historia de la tecnología, permitiendo la conservación de medicamentos, alimentos o productos perecederos de todo tipo. El origen de la refrigeración se remonta a las antiguas civilizaciones como los egipcios o los romanos, quienes almacenaban hielo en oquedades o pozos subterráneos. No obstante, los sistemas modernos de refrigeración tienen su origen en los descubrimientos científicos de los siglos XVIII y XIX. Es entonces cuando surge el concepto de refrigeración artificial, que comienza su desarrollo a raíz de los estudios sobre la expansión de gases y el efecto de enfriamiento resultante.



Figura 2-1 William Cullen [1]

El desarrollo científico de la refrigeración comenzó en el siglo XVII. William Cullen (véase Figura 2-1), de la Universidad de Glasgow, realiza en 1748 el primer experimento conocido de refrigeración artificial logrando producir hielo mediante la vaporización a la atmosfera de éter etílico. Debido a los altos índices de explosividad de este compuesto, hubo numerosos accidentes causados por los vapores liberados que, sumados a la dificultad que implicaba su uso en la vida cotidiana, provocaron que su experimento no tuviera éxito [2].

Durante los siguientes años prosiguió la investigación y el desarrollo científico en lo referente a la refrigeración, destacando en 1805, Oliver Evans, quien diseñó el primer prototipo teórico de una máquina de refrigeración cuyo funcionamiento consistía en la evaporación y posterior condensación de un fluido. No obstante, el punto de inflexión tuvo lugar en 1834, de la mano de Jacob Perkins (véase Figura 2-2), logrando realizar el diseño de Oliver Evans y creando la primera máquina de refrigeración por compresión de vapor, empleando éter como liquido refrigerante [3].

John Gorrie, medico estadounidense, desarrolló en 1842 una máquina de refrigeración empleando para ello la comprensión de aire, creando hielo artificial, con el fin de reducir la temperatura de las habitaciones donde se encontraban los pacientes de fiebre amarilla, pues en esa época se consideraba un factor positivo en cuanto a la recuperación de la enfermedad. A pesar de no tener un éxito comercial inmediato, sembró la semilla del desarrollo de la refrigeración mecánica. Es en 1902, cuando se produce el verdadero avance en la refrigeración moderna, con Willis Haviland Carrier, quien desarrolló el primer sistema de aire acondicionado con el propósito de regular la temperatura y la humedad de una imprenta. Este invento marcó el inicio de la era del aire acondicionado moderno y sentó las bases para la refrigeración industrial a gran escala [4].

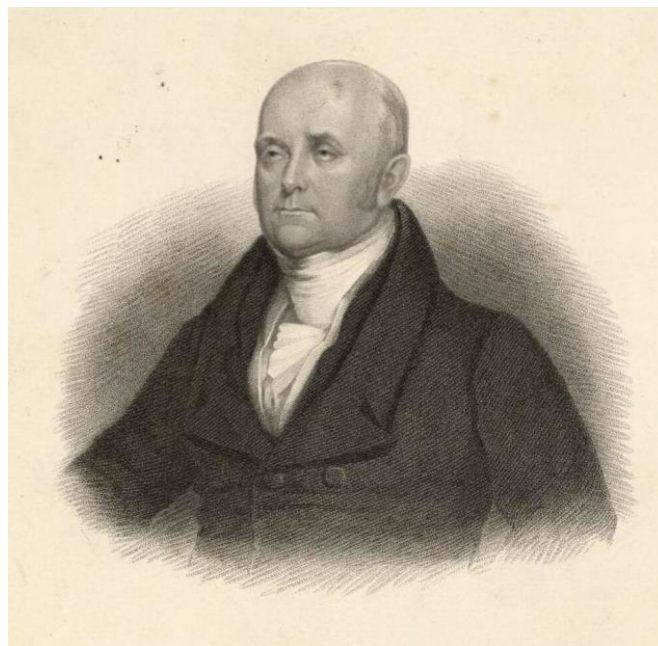


Figura 2-2 Jacob Perkins [5]

En lo referente a los sistemas de absorción, la evolución abarca más de dos siglos de innovación. Desde los experimentos pioneros como el ya citado William Cullen en 1748, hasta el gran invento de Ferdinand Carré en 1859, logrando el funcionamiento de una máquina de absorción de amoníaco-agua (véase Figura 2-3). Este avance supuso un hito fundamental en la historia de la refrigeración, al demostrar la viabilidad de generar frío mediante una fuente de calor. La máquina de Carré no solo encontró aplicaciones en la industria, sino que también se utilizó en embarcaciones y en zonas aisladas sin acceso a electricidad, sentando las bases para el posterior desarrollo de tecnologías más eficientes.

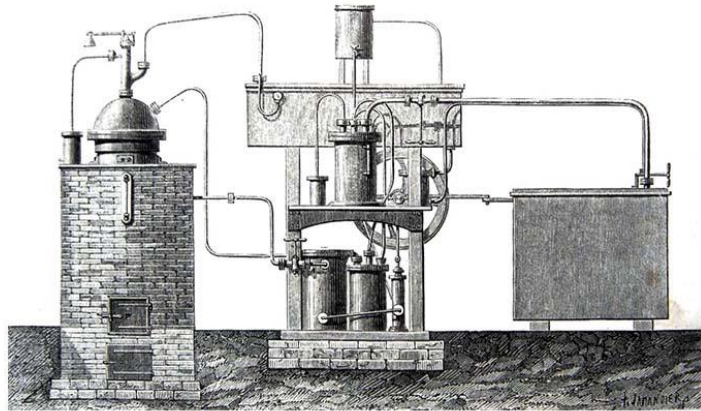


Figura 2-3 “El invento de Carré” [6]

Ya en el XX, Baltzar von Platen y Carl Munters crean el primer refrigerador de absorción. Aunque han ido perdiendo protagonismo durante las últimas décadas frente a los mecanismos de refrigeración mecánica, presentan aspectos favorables en términos de energías renovables y su bajo impacto ambiental.

2.1.2 Fundamentos Termodinámicos

2.1.2.1 Leyes de la Termodinámica aplicadas a la refrigeración

Las leyes de la termodinámica son la base del funcionamiento de los sistemas de refrigeración. Estas leyes regulan los procesos de transferencia de energía y las transformaciones entre calor y trabajo de los cuales se caracterizan estos sistemas.

- Primera Ley de la Termodinámica

La Primera Ley de la Termodinámica, llamada “el principio de conservación de la energía”, establece que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Este concepto se traduce en la siguiente formula:

$$Q=\Delta U+W$$

Siendo Q el calor transferido al sistema, W el trabajo realizado por o sobre el sistema y ΔU es la variación en la energía interna.

Dentro de un sistema de refrigeración, este principio se aplica en todo ciclo que conforma el sistema, como podría ser el caso del evaporador. En un sistema de refrigeración, esta ley se aplica a cada componente y al ciclo completo. En el caso del evaporador, el calor absorbido del interior del espacio que se quiere refrigerar provoca un aumento de la energía interna del refrigerante y, posteriormente, el compresor realiza el trabajo mecánico sobre el líquido refrigerante, aumentando su energía interna, así como su presión.

- Segunda Ley de la Termodinámica

La Segunda Ley de la Termodinámica establece que el calor fluye de un foco caliente a uno más frío, y no al revés. Como podemos ver en la siguiente figura, en la que se representa el funcionamiento de una maquina térmica, el calor fluye de manera espontánea desde la fuente al sumidero.

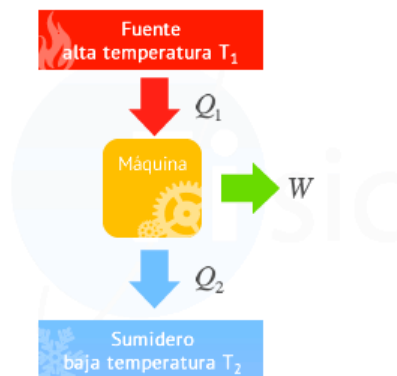


Figura 2-4 Esquema de una máquina térmica [7]

Aplicando esta ley a los sistemas de refrigeración, se puede emplear como ejemplo el propio funcionamiento del sistema, necesitando energía eléctrica (por compresión), es decir, un trabajo (W), para realizar la transferencia de calor de un espacio frío a uno más caliente. La eficiencia de este proceso se mide mediante el Coeficiente de Rendimiento, COP (Coefficient of Performance), el cual viene dado por:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{Q_{\text{entrada}}} \quad \text{Absorción}$$

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} \quad \text{Compresión de vapor}$$

Siendo “ Q_c ” el calor absorbido por el evaporador y “ W ” el trabajo realizado por el compresor, para el caso de un sistema de compresión y, siendo “ Q_c ” el calor absorbido por el evaporador y “ Q_{entrada} ” la energía térmica suministrada al sistema, pudiendo provenir de diferentes fuentes como se explicará en los próximos apartados.

- Tercera Ley de la Termodinámica

Aunque menos aplicada directamente en refrigeración práctica, la Tercera Ley establece que es imposible alcanzar el cero absoluto de temperatura mediante un número finito de procesos. Esto implica limitaciones fundamentales en la capacidad de enfriamiento de cualquier sistema de refrigeración, estableciendo los límites teóricos de los procesos de enfriamiento.

2.1.2.2 Ciclos Termodinámicos básicos empleados en la refrigeración

Los ciclos termodinámicos básicos [8] empleados en refrigeración son fundamentales para entender el funcionamiento de los sistemas de refrigeración. Son procesos termodinámicos diseñados para transferir calor. Cabe destacar que, en este apartado, los ciclos de absorción y compresión simplemente serán mencionados y descritos de manera genérica, puesto que más adelante se realizara un análisis desarrollado de los mismos. Los principales ciclos son:

- Ciclo de Carnot inverso

El ciclo inverso de Carnot es la visión teórica en condiciones ideales representada en un ciclo de refrigeración. Su funcionamiento fluye en sentido opuesto al ciclo de Carnot original (Ciclo de Potencia). Este ciclo es de gran importancia en termodinámica, pues establece el límite de máximo valor que puede alcanzar un rendimiento teórico en un sistema de refrigeración.

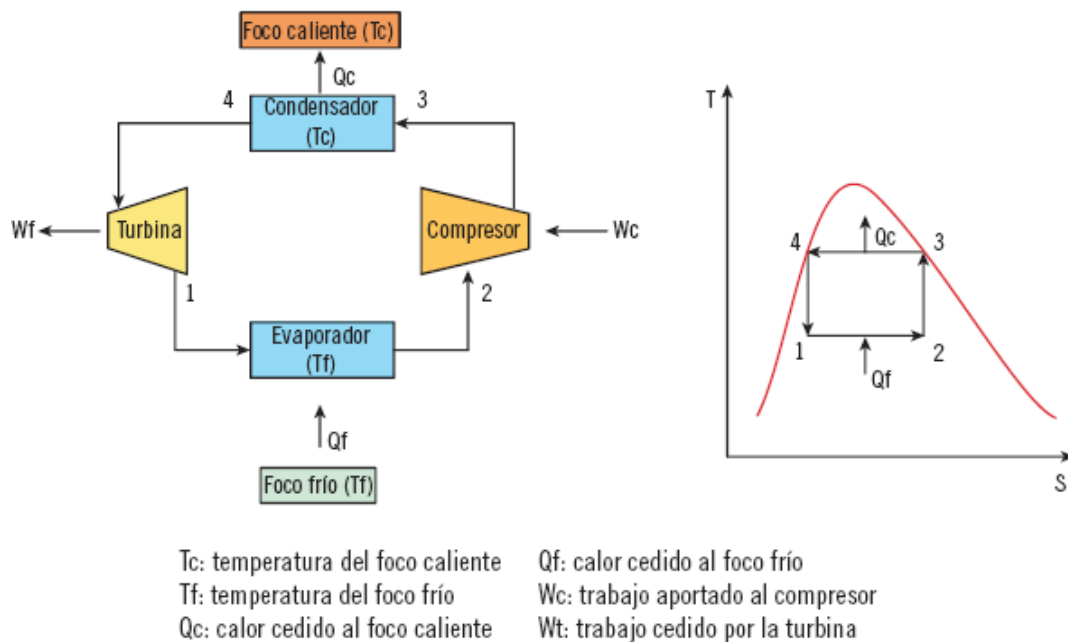


Figura 2-5 Ciclo de Carnot Inverso [9]

El ciclo invertido de Carnot (véase Figura 2-5) consiste en cuatro procesos reversibles:

1. Compresión isotérmica: El refrigerante absorbe calor de una fuente caliente a temperatura T_C mientras se comprime isotérmicamente.
2. Compresión adiabática: El refrigerante se comprime adiabáticamente, aumentando su temperatura desde T_F hasta T_C .
3. Expansión isotérmica: El refrigerante cede calor a una fuente fría a temperatura T_F mientras se expande isotérmicamente.
4. Expansión adiabática: El refrigerante se expande adiabáticamente, disminuyendo su temperatura desde T_C hasta T_F .

El ciclo invertido de Carnot es un modelo teórico ideal que no puede aplicarse a la vida real al contar con procesos reversibles. No obstante, es crucial para el diseño y optimización de sistemas de refrigeración reales, pues sus principios se emplean en desarrollar sistemas más eficientes y ecológicos.

- Ciclo de compresión de vapor

Los ciclos por compresión de vapor son los más empleados en los sistemas de refrigeración. Su funcionamiento se basa en la transferencia de calor de un espacio a baja temperatura a otro espacio a alta temperatura, como resultado de la compresión y posterior expansión de un líquido refrigerante.

Se trata de un circuito cerrado formado por un compresor, en el cual se comprime el refrigerante, circulando a continuación por un condensador en el cual este pasa a estado líquido, expulsando fuera del circuito el calor absorbido. El siguiente paso será a través de la válvula de expansión, produciéndose un descenso de presión y temperatura del refrigerante, así como la absorción del calor del interior del compartimento a enfriar, al producirse la evaporación del refrigerante a su paso por el evaporador.

Este tipo de ciclos se empleará como elemento comparador con los ciclos de absorción, por lo que en las próximas páginas se abordará el tema de manera detallada.

- Ciclo de absorción

Los ciclos de absorción tienen una estructura similar a los ciclos de compresión, siendo su principal diferencia el uso de calor en lugar de energía mecánica para generar la refrigeración. Su funcionamiento consiste en la interacción entre un refrigerante y un absorbente y su uso es muy común en aplicaciones donde hay una fuente de calor residual disponible, como en sistemas industriales, cogeneración o energía solar térmico.

El ciclo consta de cuatro fases, siendo la primera la evaporación del refrigerante, en la que se produce el enfriamiento del espacio. La segunda fase será la absorción, en la que se mezcla el vapor del refrigerante con el absorbente, produciéndose una solución líquida. En la siguiente fase, la generación, la solución absorbente-refrigerante se calienta con una fuente de calor externa, lo que provocará la separación del absorbente y su posterior evaporación. Por último, se producirá la condensación, el vapor de refrigerante pasa al condensador, donde liberará calor al ambiente y se convertirá de nuevo en líquido.

- Ciclo de gas

El ciclo de refrigeración de gas, también conocido como ciclo de Brayton inverso, utiliza un gas como refrigerante sin cambios de fase. Consta de cuatro etapas: compresión, enfriamiento, expansión y absorción de calor.

El gas inicialmente se comprime, se enfría en un intercambiador de calor, se expande mediante el uso de una turbina y finalmente el calor del espacio a refrigerar es absorbido. A pesar de que este ciclo es menos eficiente que los de compresión de vapor, es útil en aplicaciones específicas como sistemas de aire acondicionado en aeronaves o sistemas criogénicos. Sus ventajas incluyen la capacidad de operar sin cambios de fase del refrigerante y su idoneidad para altitudes elevadas o presiones variables. Sin embargo, tiene menor eficiencia energética y requiere componentes más grandes. Aunque es poco práctico para aplicaciones domésticas, este ciclo es importante para la industria y el ámbito aeroespacial en las cuales sus características únicas lo hacen el sistema adecuado (véase Figura 2-6).

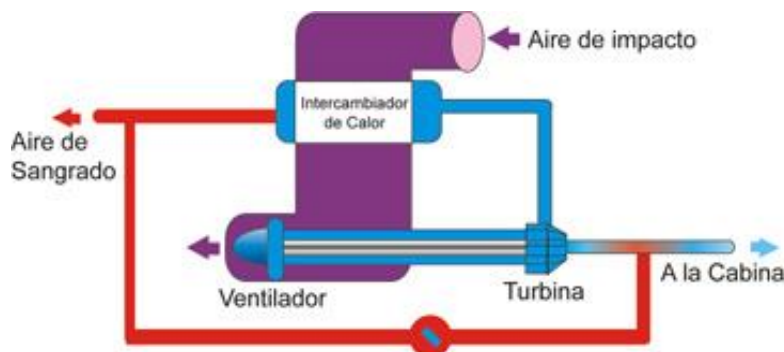


Figura 2-6 Aire acondicionado de una aeronave [10]

Existen otras variantes de ciclos empleados en la refrigeración, como puedan ser los ciclos en cascada, que utilizan dos o más ciclos de refrigeración conectados en serie para aumentar la capacidad de enfriamiento, o los ciclos de múltiples etapas, en el que se emplean varias etapas de compresión con el propósito de mejorar la eficiencia. La elección del ciclo depende de múltiples factores, como la aplicación, la eficiencia necesaria, las temperaturas, rango de temperaturas y los recursos económicos disponibles. Estas configuraciones resultan especialmente útiles en aplicaciones industriales o criogénicas, donde se requieren temperaturas muy bajas. Asimismo, permiten adaptar el sistema a diferentes condiciones de funcionamiento, optimizando su rendimiento energético.

2.2 Sistemas de Refrigeración por compresión de vapor

2.2.1 Principios de funcionamiento

Los sistemas de refrigeración basados en la compresión de vapor se han consolidado como los más utilizados a nivel mundial, gracias a su alta eficiencia y fiabilidad operativa. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, este tipo de tecnología también presenta ciertos aspectos que deben ser analizados en términos de su impacto ambiental y limitaciones. El ciclo de compresión de vapor, representado en la Figura 2-7, es un proceso termodinámico mediante el cual se extrae calor de un entorno y se transfiere a otro, aprovechando las propiedades de cambio de fase de un refrigerante. Este mecanismo es fundamental en la refrigeración moderna, ya que permite mantener condiciones térmicas controladas en una amplia variedad de aplicaciones, desde la climatización doméstica hasta los sistemas industriales de gran escala. Estos ciclos constan de cuatro fases diferentes:

- **Compresión**

Estos ciclos de refrigeración comienzan con la etapa de compresión, cuyo propósito es elevar tanto la presión como la temperatura del refrigerante gaseoso. En este proceso, el compresor recibe el refrigerante que proviene del evaporador a una presión reducida. A través de una compresión adiabática, el compresor impulsa el gas refrigerante hacia el condensador, incrementando su presión y temperatura. Este aumento de energía permite que el refrigerante pueda posteriormente disipar calor al entorno circundante una vez que alcance el condensador [11].

Este proceso se describe mediante la primera ley de la termodinámica:

$$W_c = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

donde W_c es el trabajo de compresión y h_1 h_2 son las entalpías del refrigerante antes y después del compresor. El trabajo que realiza el compresor es crucial para el buen rendimiento del sistema.

- **Condensación**

La condensación es el proceso en el que el refrigerante, tras haber sido comprimido y elevado a alta presión y temperatura, cede su calor al entorno y pasa de estado gaseoso a líquido. Este cambio de fase se produce en el condensador, un intercambiador de calor que permite disipar la energía térmica transportada por el refrigerante hacia un medio externo.

El proceso ocurre a presión constante, lo que significa que la temperatura del refrigerante disminuye mientras cambia de estado. En un sistema ideal, la transferencia de calor en esta fase se rige por la primera ley de la termodinámica aplicada a un sistema de flujo estacionario.

$$Q_c = \dot{m} (h_2 - h_3)$$

Siendo Q_c el calor disipado en el condensador, $\dot{m}$ el caudal másico del refrigerante, y h_2 h_3 , las entalpías a la entrada y salida del condensador. Este proceso es esencial para la eficiencia del sistema de refrigeración, ya que garantiza que el refrigerante llegue a la válvula de expansión en estado adecuado para enfriarse y absorber calor en el evaporador [12].

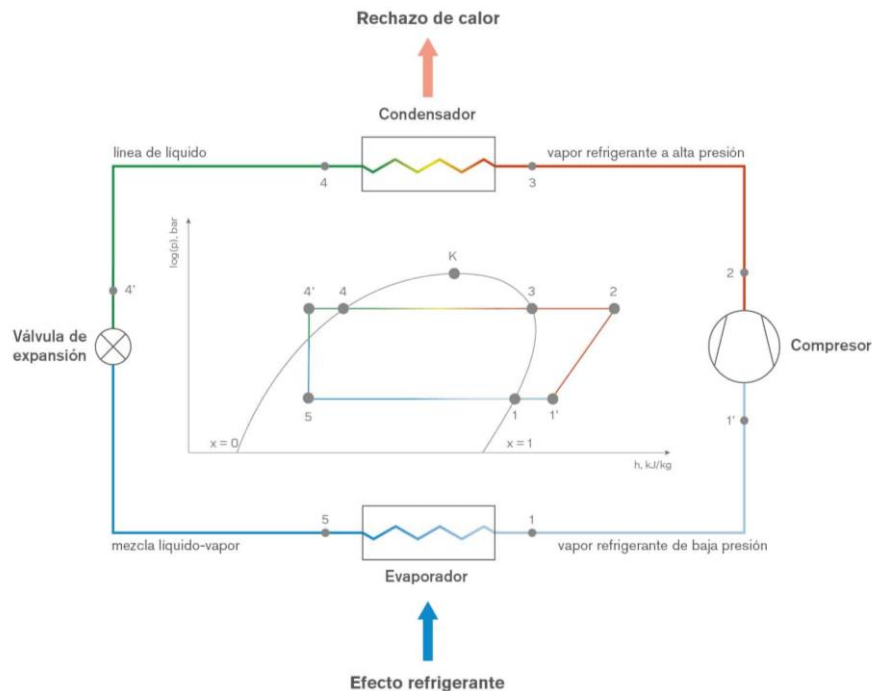


Figura 2-7 Ciclo de compresión de vapor [12]

- **Expansión**

La fase de expansión es la etapa en la que el refrigerante en estado líquido y a alta presión, proveniente del condensador, atraviesa un dispositivo de expansión, experimentando una rápida reducción de presión y temperatura antes de ingresar al evaporador. Este proceso es fundamental, ya que garantiza que el refrigerante llegue al evaporador en condiciones óptimas para absorber el calor del ambiente y producir el efecto de refrigeración.

El equipo responsable de llevar a cabo esta transformación es la válvula de expansión, aunque en ciertas aplicaciones también se emplean otros dispositivos, es el más usado en los sistemas de compresión. La expansión del refrigerante se asimila a un proceso isentálpico, lo que implica que no intercambia ni calor ni trabajo con su entorno durante la transformación, por lo que no se produce variación en la entalpía (en la práctica, existen pérdidas irreversibles que generan una ligera caída de entropía, aunque es mínima) [11].

$$h_3 = h_4$$

Esta etapa de expansión es esencial para el funcionamiento eficiente del ciclo de refrigeración, ya que prepara el refrigerante para su rol crítico en el evaporador, donde absorberá calor y generará el efecto de enfriamiento necesario.

- **Evaporación**

La fase de evaporación es la etapa en la que el refrigerante de baja presión y temperatura absorbe calor del entorno para cambiar de fase, pasando de mezcla líquido-vapor a vapor saturado o sobrecalentado. Este proceso se lleva a cabo en el evaporador, un intercambiador de calor donde se extrae energía térmica del medio que se desea enfriar, ya sea aire, agua u otro fluido.

$$Q_e = \dot{m} (h_4 - h_1)$$

Donde Q_e representa el calor absorbido en el evaporador, $\dot{m}$ el caudal másico del refrigerante, h_4 la entalpía del refrigerante a la entrada del evaporador, y h_1 la entalpía del refrigerante a la salida del evaporador [12].

El objetivo de esta fase es lograr que el refrigerante se evapore completamente antes de salir del evaporador, asegurando que el compresor reciba únicamente vapor y evitando daños en el sistema.

2.2.2 Refrigerantes empleados

La efectividad y adaptabilidad de los sistemas de refrigeración de compresión de vapor están estrechamente relacionadas con el tipo de refrigerante que se utiliza. A lo largo de los años, el desarrollo de los refrigerantes ha estado influenciado por la necesidad de aumentar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental, especialmente en lo que respecta al deterioro de la capa de ozono y el cambio climático. A continuación, se detallarán los refrigerantes más comunes en uso hoy en día y su evolución a lo largo del tiempo.

2.2.2.1 Tipología de líquidos refrigerantes

Los líquidos refrigerantes utilizados en los sistemas de compresión de vapor han ido evolucionando según las necesidades y restricciones de cada época (véase Figura 2-8). Pueden agruparse en cinco categorías principales:

- Refrigerantes Clorofluorocarbonos (CFCs)

Los CFCs, como el R-12 (Dicloro-difluorometano), fueron ampliamente utilizados debido a su alta estabilidad y eficiencia en la refrigeración. Sin embargo, su elevado Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP) y su alto Potencial de Calentamiento Global (GWP) llevaron a su prohibición internacional en el marco del Protocolo de Montreal [13].

- Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs)

Los Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) surgieron como una opción menos perjudicial en comparación con los CFCs, destacando entre ellos el R-22 (Clorodifluorometano), ampliamente empleado en sistemas de aire acondicionado y refrigeración comercial. Aunque su efecto dañino sobre la capa de ozono es inferior al de los CFCs, aún contribuye al calentamiento global, razón por la cual su uso está siendo eliminado gradualmente en diversos países [14].

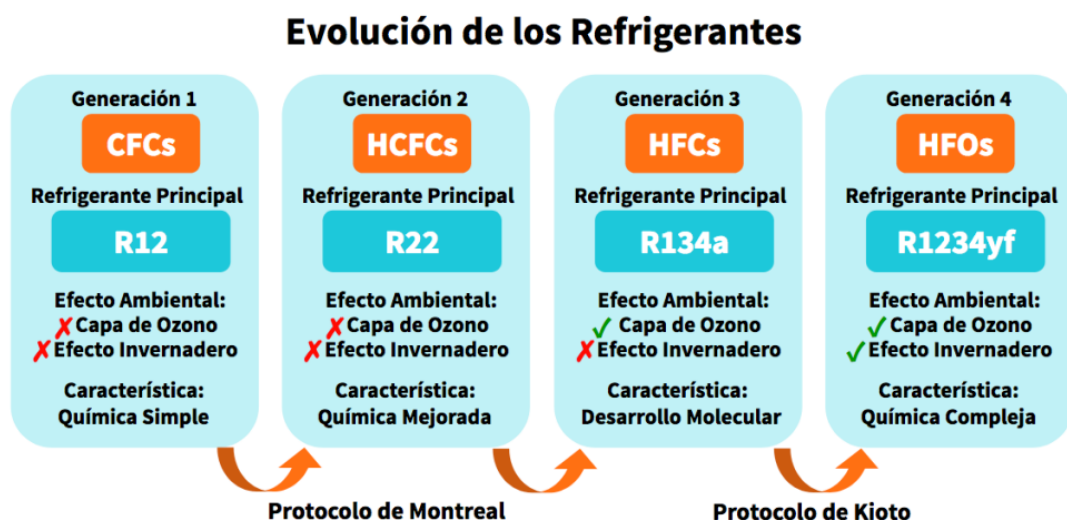


Figura 2-8 Evolución de los refrigerantes [15]

- Hidrofluorocarbonos (HFCs)

Para reducir el impacto ambiental de los refrigerantes anteriores, se introdujeron los HFCs, entre los cuales destacan el R-134a, R-410A y R-407C. Una de sus principales ventajas es que no afectan la capa de ozono, lo que los convirtió en una opción atractiva durante años. Sin embargo, presentan un alto Potencial de Calentamiento Global (GWP), lo que ha llevado a diversas regulaciones y restricciones (Protocolo de Kioto) en varios países. Actualmente, se trabaja en el desarrollo de alternativas con menor impacto ambiental para sustituir estos compuestos [16].

- Hidrofluoroolefinas (HFOs)

En el esfuerzo por encontrar refrigerantes más sostenibles, han surgido las Hidrofluoroolefinas (HFOs), como el R-1234yf y el R-1234ze. Estos compuestos se caracterizan por su bajo GWP y alta eficiencia energética, lo que los convierte en una opción viable para diversas aplicaciones. Su uso se ha expandido especialmente en el sector automotriz y en sistemas de aire acondicionado, donde han demostrado ser una alternativa prometedora frente a los refrigerantes convencionales [16].

- Refrigerantes naturales

El grado de implementación de los refrigerantes naturales en compresión de vapor varía según la aplicación y actualmente es muy reducido. Mientras que el amoníaco domina la refrigeración industrial, el CO₂ está en expansión en sistemas comerciales, y los hidrocarburos son la norma en refrigeración doméstica. A pesar de sus ventajas ambientales, los desafíos en seguridad, costos y diseño de equipos han impedido su adopción masiva en todos los sectores. A diferencia de los sistemas de absorción, en los ciclos de compresión se trabaja a altas presiones lo que aumenta un mayor riesgo de fugas así como una fallo mecánico grave (incendios o toxicidad) [17].

2.2.2.2 Impacto ambiental

El uso de refrigerantes en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor genera un impacto ambiental considerable, afectando tanto la atmósfera como los ecosistemas. Estas repercusiones se manifiestan en varias áreas críticas.

En primer lugar, el aumento del calentamiento global, provocado por refrigerantes sintéticos, en particular los hidrofluorocarbonos (HFC), los cuales presentan un elevado Potencial de Calentamiento Global, lo que significa que su capacidad para retener el calor en la atmósfera es superior a la del CO₂ en una escala de hasta miles de veces [18]. Su presencia en la atmósfera altera el balance radiactivo terrestre, contribuyendo al incremento de la temperatura media global y acelerando el cambio climático. El pronóstico sobre el uso de estos gases resulta alarmante, ya que su incremento anual, reflejado en la Figura 2-9, parece inevitable a menos que se implementen alternativas viables y sostenibles.

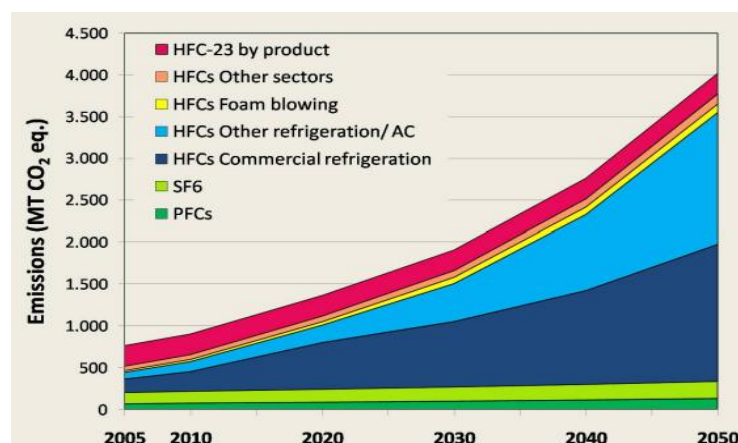


Figura 2-9 Aumento previsto de los gases HFC [20]

Es especialmente relevante el impacto negativo que ciertos refrigerantes tienen sobre la capa de ozono, en particular los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Estos compuestos, que han sido ampliamente empleados debido a su baja toxicidad y sus óptimas propiedades termodinámicas, presentan un alto Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP). Una vez liberados en la atmósfera, sus moléculas se descomponen por efecto de la radiación ultravioleta, liberando átomos de cloro y bromo, los cuales actúan como catalizadores en reacciones químicas que degradan la capa de ozono en la estratósfera, reduciendo su capacidad de filtrar la radiación ultravioleta dañina [19].

Por otro lado, las fugas de refrigerante son un problema recurrente en estos sistemas, derivadas del desgaste de componentes como juntas, válvulas y tuberías. Dado que los refrigerantes son altamente volátiles, incluso pequeñas fugas pueden generar efectos climáticos adversos. Además, una mala gestión de estos gases al final de su vida útil agrava el problema, ya que, si no son recuperados y reciclados, pueden liberarse a la atmósfera, prolongando su impacto.

Esta problemática ha llevado a la búsqueda de alternativas más sostenibles, como los sistemas de refrigeración por absorción, que utilizan mezclas como amoníaco/agua y pueden operar con fuentes de energía térmica renovable, reduciendo así su huella ambiental. A todo lo citado con anterioridad, se le suma el problema de consumo energético de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, que representa alrededor del 30% de la energía final eléctrica a nivel mundial, lo que los convierte en un factor clave en la emisión de gases de efecto invernadero [20].

2.3 Sistemas de refrigeración por absorción

2.3.1 Principios de Funcionamiento

Un sistema de refrigeración por absorción es una tecnología que utiliza una fuente de calor en lugar de un compresor mecánico para generar el efecto de refrigeración. El principio de funcionamiento de estos sistemas se basa en la capacidad de un absorbente para absorber un refrigerante a baja presión, así como el uso de energía térmica, en lugar de energía eléctrica, para realizar el ciclo de refrigeración. Este proceso se lleva a cabo a través de varias etapas principales, representadas en la Figura 2-10.

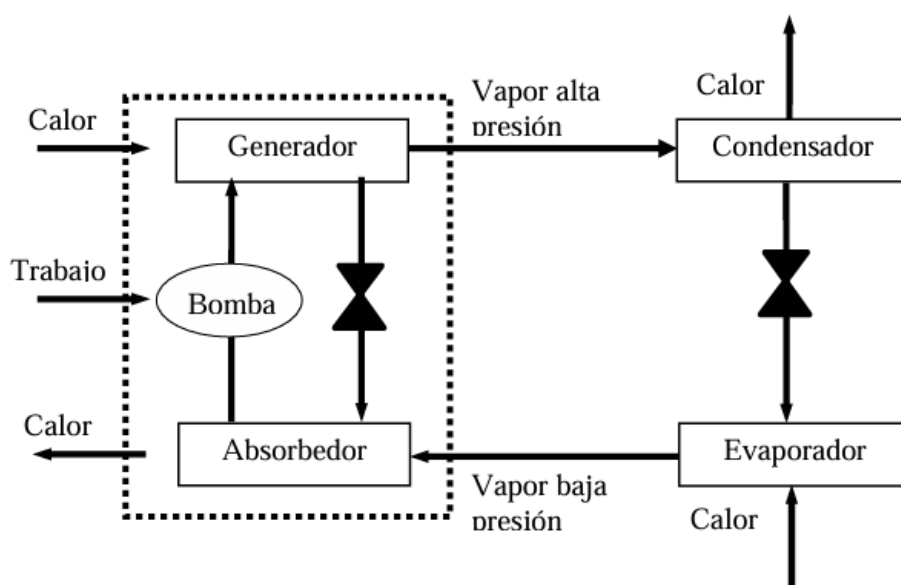


Figura 2-10 Ciclo de absorción convencional de simple efecto [21]

Los sistemas de absorción convencionales comienzan en el evaporador, donde el refrigerante líquido a baja presión se evapora, absorbiendo calor del espacio que se desea enfriar. Este vapor pasa luego al absorbedor, donde es absorbido por una solución concentrada del líquido absorbente, liberando calor en el proceso. La solución diluida resultante es bombeada al generador, donde se le aplica calor para separar nuevamente el refrigerante del absorbente. Este calor puede provenir de diversas fuentes como agua caliente, vapor, gases de escape o energía solar. En el generador, el vapor de refrigerante a alta presión se separa y pasa al condensador, donde se enfría y condensa, cediendo calor al exterior. El refrigerante líquido retorna al evaporador a través de una válvula de expansión, que reduce su presión y temperatura, completando así el ciclo. Mientras tanto, la solución concentrada de absorbente regresa al absorbedor para reiniciar el proceso [21].

Un sistema de absorción se considera de simple o doble efecto dependiendo del número de generadores (uno o dos), así como la manera en la que se aprovecha el calor del ciclo. Los sistemas de absorción que utilizan el par amoníaco-agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) solo podrán ser de simple efecto debido a las limitaciones que presentan, pues este par trabaja a mayores presiones, lo que podría suponer ciertas complicaciones de uso y diseño al añadir un segundo generador, provocando en el sistema presiones muy elevadas [22].

En el caso del simple efecto, se emplea un solo generador para separar el refrigerante del absorbente, siendo su diseño más sencillo. Este generador opera a temperaturas más bajas (90°C - 120°C , mientras que con el uso de dos generadores entre 130°C - 185°C), siendo su COP general de un valor entre 0.6 y 0.75 (Absorción convencional) [23].

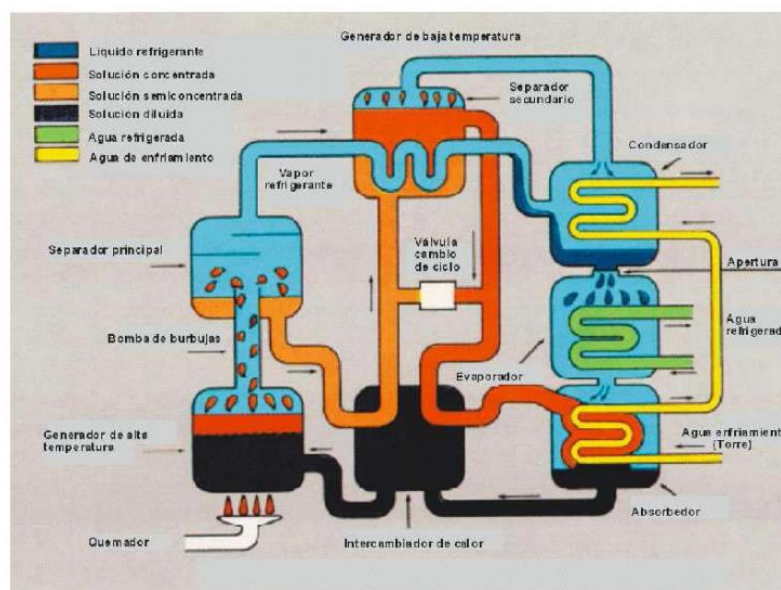


Figura 2-11 Ciclo de absorción de doble efecto [24]

Los sistemas de doble efecto, por el contrario, emplean dos generadores en el ciclo, como aparece reflejado en la Figura 2-11, aprovechando el calor del primer generador, por lo que el COP suele ser de un valor más elevado, entre 1.0 y 1.2 (Absorción convencional) [23].

2.3.2 Pares de trabajo

Un par de trabajo en un sistema de absorción es la combinación de un refrigerante y un absorbente que trabajan conjuntamente para generar el efecto frigorífico sin necesidad de compresor mecánico. Este par de trabajo (siempre se nombra primero el refrigerante y después el absorbente) determina las propiedades del ciclo, como la temperatura de operación, la presión y la eficiencia del sistema. Entre las combinaciones más utilizadas se encuentran el amoníaco-agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), ampliamente empleado en la

refrigeración industrial debido a su capacidad para operar a bajas temperaturas, y el agua-bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$), predominante en sistemas de climatización de gran escala, por lo que nos centraremos en el análisis de estos dos pares de trabajo.

Investigaciones recientes han explorado el uso de alternativas como el amoníaco con nitrato de litio ($\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$) y su versión combinada con agua ($\text{NH}_3/\text{LiNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), las cuales presentan ventajas en términos de estabilidad térmica y eficiencia en la transferencia de calor. La elección del par de trabajo más adecuado depende de factores como la temperatura de operación, la presión del sistema y la fuente de energía térmica disponible, influyendo directamente en la eficiencia y viabilidad del sistema de refrigeración por absorción [25].

2.3.2.1 Agua-bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$)

El bromuro de litio (LiBr) combinado con agua (H_2O) es uno de los pares de trabajo más comunes en los sistemas de refrigeración por absorción, especialmente en aplicaciones relacionadas con la climatización y la refrigeración industrial. Su amplia aceptación se debe a tres factores principales: su elevada eficiencia energética, su bajo impacto ambiental y su capacidad para funcionar utilizando fuentes de calor residual. A pesar de ello, este sistema también enfrenta ciertas limitaciones que restringen su uso en algunos contextos específicos.

Este par de trabajo se caracteriza por utilizar el agua como refrigerante, debido a su capacidad para cambiar de fase y generar el efecto de enfriamiento en el sistema. Su funcionamiento se basa en la absorción del agua por parte del bromuro de litio, un compuesto altamente higroscópico que actúa como absorbente.

Este sistema opera a bajas presiones, ya que trabaja en condiciones de vacío, lo que facilita la evaporación del agua a temperaturas cercanas a los 0°C . Entre sus principales ventajas destaca su alta eficiencia energética, con un coeficiente de rendimiento (COP) de entre 0.6 y 0.8, superior al de otros pares de trabajo, lo que lo hace ideal para sistemas de climatización y refrigeración industrial [26].

No obstante, el par $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ presenta ciertas limitaciones. Su uso está restringido a aplicaciones donde la temperatura de enfriamiento no deba descender por debajo de los 0°C , lo que lo hace inadecuado para procesos de congelación o refrigeración de baja temperatura. Además, el bromuro de litio tiende a cristalizarse si su concentración es demasiado alta o si la temperatura del sistema disminuye de manera considerable, lo que puede afectar su operatividad [27].

Por otro lado, este sistema requiere una fuente de calor de al menos 90°C para la regeneración del absorbente, lo que implica que debe contar con un suministro térmico adecuado para garantizar su funcionamiento eficiente. A pesar de estas limitaciones, su capacidad para operar con fuentes de calor residual y energías renovables lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones de climatización en grandes infraestructuras como hospitales, hoteles y centros comerciales [28].

2.3.2.2 Amoníaco-agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

El par de trabajo amoníaco-agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) es uno de los más utilizados en sistemas de refrigeración por absorción debido a su capacidad en la generación de frío y su versatilidad en diversas aplicaciones. Su uso se remonta al siglo XIX y ha sido ampliamente estudiado para mejorar su rendimiento energético y optimizar su funcionamiento en distintos entornos industriales y domésticos.

Este par de trabajo presenta propiedades físico-químicas que lo convierten en una opción altamente eficiente y ampliamente empleada en sistemas de refrigeración por absorción. El amoníaco, utilizado como refrigerante, se distingue por su baja temperatura de ebullición (-33.34°C a 1 atm), su elevada

entalpía de vaporización (1368 kJ/kg) y su gran capacidad de absorción de calor, lo que le permite generar un efecto frigorífico significativo [29]. A diferencia del par agua-bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$), no presenta riesgo de cristalización, ya que el amoníaco mantiene una alta solubilidad en agua en un amplio rango de temperaturas y concentraciones, evitando la formación de cristales o precipitados. Además, se trata de un refrigerante natural con bajo impacto ambiental, pues no daña la capa de ozono y su potencial de calentamiento global (GWP) es reducido. No obstante, su toxicidad y su capacidad corrosiva en contacto con cobre requieren medidas de seguridad en su manipulación y una cuidadosa selección de materiales para los componentes del sistema.

Por otro lado, el agua, utilizada como absorbente, se caracteriza por su alta capacidad de solubilidad del amoníaco, lo que facilita el proceso de absorción y regeneración del refrigerante en el ciclo. Además, su alta capacidad calorífica contribuye a la estabilidad térmica del sistema. La interacción entre ambos fluidos permite que el proceso de absorción se lleve a cabo de manera eficiente, aunque el sistema requiere un rectificador para evitar que el agua se evapore junto con el amoníaco y afecte el rendimiento del condensador. En conjunto, estas propiedades permiten que el sistema $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ opere de manera efectiva en un amplio rango de temperaturas y aplicaciones, aunque su funcionamiento a altas presiones implica un diseño robusto y materiales resistentes para garantizar su seguridad y eficiencia.

2.3.3 Variantes del sistema de refrigeración por absorción

Existen diversos tipos de sistemas de refrigeración por absorción según el ciclo que emplean. El enfoque principal del trabajo estará en los sistemas de absorción por difusión (DAR), ya que los equipos con los que se realizará la fase experimental funcionan mediante dicho sistema. No obstante, en este apartado se abordarán otras variantes de ciclos de absorción para proporcionar un contexto más amplio. Entre estas variantes se encuentran los sistemas basados en absorción-resorción, configuraciones de especial interés dentro de la tecnología de refrigeración por absorción.

- Absorción-Resorción

El sistema de refrigeración por absorción-resorción es una tecnología que emplea mezclas de amoníaco y agua como fluidos de trabajo. A diferencia de los sistemas de absorción tradicionales, incorpora dos circuitos interconectados: uno de absorción y otro de resorción. Esta configuración ofrece (véase Figura 2-12) una mayor versatilidad en la operación, reduce las presiones de trabajo y permite el uso de materiales más accesibles y de menor costo.

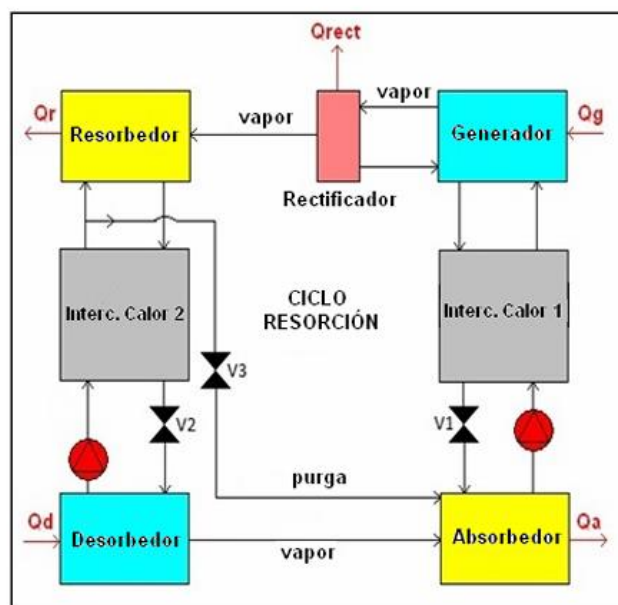


Figura 2-12 Ciclo de Absorción-Resorción [22]

Estos circuitos acoplados son: el circuito de absorción (positivo) y el circuito de resorción (negativo). En el circuito de absorción, el vapor refrigerante procedente del desorbedor es absorbido en el absorbedor por una mezcla pobre en amoníaco, liberando calor. La solución rica en amoníaco resultante es bombeada al generador, donde se calienta para separar el amoníaco del agua. Si es necesario, el vapor pasa por un rectificador para ajustar su concentración antes de enviarlo al resorbedor. La solución pobre que queda tras la generación de vapor regresa al absorbedor, pasando previamente por un intercambiador de calor para recuperar energía [22].

Por otro lado, en el circuito de resorción, el vapor procedente del generador es absorbido en el resorbedor por una solución pobre en amoníaco, liberando calor. La solución enriquecida resultante se enfría en un intercambiador de calor y luego pasa por una válvula de expansión antes de llegar al desorbedor. En esta etapa, se aporta calor para evaporar nuevamente el amoníaco, generando el efecto frigorífico. El vapor producido regresa al absorbedor del circuito positivo, cerrando así el ciclo.

Este diseño reemplaza los condensadores y evaporadores tradicionales por un resorbedor y un desorbedor, lo que permite mayor flexibilidad operativa y menores presiones de trabajo. Además, las presiones no dependen exclusivamente de las temperaturas de condensación y evaporación, sino también de la composición de las soluciones. Esto reduce las demandas estructurales sobre los materiales, permitiendo usar componentes más económicos como intercambiadores poliméricos. Este enfoque ofrece ventajas significativas en términos de diseño y eficiencia para aplicaciones específicas que buscan aprovechar fuentes de calor residual o reducir costos [30].

Las principales diferencias entre los sistemas de Absorción-Resorción y los convencionales aparecen reflejados en la siguiente tabla:

Característica	Absorción Convencional	Absorción-Resorción
Fluido refrigerante	Compuesto puro (ej. amoníaco)	Mezcla binaria (amoníaco-agua)
Componentes principales	Generador, absorbedor, condensador, evaporador	Generador, absorbedor, desorbedor, resorbedor
Presión de trabajo	Alta presión dependiente de temperaturas de condensación y evaporación	Menores presiones gracias a la composición variable de la mezcla
Flexibilidad operativa	Limitada	Mayor flexibilidad al ajustar composición y condiciones
Eficiencia (COP)	0.6 - 0.8	Ligeramente menor debido a irreversibilidades
Materiales constructivos	Requiere materiales resistentes a altas presiones	Permite usar materiales más económicos como polímeros

Tabla 2-1 Diferencias entre Absorción-Resorción y convencionales [Elaboración propia]

Observando estos datos podemos valorar ventajas en términos de flexibilidad y materiales más económicos, pero con una eficiencia ligeramente menor en comparación con los sistemas convencionales.

2.4 Sistemas de Difusión-Absorción

2.4.1 Principios de funcionamiento

Un sistema de refrigeración de Difusión-Absorción, conocido como sistema DAR ("Diffusion Absorption Refrigeration"), funciona prácticamente igual que uno convencional, mediante un ciclo termodinámico, representado en la Figura 2-13, que utiliza una mezcla binaria de fluidos (amoníaco y agua son los más comunes) y un gas auxiliar (generalmente hidrógeno o helio) para generar frío. Este sistema puede operar sin necesidad de un compresor mecánico, sustituyéndolo por una bomba de burbuja activada térmicamente. Tampoco empleará válvulas de expansión pues su principio de funcionamiento se basa en la ley de Dalton de las presiones parciales, que establece que la presión total en un sistema, es la suma de las presiones parciales de sus componentes. Este principio permite reducir la presión del refrigerante en el evaporador, lo que facilita la evaporación a bajas temperaturas y genera el efecto frigorífico [31].

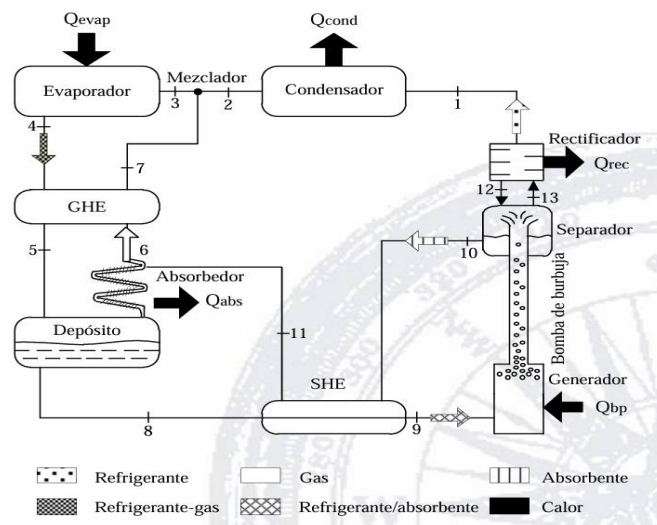


Figura 2-13 Ciclo de Difusión-Absorción [20]

El ciclo comienza en el generador, donde se suministra energía térmica para calentar una solución rica en refrigerante que proviene del depósito. Este calentamiento provoca la vaporización del refrigerante, formando burbujas que ascienden a través de la bomba de burbuja, arrastrando consigo una pequeña cantidad de líquido. A medida que el refrigerante se separa, la solución restante, ahora empobrecida, es conducida hacia un intercambiador de calor, donde transfiere parte de su energía térmica a la solución rica entrante, optimizando así la eficiencia del sistema antes de ser enviada al absorbedor [20].

Simultáneamente, el vapor de refrigerante se desplaza hacia el condensador, donde cede su calor latente al ambiente o a un sistema de disipación térmica en un proceso exotérmico, lo que provoca su transición a estado líquido. Este refrigerante condensado se mezcla con el gas auxiliar e ingresa al evaporador, donde el gas inerte reduce la presión parcial del refrigerante, permitiendo que este se evapore a temperaturas considerablemente más bajas [20]. Durante la evaporación, el refrigerante absorbe calor del entorno o del compartimento que se desea enfriar, generando así el efecto frigorífico. Este proceso permite mantener el ciclo en funcionamiento sin necesidad de compresores mecánicos, utilizando únicamente la energía térmica para su operación.

La mezcla de gas inerte y amoníaco en fase vapor sale del evaporador y se dirige hacia el depósito antes de iniciar su ascenso a través del absorbedor. En esta etapa, como se ilustra en la Figura 2-14, el agua que previamente se separó de la disolución en el generador desciende hasta la parte superior del absorbedor, mientras que la mezcla de amoníaco e hidrógeno asciende desde la parte inferior del sistema. Este flujo contrapuesto permite que el amoníaco en estado gaseoso sea absorbido gradualmente por la solución de agua que desciende, formando nuevamente una disolución rica en amoníaco [32].

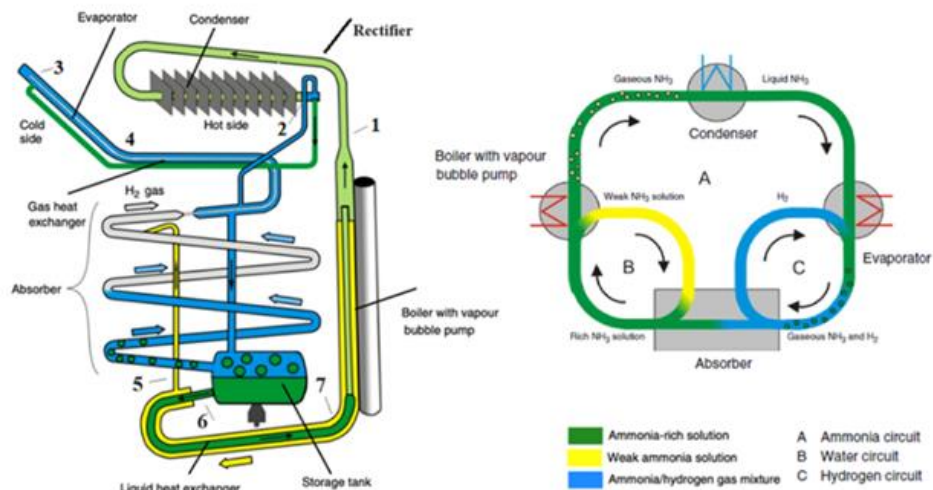


Figura 2-14 Fluidos de trabajo [33]

Durante este proceso de absorción, el hidrógeno, al no ser soluble en agua, se separa de la mezcla y asciende hasta la parte superior del absorbedor. Desde allí, el gas inerte regresa al evaporador, donde volverá a cumplir su función de reducir la presión parcial del refrigerante y facilitar su evaporación a bajas temperaturas. Mientras tanto, la solución enriquecida en amoníaco desciende y es redirigida nuevamente al depósito, donde se reinicia el ciclo [34].

Con el objetivo de mejorar el rendimiento del proceso de absorción, el absorbedor suele diseñarse incorporando intercambiadores de calor o superficies ampliadas que favorecen la disipación del calor liberado durante la absorción del amoníaco en el agua. Esta eliminación del calor es un aspecto crucial, ya que la absorción es un proceso de naturaleza exotérmica, y la acumulación de energía térmica en el sistema podría disminuir significativamente la eficacia de la solución absorbente. Para evitar este efecto, se recurre a configuraciones que promueven un flujo térmico en contracorriente y un control preciso de la temperatura en todo momento. De este modo, se logra mantener condiciones óptimas para la absorción, facilitando la recuperación continua del refrigerante. Este equilibrio térmico no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también contribuye a una operación más estable y prolongada del ciclo de refrigeración por absorción-difusión [35].

Las principales diferencias entre estos sistemas aparecen reflejadas en la siguiente tabla:

Característica	Absorción convencional	Difusión-absorción (DAR)
Fuente de energía	Calor + bomba eléctrica	Calor
Niveles de presión	Alta y Baja	Presión única
Circulación del refrigerante	Bomba mecánica	Bomba de burbuja térmica
Regulación de presión	Válvula de expansión	Gas inerte (H_2 o He)
Eficiencia (COP)	0.6 - 0.8	0.2 - 0.3

Tabla 2-2 Diferencias entre sistemas DAR y convencionales [Elaboración propia]

Como conclusión, podemos afirmar que los sistemas DAR sacrifican eficiencia a cambio de mayor simplicidad, menor tamaño y la capacidad de funcionar solo con calor, lo que los hace adecuados para aplicaciones específicas donde no se dispone de electricidad.

2.4.1.1 Componentes del sistema y análisis de las diferentes fases

Los componentes que integran los sistemas de refrigeración por absorción pueden diferir según la tecnología específica utilizada. No obstante, muchos de estos elementos son comunes a las distintas variantes de este tipo de sistema. En este apartado, se abordará exclusivamente la configuración del sistema DAR analizando cómo se desarrolla cada fase del ciclo según el componente que participa en el proceso.

El ciclo de refrigeración por absorción por difusión (DAR) es una tecnología térmica sin partes móviles, que opera utilizando únicamente energía térmica para activar la circulación de los fluidos. En este sistema se utilizan diferentes componentes fundamentales que posibilitan el correcto funcionamiento del circuito que se analizarán a continuación.

- Generador

El generador es el punto de inicio del ciclo de refrigeración por absorción-difusión (DAR). Su función principal es suministrar calor a la solución rica en amoníaco (o el refrigerante empleado) para provocar la desorción del refrigerante de la solución. Este proceso permite separar el amoníaco del agua y generar una mezcla bifásica de vapor y líquido, la cual se transportará a la bomba de burbuja.

El calor aplicado al generador puede provenir de diversas fuentes térmicas, incluyendo electricidad, gas o fuentes renovables como la energía solar. La eficiencia del generador tiene un impacto directo en la eficiencia global del sistema, ya que la cantidad de amoníaco vaporizado determina el rendimiento posterior del ciclo [36].

El balance de masa asegura que la cantidad de solución rica que entra al generador se distribuye en dos flujos: refrigerante vaporizado y solución empobrecida [37].

Se expresa como:

$$\dot{m}_{\{solución\ richa\}} = \dot{m}_{\{vapor\}} + \dot{m}_{\{solución\ pobre\}}$$

$\dot{m}_{\{solución\ richa\}}$ → Masa de la solución rica en refrigerante que entra al generador.

$\dot{m}_{\{vapor\}}$ → Masa del refrigerante vaporizado que sale del generador.

$\dot{m}_{\{solución\ pobre\}}$ → Masa de la solución empobrecida que queda después de la desorción.

Respecto al balance de energía, establece que el calor suministrado al generador se reparte en incrementar la entalpía de la solución rica y proporcionar el calor latente necesario para la vaporización [37]. Se expresa como:

$$\dot{Q}_{\{gen\}} = \dot{m}_{\{solución\ richa\}} h_{\{solución\ richa\}} - \dot{m}_{\{solución\ pobre\}} h_{\{solución\ pobre\}} - \dot{m}_{\{vapor\}} h_{\{vapor\}}$$

$\dot{Q}_{\{gen\}}$ → Calor suministrado al generador.

$h_{\{solución\ richa\}}$ → Entalpía de la solución rica en refrigerante.

$h_{\{solución\ pobre\}}$ → Entalpía de la solución empobrecida que sale del generador.

$h_{\{vapor\}}$ → Entalpía del refrigerante vaporizado.

El generador desempeña un papel fundamental en el ciclo DAR, ya que regula la cantidad de refrigerante que se vaporiza. Una configuración optimizada, con un control preciso de la temperatura, la

concentración y la recuperación de calor, puede potenciar el desempeño del sistema y elevar su eficiencia.

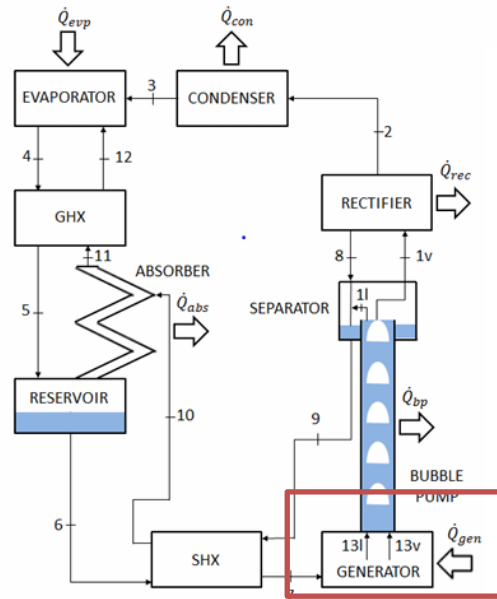


Figura 2-15 Generador DAR

- Bomba de burbuja

La bomba de burbuja es el componente que permite la circulación del fluido sin necesidad de partes mecánicas móviles. Su funcionamiento se basa en la generación de burbujas de vapor dentro de la solución líquida en el generador, las cuales ascienden y arrastran consigo el fluido, impulsándolo a través del sistema. Este efecto de bombeo se produce debido a la diferencia de densidades entre la fase líquida y la fase gaseosa, lo que genera un flujo ascendente en el tubo elevador [36].

El balance de masa en la bomba de burbuja se expresa como:

$$\{m\}_{\text{entrada}} = \{m\}_{\text{salida líquida}} + \{m\}_{\text{salida vapor}}$$

$\{m\}_{\text{entrada}}$ → Masa total del fluido que ingresa a la bomba de burbuja.

$\{m\}_{\text{salida líquida}}$ → Masa de la solución líquida que sale de la bomba

$\{m\}_{\text{salida vapor}}$ → Masa del refrigerante vaporizado que se separa y continúa en el ciclo.

Respecto al balance de energía, se considera que la bomba de burbuja transforma parte del calor (o energía interna) en energía de movimiento, impulsando el flujo del fluido. Este balance se puede expresar de la siguiente manera [36], [37]:

$$\{Q\}_{\text{bomba}} = \{m\}_{\text{entrada}} h_{\text{entrada}} - \{m\}_{\text{salida líquida}} h_{\text{salida líquida}} - \{m\}_{\text{salida vapor}} h_{\text{salida vapor}}$$

$\{Q\}_{\text{bomba}}$ → Energía o calor asociado al proceso de bombeo en la bomba de burbuja.

h_{entrada} → Entalpía del fluido que ingresa a la bomba.

$h_{\{salida\ líquida\}}$ → Entalpía de la solución líquida que sale de la bomba.

$h_{\{salida\ vapor\}}$ → Entalpía del refrigerante vaporizado que se separa en esta etapa.

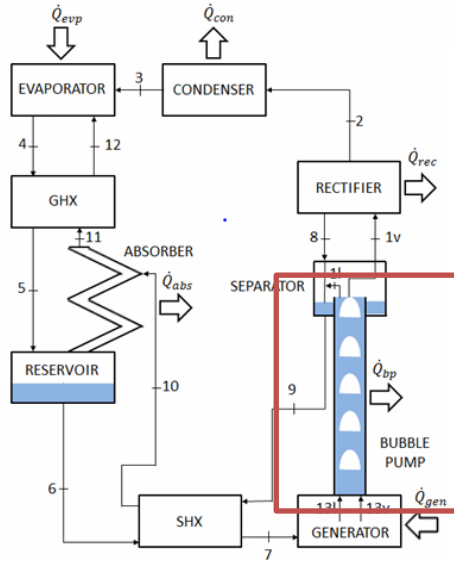


Figura 2-16 Bomba de burbuja DAR

La bomba de burbuja aprovecha el ascenso de las burbujas de vapor para generar un flujo pasivo que mueve la solución y el refrigerante dentro del ciclo DAR, siendo fundamental para la circulación sin partes móviles y, por tanto, para la eficiencia global del sistema.

- Rectificador

El rectificador es un componente cuya función principal es eliminar cualquier cantidad de absorbente (agua en el caso de sistemas amoníaco-agua) que pueda haberse arrastrado con el vapor de refrigerante. Este proceso es esencial, ya que la presencia de absorbente en el refrigerante puede afectar la eficiencia del ciclo y reducir la capacidad de enfriamiento del evaporador.

En el rectificador, el vapor de refrigerante procedente de la bomba de burbuja y el generador se enfría parcialmente, permitiendo la condensación del absorbente antes de que el refrigerante continúe su trayecto hacia el condensador. Para lograr esto, el rectificador se diseña como un intercambiador de calor, donde se disipa calor al ambiente o hacia otra corriente del sistema, asegurando que el refrigerante llegue lo más puro posible a las siguientes etapas del ciclo. El balance de masa en el rectificador se expresa como [36] [37]:

$$\{m\}_{\{entrada\}} = \{m\}_{\{refrigerante\}} + \{m\}_{\{absorbente\}}$$

$\{m\}_{\{entrada\}}$ → Masa del flujo bifásico que ingresa al rectificador desde la bomba de burbuja.

$\{m\}_{\{refrigerante\}}$ → Masa del refrigerante purificado que sale del rectificador hacia el condensador.

$\{m\}_{\{absorbente\}}$ → Masa del absorbente condensado que retorna al generador.

En el balance de energía, el rectificador transfiere calor desde el flujo bifásico hacia el ambiente o hacia otra parte del sistema. Matemáticamente, este balance se expresa como [37]:

$$\{Q\}_{\{rect\}} = \{m\}_{\{entrada\}}h_{\{entrada\}} - \{m\}_{\{refrigerante\}}h_{\{refrigerante\}} - \{m\}_{\{absorbente\}}h_{\{absorbente\}}$$

$\{Q\}_{\{rect\}} \rightarrow$ Calor disipado en el rectificador.

$h_{\{entrada\}} \rightarrow$ Entalpía del flujo bifásico que ingresa al rectificador.

$h_{\{refrigerante\}} \rightarrow$ Entalpía del refrigerante purificado que sale del rectificador.

$h_{\{absorbente\}} \rightarrow$ Entalpía del absorbente condensado que retorna al generador.

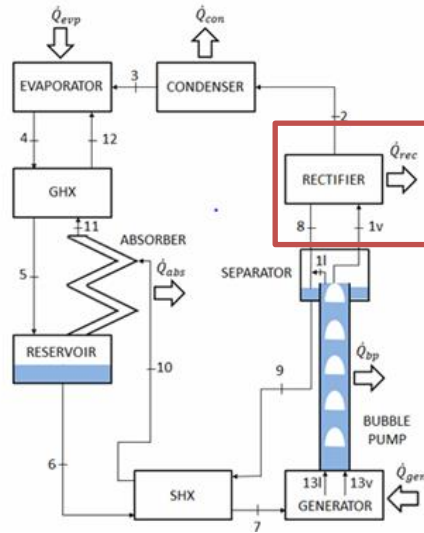


Figura 2-17 Rectificador DAR

El rendimiento del rectificador depende de varios factores, como la temperatura de entrada del flujo bifásico, la capacidad de transferencia de calor del intercambiador y la eficiencia en la eliminación del absorbente. Un diseño optimizado permite mejorar la pureza del refrigerante y, por ende, aumentar la eficiencia del evaporador. La implementación de estrategias de control térmico y el uso de intercambiadores de calor adecuados pueden reducir la pérdida de eficiencia en esta etapa y mejorar el rendimiento general del sistema.

- Condensador

Su función principal es eliminar el calor del refrigerante vaporizado para provocar su condensación y transformarlo en líquido. En esta etapa, el refrigerante que proviene del rectificador libera su calor latente al medio ambiente o a un sistema de disipación térmica, logrando así la transición de fase de gas a líquido. Este proceso es fundamental, ya que prepara al refrigerante en su estado líquido para ingresar al evaporador y generar el efecto de enfriamiento.

El condensador generalmente está compuesto por una serie de tubos o aletas de intercambio térmico que permiten disipar el calor de manera eficiente. Dependiendo del diseño del sistema, la disipación de calor puede realizarse por convección natural, forzada o mediante un intercambiador de calor con agua. El balance de masa en el condensador se representa como [37]:

$$\{m\}_{\{entrada\}} = \{m\}_{\{salida\}}$$

$\{m\}_{\{entrada\}} \rightarrow$ Masa del refrigerante en estado gaseoso que ingresa al condensador.

$\{m\}_{\{salida\}} \rightarrow$ Masa del refrigerante en estado líquido que sale del condensador.

En el balance de energía, el condensador libera el calor latente del refrigerante para inducir su condensación. Se representa mediante la siguiente ecuación [37]:

$$\{Q\}_{\{cond\}} = \{m\}_{\{entrada\}} (h_{\{entrada\}} - h_{\{salida\}})$$

$\{Q\}_{\{cond\}} \rightarrow$ Calor disipado en el condensador.

$h_{\{entrada\}} \rightarrow$ Entalpía del refrigerante en estado gaseoso al ingresar al condensador.

$h_{\{salida\}} \rightarrow$ Entalpía del refrigerante en estado líquido tras la condensación.

El rendimiento del condensador depende de la capacidad de disipación térmica del sistema. Un diseño eficiente con un área de intercambio de calor adecuada y una correcta selección del medio de enfriamiento puede mejorar la eficiencia del proceso de condensación y optimizar el rendimiento global del ciclo DAR. El empleo de ventiladores en condensadores de aire o el enfriamiento por agua en intercambiadores de calor permite mejorar la disipación del calor y reducir la temperatura del refrigerante antes de su ingreso al evaporador [36].

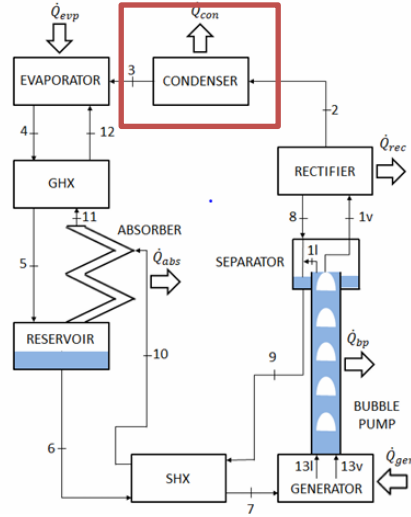


Figura 2-18 Condensador DAR

- Evaporador

El evaporador es el encargado de generar el efecto de enfriamiento. Su función principal es permitir que el refrigerante líquido proveniente del condensador se evapore al entrar en contacto con el gas inerte, lo que provoca una reducción en la presión parcial del refrigerante y facilita su evaporación a baja temperatura. Durante este proceso, el refrigerante absorbe calor del entorno o de la carga térmica, enfriando el espacio deseado.

Este fenómeno ocurre debido a la presencia del gas inerte, que distribuye la presión total dentro del evaporador y permite que el refrigerante hierva a temperaturas menores sin necesidad de una expansión mecánica, como en los sistemas de compresión. Su balance de masa se expresa de la siguiente manera [37]:

$$\{m\}_{\{entrada\}} = \{m\}_{\{salida\}}$$

$\{m\}_{\{entrada\}} \rightarrow$ Masa del refrigerante líquido que ingresa al evaporador desde el condensador.

$\{m\}_{\{salida\}}$ → Masa del refrigerante evaporado que sale del evaporador hacia el absorbedor junto con el gas inerte.

El balance de energía en el evaporador considera la cantidad de calor absorbida por el refrigerante durante su evaporación. Se expresa como [37] [36]:

$$\{Q\}_{\{evap\}} = \{m\}_{\{entrada\}}(h_{\{salida\}} - h_{\{entrada\}})$$

$\{Q\}_{\{evap\}}$ → Calor absorbido por el evaporador.

$h_{\{entrada\}}$ → Entalpía del refrigerante en estado líquido antes de la evaporación.

$h_{\{salida\}}$ → Entalpía del refrigerante en estado gaseoso después de la evaporación.

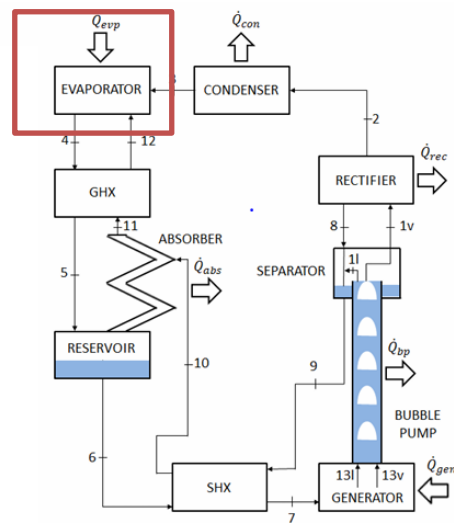


Figura 2-19 Evaporador DAR

El rendimiento del evaporador está influenciado por la temperatura del gas inerte, la presión parcial del refrigerante y el área de intercambio térmico. Para mejorar la eficiencia del sistema, se pueden implementar estrategias como el uso de un “serpentin” para alargar la entrada del refrigerante dentro del frigorífico y que de este modo este entre a menor temperatura en el evaporador y maximizar la capacidad de enfriamiento.

- Absorbedor

Su función principal es recuperar el refrigerante en fase gaseosa y disolverlo nuevamente en la solución absorbente. Durante este proceso, el gas inerte (por ejemplo, hidrógeno) que acompañaba al refrigerante en el evaporador se separa, permitiendo que el refrigerante se mezcle con la solución pobre proveniente del generador. Este proceso de absorción libera calor, el cual debe ser disipado para mantener la eficiencia del sistema. El funcionamiento del absorbedor depende de la capacidad de la solución absorbente para captar el refrigerante en fase gaseosa, lo que está influenciado por factores como la temperatura de la solución, la presión en el absorbedor y la concentración del refrigerante en la solución absorbente. Un absorbedor bien diseñado garantiza que la solución enriquecida pueda regresar al generador con la máxima cantidad de refrigerante posible, mejorando así la eficiencia del ciclo. El balance de masa en el absorbedor se expresa como:

$$\{m\}_{\{refrigerante\}} + \{m\}_{\{solución\ pobre\}} = \{m\}_{\{solución\ rica\}}$$

$\{m\}_{\text{refrigerante}} \rightarrow$ Masa del refrigerante en fase gaseosa que ingresa al absorbedor.

$\{m\}_{\text{solución pobre}} \rightarrow$ Masa de la solución pobre que proviene del generador.

$\{m\}_{\text{solución rica}} \rightarrow$ Masa de la solución rica que sale del absorbedor hacia el generador.

El balance de energía en el absorbedor considera la energía liberada durante el proceso de absorción del refrigerante en la solución. Se expresa como:

$$\{Q\}_{\text{abs}} = \{m\}_{\text{refrigerante}} h_{\text{refrigerante}} + \{m\}_{\text{solución pobre}} h_{\text{solución pobre}} - \{m\}_{\text{solución rica}} h_{\text{solución rica}}$$

$\{Q\}_{\text{abs}} \rightarrow$ Calor liberado en el absorbedor.

$h_{\text{refrigerante}} \rightarrow$ Entalpía del refrigerante en fase gaseosa antes de la absorción.

$h_{\text{solución pobre}} \rightarrow$ Entalpía de la solución pobre antes de mezclarse con el refrigerante.

$h_{\text{solución rica}} \rightarrow$ Entalpía de la solución rica después de la absorción.

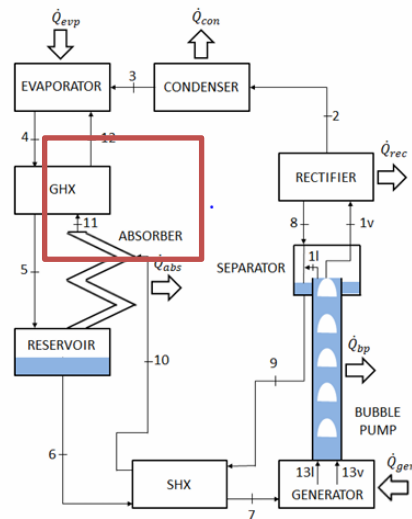


Figura 2-20 Absorbedor DAR

El correcto funcionamiento del absorbedor se basa en la capacidad de disipación de calor, ya que la absorción del refrigerante en la solución es un proceso exotérmico. Para mejorar la eficiencia del sistema, se debe considerar el uso de intercambiadores de calor adicionales o un diseño optimizado que maximice la transferencia de masa y energía dentro del absorbedor. Esto permite que el ciclo funcione de manera eficiente, asegurando la correcta recirculación del refrigerante.

3 METODOLOGÍA

3.1 Diseño Experimental

3.1.1 Objetivos del estudio

El propósito principal de este estudio experimental es evaluar el desempeño energético de dos sistemas de refrigeración por difusión-absorción, examinando su comportamiento bajo diversas condiciones operativas. Se analizará la respuesta de estos sistemas frente a diferentes situaciones, como la introducción de distintas fuentes térmicas dentro de los refrigeradores.

La investigación se enfocará específicamente en dos modelos de neveras fabricadas por “ananké” y “Electrolux”, que comparten características similares en sus circuitos de refrigeración. Se realizará una evaluación simultánea de ambos sistemas para identificar tanto sus puntos en común como sus diferencias operativas.

El objetivo final es no solo comprender a fondo el funcionamiento de estos sistemas, sino también descubrir oportunidades para mejorar su eficiencia. Se busca optimizar su rendimiento energético, explorando posibles modificaciones o ajustes que puedan incrementar su efectividad y reducir su consumo de energía.

3.1.2 Material empleado

Para llevar a cabo este estudio se empleará un conjunto de instrumentos y materiales esenciales, aunque relativamente básicos. El equipamiento principal consiste en dos medidores de potencia, que permitirán cuantificar y comparar el consumo energético de cada nevera con precisión. Además, se utilizará una serie de sensores de temperatura estratégicamente colocados para monitorear diversos puntos críticos del sistema. Estos sensores medirán la temperatura ambiente, la temperatura interna de las neveras, la temperatura a la entrada del condensador y la temperatura dentro de la bomba de burbujas, además de otros puntos relevantes del circuito que se consideren necesarios, proporcionando así una visión completa del funcionamiento de ambos sistemas.

Como complemento a estos instrumentos de medición, se incorporarán elementos externos, como placas de aluminio o fuentes de calor. Las placas se utilizarán para modificar la temperatura del circuito en determinados puntos del ciclo, siendo su función principal la de disipar calor, permitiendo evaluar la respuesta de los sistemas bajo diversas condiciones operativas. La introducción de fuentes de calor en el

interior de los frigoríficos se realizará con el fin de evaluar la capacidad de enfriamiento de cada sistema. Este método permitirá observar y analizar cómo los frigoríficos responden ante cargas térmicas de distintas magnitudes.



Figura 3-1 Elementos de la fase experimental

Aunque el material empleado es relativamente simple, su selección y disposición están diseñadas para proporcionar datos relevantes sobre el rendimiento energético y la capacidad de enfriamiento de ambos sistemas de refrigeración.

3.2 Descripción de los equipos frigoríficos

Los equipos con los que se llevará a cabo el trabajo corresponden a dos frigoríficos de absorción de pequeña capacidad, ambos del modelo RH 430LD. Uno ha sido fabricado por "Electrolux" y el otro por "ananké", por lo que se emplearán dichas denominaciones para distinguirlos con mayor claridad. No obstante, es importante señalar que el fabricante original de este modelo es la empresa "Dometic" (anteriormente conocida como "Electrolux"), la cual delega la producción de sus unidades a empresas subcontratadas, entre ellas "ananké". En consecuencia, toda consulta de índole técnica deberá remitirse a la documentación proporcionada por "Dometic".

3.2.1 Frigorífico "Electrolux"

Este frigorífico opera mediante un ciclo de difusión-absorción basado en la combinación de amoníaco, agua e hidrógeno como par de trabajo. Corresponde a uno de los primeros modelos RH 430LD y comparte características típicas de este tipo de sistemas.

Entre sus especificaciones principales, cuenta con una capacidad de 30 litros, un consumo energético de 65W y un fluido de refrigeración compuesto por 90 gramos de amoníaco (NH_3) y 4,3 gramos de cromato de sodio (Na_2CrO_4), este último empleado como anticorrosivo (la cantidad de agua no aparece especificada). Además, el sistema opera con una presión máxima de 35 bar, información que puede verificarse en la etiqueta del producto en la Figura 3-2.

Es interesante que incluya un elemento anticorrosivo en su ciclo, especialmente considerando que el amoníaco es altamente corrosivo en presencia de ciertos metales. Este detalle evidencia una especial precaución en el diseño, dado que los conductos del sistema están fabricados en acero. La incorporación del anticorrosivo sugiere un enfoque preventivo para alargar la vida útil del sistema y evitar posibles fallos por corrosión interna aunque a pesar de ello a veces puede causar anomalías (véase apartado 4.4.3)

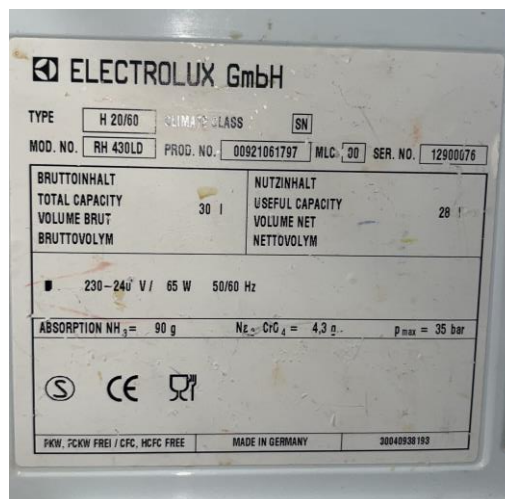


Figura 3-2 Características de "Electrolux"

El circuito y sus diversos componentes pueden visualizarse en la parte trasera del frigorífico en la Figura 3-3, salvo el evaporador, que se encuentra en el interior del equipo, mostrado en la Figura 3-4.

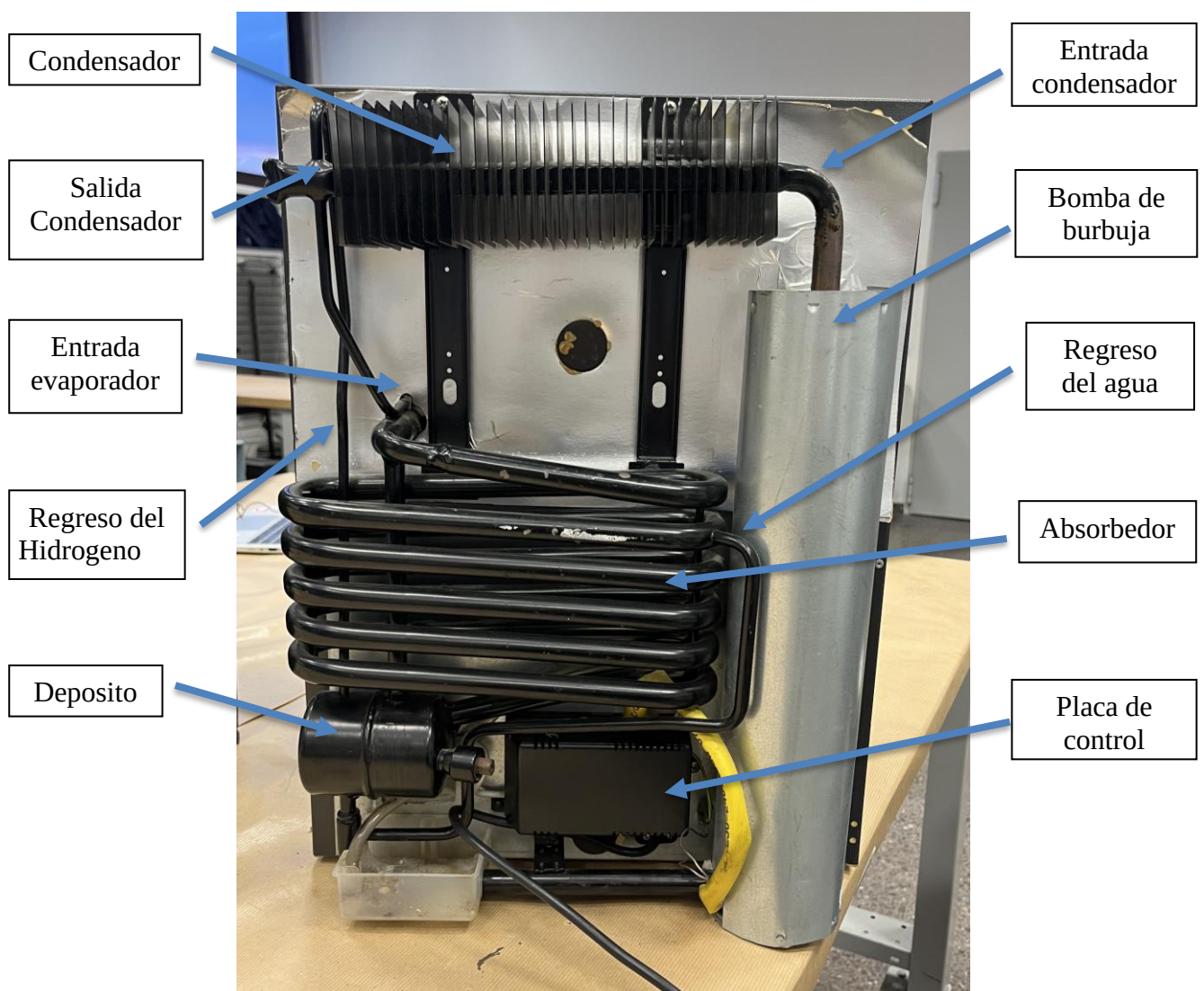


Figura 3-3 Frigorífico "Electrolux"



Figura 3-4 Evaporador "Electrolux"

En este equipo, un aspecto destacable es la ubicación de la entrada del evaporador en comparación con el frigorífico "ananké". En este caso, el amoníaco ingresa al evaporador inmediatamente después de atravesar el conducto desde la parte trasera del equipo, lo que evita que se enfríe en exceso antes de entrar en el sistema de evaporación. En contraste, en el frigorífico "ananké", el recorrido del amoníaco es distinto, como se detallará en el siguiente apartado.

Asimismo, dentro del equipo se encuentra el termostato, el cual está conectado a la placa de control. Su función es gestionar la energía suministrada a la resistencia, interrumpiéndola cuando sea necesario para regular el ciclo de refrigeración y mantener la temperatura de consigna. Cuando se requiere reducir nuevamente la temperatura, el sistema restablece el suministro de energía de manera automática. La temperatura de consigna es determinada por el regulador, que se presenta en forma de una rueda de ajuste. A través de este mecanismo, el usuario puede incrementar o disminuir la temperatura deseada, permitiendo un control preciso del funcionamiento del frigorífico.



Figura 3-5 Resistencia "Electrolux"

La bomba de burbujas está compuesta por una estructura cilíndrica metálica, en cuyo interior se encuentra un material aislante que rodea el conducto por donde circula la mezcla de amoníaco y agua. Es en esta sección donde comienza la formación de burbujas de amoníaco, proceso clave dentro del sistema de refrigeración. Dentro del aislamiento se aloja una resistencia eléctrica, controlada por la placa de control, cuya función es calentar el conducto hasta alcanzar la temperatura óptima para el proceso de evaporación del amoníaco. Con el propósito de analizar su funcionamiento interno, en este equipo se ha procedido al desmontaje de la bomba de burbujas, lo que ha permitido observar y examinar su estructura interna, reflejada en la Figura 3-5.



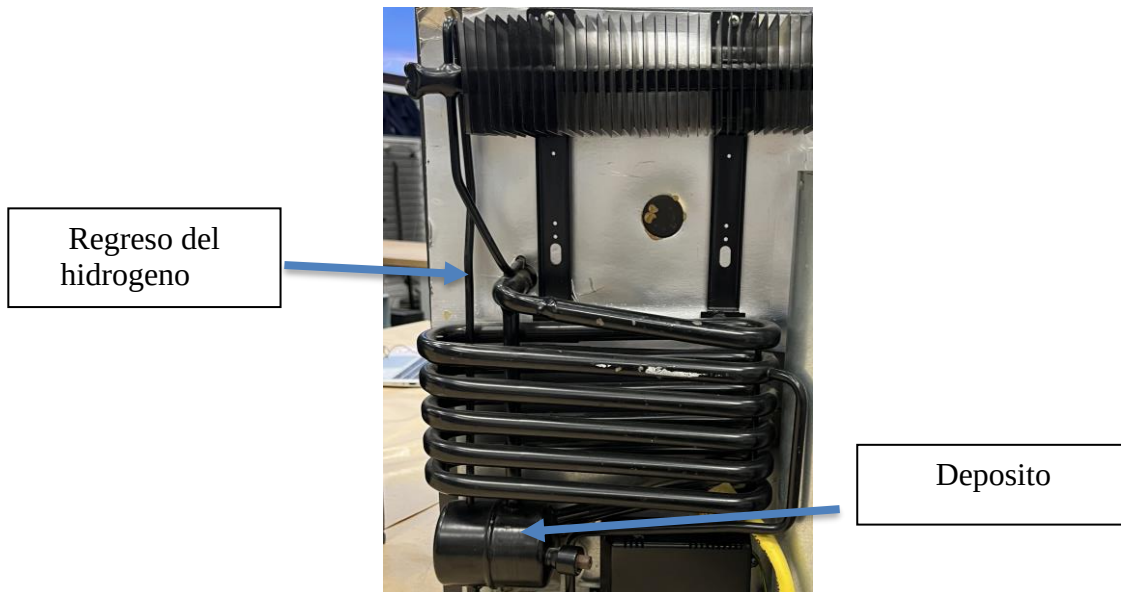
Figura 3-6 Entrada de condensador "Electrolux"

En este refrigerador, el conducto que sale de la bomba de burbujas se dirige directamente hacia el condensador (Figura 3-6), sin atravesar un rectificador o "trampa térmica", a diferencia del frigorífico "ananké". En este último, se incorpora una serpentina entre la salida del generador y el condensador, cuya función es disipar el exceso de calor y garantizar que únicamente el amoníaco ingrese al condensador, evitando la presencia de agua en el sistema.

Esta configuración se debe a que este equipo pertenece a una de las primeras versiones del modelo RH 430LD, en las cuales aún no se incorporaba un intercambiador de calor. En su diseño original, se confiaba en el correcto desempeño del circuito sin la necesidad de este componente, lo que representa un riesgo adicional. La posible entrada de agua en el condensador podría comprometer tanto la eficiencia del sistema como su adecuado funcionamiento.

Asimismo, la anomalía detectada en este ciclo podría estar parcialmente relacionada con un flujo inadecuado hacia el condensador, lo que afectaría el rendimiento del proceso de refrigeración.

Es importante mencionar el conducto de regreso de hidrógeno, el cual es esencial para mantener el flujo continuo de este gas desde el absorbedor hasta el evaporador. Su papel es asegurar que, después de que el amoníaco se combine de nuevo con el agua y se reinicie el ciclo, el hidrógeno retorne al evaporador para mantener la presión baja necesaria y permitir la evaporación adecuada del amoníaco. Esta recirculación es lo que hace posible que la nevera de absorción funcione de manera eficiente sin compresores mecánicos. En este equipo, presenta un diseño distinto (Figura 3-7) en cuanto al punto de extracción de hidrógeno, ya que lo normal es que este se encuentre al final del absorbedor, como es el caso del refrigerador "ananké".



**Figura 3-7 Conducto de regreso de Hidrogeno
"Electrolux"**

En el modelo "Electrolux", el tubo de retorno se conecta directamente al depósito del circuito, donde el hidrógeno se separa de manera pasiva por acumulación en la parte superior, aprovechando la diferencia de densidades. Sin embargo, dado que proviene de una zona con presencia residual de líquidos y vapores, la separación no es completamente pura, aunque el diseño debe compensar esta limitación.

3.2.2 Frigorífico "ananké"

Este equipo opera también mediante un ciclo de difusión-absorción basado en la combinación de amoníaco, agua e hidrógeno como par de trabajo. Corresponde a uno de los modelos posteriores RH 430LD, es por ello que presenta algunas diferencias con el diseño del circuito "Electrolux" explicado con anterioridad.

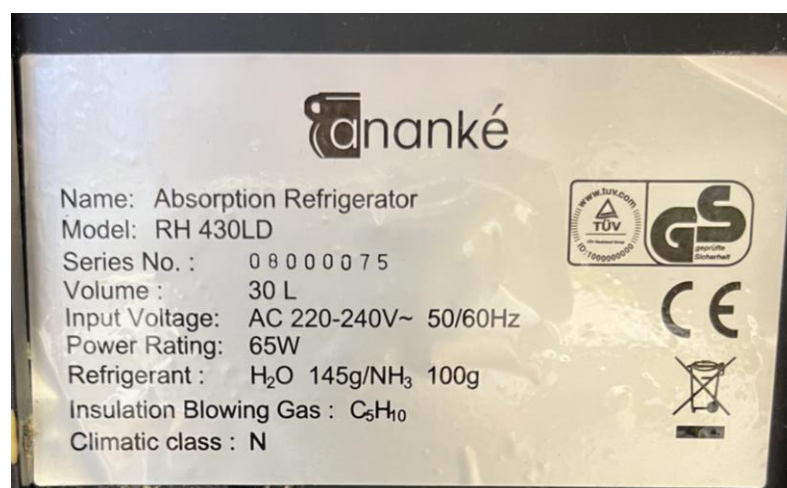


Figura 3-8 Características de "ananké"

Respecto a las características del equipo (Figura 3-8), se trata de un frigorífico con una capacidad de 30 litros y un consumo energético de 65W. Para lograr el efecto refrigerante se emplea una mezcla de 145 gramos de agua y 100 gramos de amoníaco. Además, el material aislante presente en las paredes

de la nevera contiene pentano (C_5H_{10}) como gas inyectado, el cual contribuye a mejorar el aislamiento térmico del equipo.

El circuito de este equipo y los elementos que lo componen se pueden observar en la parte trasera del refrigerador, en la Figura 3-9, salvo el evaporador, que se encuentra en interior del equipo, en la Figura 3-10.

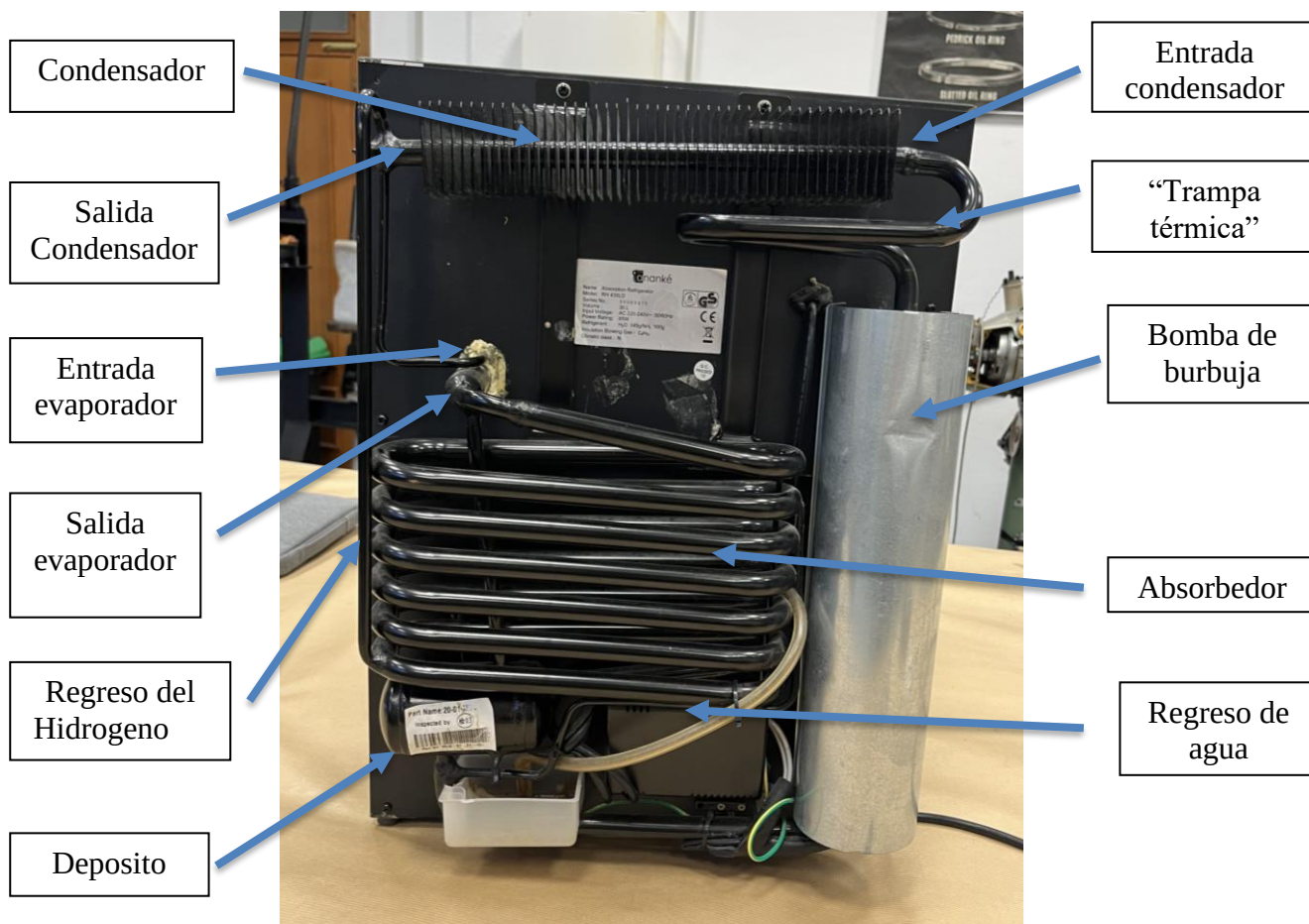


Figura 3-9 Frigorífico "ananké"



Figura 3-10 Evaporador "ananké"

El diseño del evaporador presenta una modificación en su estructura, ya que la entrada del amoníaco se extiende en forma de serpentina paralela al evaporador, lo que permite que el refrigerante ingrese a una temperatura más baja. Esta configuración mejora la eficiencia del circuito, ya que cuanto más frío entra el amoníaco en el evaporador, mayor es la cantidad de calor que puede absorber por gramo de refrigerante, optimizando así el rendimiento del sistema de refrigeración.



Figura 3-11 Interior de "ananké"

En el interior del refrigerador se encuentran dos sensores de temperatura, a diferencia del sistema "Electrolux", el cual solo cuenta con el sensor de temperatura de aire que incluyen todas las cámaras frigoríficas.

El primero es el sensor de temperatura del aire, ubicado generalmente en uno de los laterales de la cámara. Su propósito es medir la temperatura ambiente dentro del refrigerador y transmitir esta información a la placa de control, permitiendo así mantener la temperatura programada. El segundo sensor se encuentra en la parte superior del evaporador y cumple una doble función. Por un lado, es responsable del sistema "Auto Defrost", que detiene temporalmente el funcionamiento del refrigerador para eliminar la escarcha acumulada. Por otro lado, actúa como un mecanismo de seguridad, ya que es capaz de detectar temperaturas anómalas que puedan indicar fugas de refrigerante o fallos en el circuito.

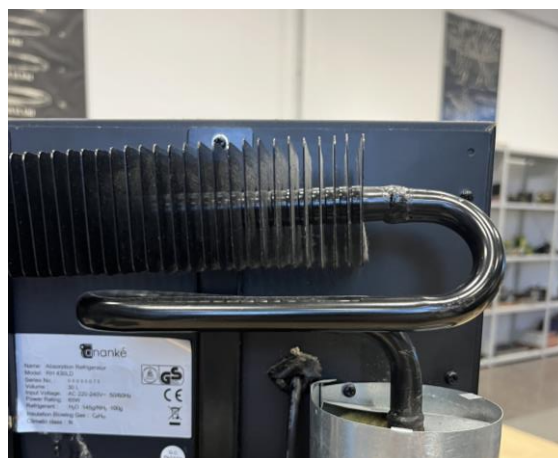


Figura 3-12 Entrada condensador "ananké"

Otra diferencia significativa entre ambos equipos radica en la entrada del condensador. Tal como se aprecia en la Figura 3-12, el conducto que transporta las burbujas de amoníaco desde la salida de la bomba hasta la entrada del condensador sigue un trazado en forma de serpentina. Esta configuración tiene el propósito de disminuir la temperatura del refrigerante antes de ingresar al condensador, optimizando así el proceso de condensación.

Este sistema, conocido como "trampa térmica", actúa como un rectificador, evitando que el agua presente en la mezcla llegue al condensador. De este modo, se previenen posibles deficiencias en el rendimiento del sistema.

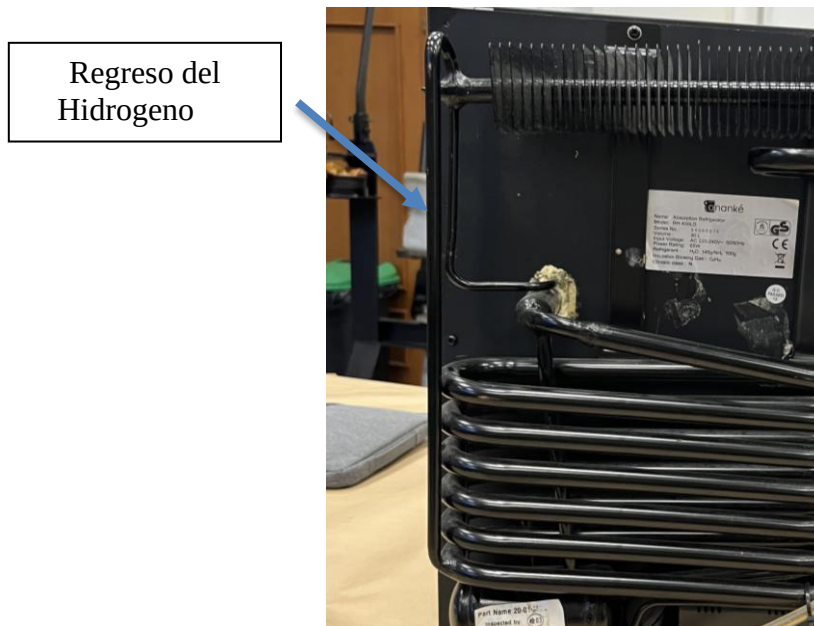


Figura 3-13 Conducto de regreso de hidrogeno "ananké"

Por último, cabe destacar que el conducto encargado de la vuelta del hidrogeno, en este equipo se sitúa al final del absorbedor, y se conduce directamente a la salida del condensador, para que se mezcle con el amoníaco recién condensado y contribuya a su evaporación.

Extraer el hidrógeno desde el final del absorbedor permite obtener un gas más puro y evita el arrastre de líquidos. Esto se traduce en una presión estable en el evaporador y, por ende, en un ciclo de refrigeración más eficiente. En el equipo "Electrolux" el conducto regresaba desde el depósito, lo que podría dificultar el regreso del hidrogeno de manera correcta.

3.3 Análisis y evaluación del rendimiento

3.3.1 Objetivos específicos

Este experimento tiene como finalidad analizar el desempeño térmico y la eficiencia energética de los frigoríficos, "Electrolux" y "ananké", bajo distintas condiciones de carga térmica y configuraciones del regulador de temperatura. Para ello, se evaluará su comportamiento en tres escenarios diferentes: en vacío (solo considerando la masa de aire interna), con 1 litro de agua y con 2 litros de agua.

Se evaluará el Coeficiente de Desempeño (COP) en función del tiempo y la configuración del regulador de temperatura, así como los tiempos de enfriamiento y el consumo energético, comparando la potencia frigorífica entregada en cada caso. Además, se estudiará el impacto de la carga térmica en el

sistema, analizando cómo la presencia de diferentes volúmenes de agua afecta la estabilidad térmica y la eficiencia del proceso.

El propósito principal es comparar el rendimiento y desempeño de ambas neveras, identificando diferencias en su funcionamiento y eficiencia en cada escenario, con el fin de comprender mejor las características y el comportamiento de los sistemas de absorción por difusión.

3.3.2 Rendimiento en vacío

Se medirá el COP de ambos frigoríficos en vacío, sin ninguna fuente de calor adicional en su interior, considerando únicamente el calor extraído de la masa de aire contenida dentro de ellos. Debido a esta metodología, se espera obtener valores de COP extremadamente bajos, ya que no se tendrá en cuenta la influencia de otros factores como la temperatura de las paredes internas o el flujo de calor entrante desde el exterior. No obstante, al asumir que estos factores afectan de la misma manera a ambas neveras, este enfoque permitirá comparar y evaluar sus sistemas de forma objetiva, centrándose exclusivamente en su capacidad para extraer calor del aire interior.

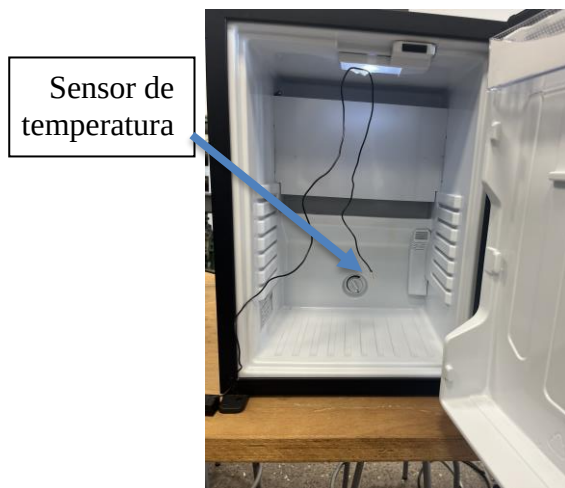


Figura 3-15 Medición "ananké" en vacío

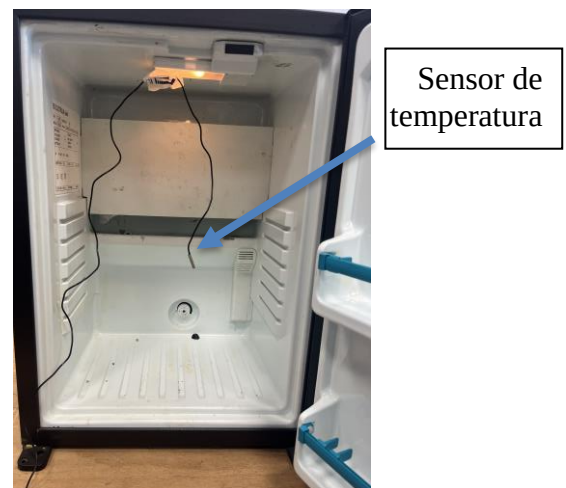


Figura 3-14 Medición "Electrolux" en vacío

El experimento se iniciará con las neveras a temperatura ambiente y desconectadas de la corriente eléctrica para evaluar la evolución del enfriamiento desde el instante inicial del ciclo. Mediante tablas de Excel se anotarán los datos de interés necesarios para el cálculo del rendimiento. El rendimiento de una máquina de absorción viene definido como:

$$COP = \frac{Q_c}{Q_g}$$

Ecuación 1

Siendo Q_c la energía extraída del compartimento y Q_g la energía térmica suministrada al generador en un intervalo de tiempo determinado.

El valor de Q_c viene dado por:

$$Q_c = m_{\text{aire}} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Ecuación 2

Siendo la masa de aire igual al producto de volumen del interior (30 L para ambas neveras) y la densidad del aire (asumido como $\rho_{\text{aire}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$) por lo que durante todo el experimento consideraremos una masa de aire de 0,036 Kg. El calor específico del aire lo consideraremos $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ durante todas las mediciones. El incremento de temperatura ($\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$) será la diferencia entre el instante inicial y final de la medición. Con estos valores se obtendrá el calor absorbido por el evaporador (Q_c), pudiendo compararlo con el consumo energético que ha implicado dicha operación (Q_g), para la obtención del COP.

Todos los datos empleados en este cálculo serán anotados, en intervalos de 10 minutos, para ambos frigoríficos, en cada una de las tres posiciones del regulador de temperatura, que se decido denominarán como “máxima”, “media” y “mínima” capacidad. Se realizará una comparación en el apartado 4.1 entre ambos equipos mediante parámetros como consumo, curvas de enfriamiento o rendimientos.

3.3.3 Rendimiento enfriando 1 litro de agua

Para el desarrollo de este experimento se procederá a enfriar las neveras hasta que sus ciclos de absorción alcancen un funcionamiento continuo y eficiente (aproximadamente media hora). Una vez ambas neveras se encuentran en estas condiciones se introducirá una botella de 1 L de capacidad en el interior de ambas neveras, y se introducirá un sensor de temperatura en el interior de la botella, además de otro sensor que medirá la temperatura del aire interior del frigorífico.

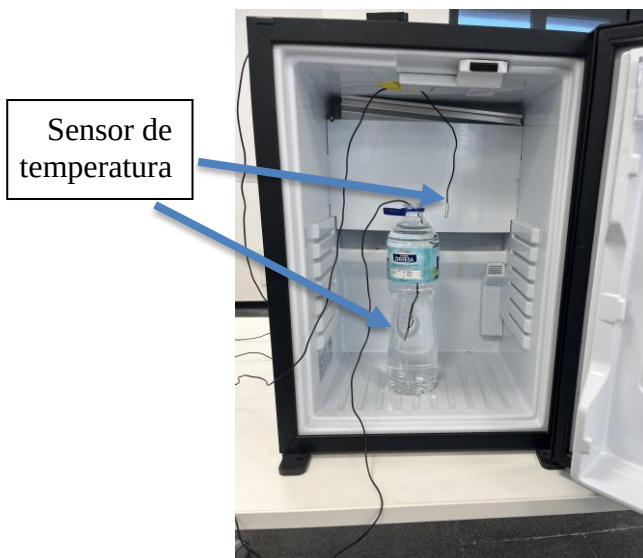


Figura 3-17 Experimento de 1 L en "ananké"

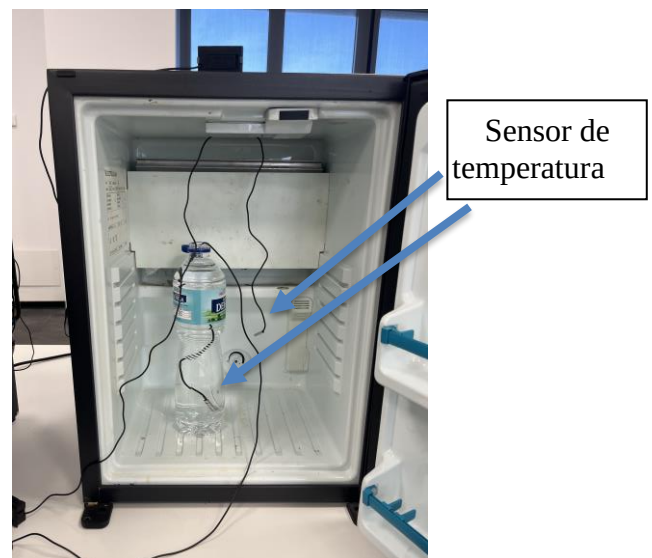


Figura 3-16 Experimento de 1 L en "Electrolux"

Una vez preparado el experimento, se reiniciará el medidor de potencia y se llevará a cabo la primera prueba de enfriamiento, en la que se reducirá la temperatura de 1 litro de agua de 26°C a 16°C . Durante esta fase, se registrarán los datos de temperatura del agua, temperatura del aire y consumo eléctrico en intervalos de 10 minutos. A continuación, se repetirá la prueba con un intervalo de 20 minutos, partiendo de una temperatura inicial del agua de 12°C hasta alcanzar 8°C . Con toda la información recopilada, se procederá a analizar los rendimientos, el consumo energético y la variación de temperatura en cada intervalo de tiempo, permitiendo una evaluación detallada del desempeño de los frigoríficos.

El cálculo del COP se llevará a cabo siguiendo el mismo procedimiento, aplicando la Ecuación 1 incorporando en la Ecuación 2 la masa de agua (1 kg) junto con su calor específico ($4186 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$). La realización de este experimento proporcionará valores más representativos de la realidad, ya que el uso de agua como fuente de calor exigirá un mayor esfuerzo por parte de los frigoríficos. Esto permitirá minimizar el impacto de ciertos factores que no serán medidos en esta fase experimental, pero que también influyen en el proceso de enfriamiento.

3.3.4 Rendimiento enfriando 2 litros de agua

Para realizar este experimento se procederá de la misma manera, enfriando las neveras hasta que sus ciclos de absorción se encuentren plenamente activos y posteriormente se introducirá una botella de 2 L de capacidad en el interior de ambas neveras, y se introducirá un sensor de temperatura en el interior de la botella, además de otro sensor que medirá la temperatura del aire interior del frigorífico.



Figura 3-19 Experimento de 2 L en "ananké"



Figura 3-18 Experimento de 2 L en "Electrolux"

Se restablecerá el medidor de potencia y se llevará a cabo la primera prueba de enfriamiento, en la que se reducirá la temperatura de 1 litro de agua de 30°C a 20°C . Durante esta fase, se registrarán los valores de temperatura del agua, temperatura del aire y consumo energético, tomando mediciones cada 20 minutos. Posteriormente, se repetirá el procedimiento con el mismo intervalo de tiempo, pero en esta ocasión, el agua partirá de una temperatura de 14°C y se enfriará hasta 11°C . Con los datos recopilados, se analizarán el rendimiento, el consumo energético y la variación de temperatura en cada intervalo, siguiendo el mismo enfoque metodológico del experimento anterior.

El cálculo del COP se llevará a cabo siguiendo el mismo procedimiento, aplicando la Ecuación 1 e incorporando en la Ecuación 2 la masa de agua (2 kg) junto con su calor específico de $4186 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$. Este experimento proporcionará los valores más representativos de toda la fase experimental, ya que el uso de 2 kg de agua como fuente de calor supondrá una mayor exigencia para los frigoríficos, lo que hace despreciable el resto de factores indeterminados que afectan al sistema.

3.4 Análisis del flujo de calor

3.4.1 Objetivos específicos

El presente experimento tiene como objetivo evaluar y comparar la eficiencia del aislamiento térmico de los frigoríficos de absorción "Electrolux" y "ananké", determinando su capacidad para conservar el frío en su interior. Para ello, se busca analizar la variación de temperatura interna de cada equipo y cuantificar la tasa de pérdida de energía térmica.

A través de este análisis, se pretende establecer una comparación entre ambos frigoríficos, identificando cuál de ellos presenta un mejor aislamiento y, por lo tanto, una mayor eficiencia en la retención del frío. Además, se busca obtener conclusiones sobre el impacto del aislamiento térmico en el rendimiento y la eficiencia energética de estos equipos, permitiendo así valorar su desempeño en términos de estabilidad térmica.

3.4.2 Desarrollo del experimento

Durante la realización de este experimento, ambos frigoríficos serán enfriados con un litro de agua en su interior. Una vez que la temperatura del agua descienda hasta aproximadamente 8°C, se procederá a desconectar los equipos de la corriente eléctrica, interrumpiendo así el funcionamiento de la resistencia térmica. Como resultado, el ciclo de refrigeración comenzará a disminuir progresivamente hasta que se detenga por completo la evaporación del amoníaco, cesando así el efecto de enfriamiento.

Las mediciones se realizarán en intervalos de 10 minutos, con el propósito de calcular el coeficiente UA, donde U representa el coeficiente global de transmisión térmica propio del material y A el área de intercambio de calor. Finalmente, se estudiará la evolución de este parámetro a lo largo de toda la prueba para evaluar el comportamiento térmico de cada frigorífico y la cantidad de calor que se disipa con el tiempo.

El coeficiente UA es un parámetro que mide cuánta energía térmica se transfiere a través de un sistema en función de la diferencia de temperatura entre su interior y el ambiente exterior. Se expresa en vatios por kelvin (W/K) y se utiliza principalmente para evaluar la eficiencia del aislamiento térmico de dispositivos como frigoríficos, edificios y sistemas de climatización. Viene dada en la siguiente ecuación:

$$P = \Delta T \cdot UA$$

Ecuación 3

Siendo UA el coeficiente de transmisión térmica, expresado en vatios por kelvin (W/K), P representa la cantidad de calor que se está perdiendo en vatios (W) y ΔT la diferencia de temperatura entre el interior del frigorífico y el ambiente (21,3°C), medida en kelvin (K). Este coeficiente indica la capacidad de aislamiento térmico del frigorífico por lo que cuanto menor sea el valor de UA, mejor será el aislamiento, ya que significará que la pérdida de frío es menor.

La potencia frigorífica (P) indica cuánta energía térmica es absorbida o liberada por el frigorífico en un cierto período de tiempo. Se determina con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{m \cdot cp \cdot \Delta T}{\Delta t}$$

Ecuación 4

Siendo P la potencia frigorífica, expresada en vatios (W) y m es la masa del fluido que se está utilizando como referencia, en este caso el agua, medida en kilogramos (kg). El cp es el calor específico del agua (4184 J/kg·K), ΔT es la variación de temperatura del agua dentro del frigorífico, medida en kelvin (K) y Δt es el tiempo transcurrido en el que ocurre el cambio de temperatura, medido en segundos. Esta ecuación nos permite determinar qué cantidad de energía térmica está perdiendo o ganando el frigorífico en cada momento.

3.5 Evolución de las temperaturas del ciclo

3.5.1 Objetivos específicos

Este experimento tiene como finalidad el estudio del comportamiento térmico de ambos frigoríficos mediante la medición y análisis de la evolución de la temperatura en distintos componentes del sistema a lo largo del tiempo. A través de estas mediciones, se busca comprender el proceso de transferencia de calor dentro del ciclo de refrigeración y determinar los momentos clave en su funcionamiento, como el inicio del burbujeo en el generador y el comienzo del enfriamiento en el evaporador.

Uno de los principales objetivos es identificar el instante en que se inicia el “burbujeo” en el generador, lo que ocurre cuando la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de este componente aumenta significativamente. Este fenómeno indica que el amoníaco gaseoso empieza a desplazarse dentro del sistema, lo que es esencial para que el ciclo de refrigeración continúe. De manera similar, se busca determinar el inicio del enfriamiento en el evaporador, el cual se evidencia con una caída sostenida en su temperatura. Este descenso confirma que el amoníaco está evaporándose, absorbiendo calor del entorno y generando el efecto refrigerante.

3.5.2 Desarrollo del experimento

El desarrollo de este experimento será sencillo pero revelador, ya que se busca obtener datos precisos sobre el comportamiento térmico de estos sistemas de refrigeración. Se instalarán sensores de temperatura en puntos estratégicos del circuito de ambos equipos, permitiendo así el monitoreo detallado de la evolución térmica en cada una de sus fases. Estos puntos clave incluirán la entrada y salida del generador, el condensador, el evaporador y el absorbedor, con el objetivo de comprender cómo varía la temperatura en cada componente a lo largo del tiempo y de qué manera influyen las condiciones externas en su funcionamiento.

El experimento se llevará a cabo en condiciones controladas, con los frigoríficos completamente desconectados de la corriente eléctrica y con una temperatura ambiente de 21°C. Durante el desarrollo del experimento, se realizarán mediciones periódicas en intervalos de 10 minutos, asegurando así un registro detallado de la evolución de la temperatura en cada punto del circuito.

Una vez recopilados todos los datos, estos serán analizados mediante gráficas de temperatura en función del tiempo, lo que permitirá identificar con claridad los eventos más relevantes dentro del ciclo térmico de los equipos. Entre los aspectos clave a evaluar se encuentran el momento en que se inicia el burbujeo en el generador, el inicio del proceso de enfriamiento en el evaporador y las posibles diferencias de rendimiento entre los dos frigoríficos estudiados. A partir de este análisis, se podrán extraer conclusiones sobre el comportamiento de cada sistema y su eficiencia en la transferencia de calor.

3.6 Análisis específico del refrigerador “Electrolux”

3.6.1 Objetivos específicos

A partir de los distintos análisis efectuados sobre ambos frigoríficos, se ha constatado que "Electrolux" presenta una capacidad de enfriamiento superior, tanto en velocidad como en intensidad, a pesar de tratarse de una versión anterior del mismo modelo. Se ha identificado una anomalía en su funcionamiento: tras aproximadamente seis horas de operación continua, el ciclo de refrigeración se interrumpe de forma repentina, y el sistema deja de enfriar. Para que vuelva a operar con normalidad, es necesario desconectarlo de la red eléctrica durante al menos un par de horas. Por este motivo, los objetivos de este estudio se centrarán en evaluar las distintas hipótesis que podrían explicar este fallo, analizar por qué "Electrolux" alcanza un rendimiento térmico superior al de "ananké", pese a ser una versión previa, y proponer posibles soluciones técnicas al problema identificado.

3.6.2 Desarrollo

3.6.2.1 Capacidad de enfriamiento

Durante los ensayos realizados, se ha comprobado que el modelo “Electrolux” presenta una capacidad superior de extracción de calor, tanto en velocidad como en cantidad, manteniendo un consumo energético igual o incluso inferior al de “ananké”. No obstante, el análisis de las temperaturas del ciclo (ver apartado 4.3) revela una notable similitud entre ambos sistemas, mostrando un comportamiento prácticamente idéntico en la fase inicial del proceso de enfriamiento. Esta aparente contradicción sólo puede explicarse por una mayor cantidad de refrigerante (amoníaco) circulando hacia el evaporador en el caso de Electrolux, lo que resulta en una absorción de calor más eficiente en el interior del compartimento refrigerado. Esta hipótesis será contrastada mediante la comparación de las temperaturas registradas en distintos puntos del evaporador. Para ello se colocarán sensores en cuatro puntos equidistantes en ambos equipos con el propósito de saber que evaporador contiene más refrigerante.

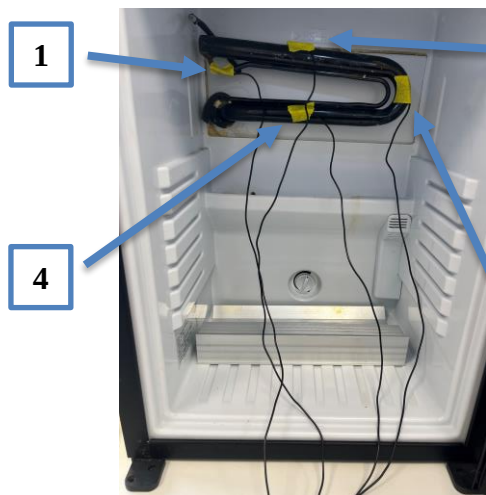


Figura 3-21 Experimento evaporador "ananké"

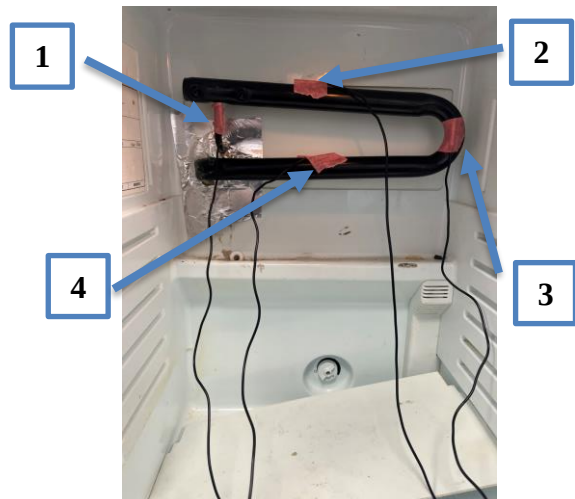


Figura 3-20 Experimento evaporador "Electrolux"

Los puntos serán nombrados como se muestra en la Figura 3-21 y Figura 3-20, siendo el punto 1 el referente a la entrada en el evaporador y el punto cuatro el más cercano a la salida. El análisis del punto número 4 será determinante para evidenciar la presencia de una mayor cantidad de amoníaco en circulación. Dado que ambos evaporadores presentan dimensión es similares, una temperatura

significativamente más baja en dicho punto indicará una mayor tasa de evaporación del refrigerante, al estar más cerca de la salida, lo que a su vez implica una mayor cantidad de amoníaco presente en el interior del evaporador.

3.6.2.2 Empleo de placas de aluminio

Una de las posibles causas del mal funcionamiento en el sistema de "Electrolux" podría ser la presencia de agua en el condensador, ya que este modelo no incorpora un rectificador antes de la entrada al mismo. Además, se ha registrado una temperatura de entrada relativamente elevada, en torno a los 50 °C. En contraste, "ananké", que sí cuenta con rectificador, presenta una temperatura de entrada de aproximadamente 41 °C y no manifiesta fallos operativos, lo que sugiere que este factor podría estar influyendo negativamente en el equilibrio del ciclo de refrigeración. Con el objetivo de profundizar en esta hipótesis, así como posible solución, se utilizarán cuatro placas de aluminio con las mismas dimensiones que las aletas del condensador (7 × 8 cm) para realizar una comparación térmica más detallada.



Figura 3-23 "Aleta" de aluminio



Figura 3-22 Pieza de Aluminio

Se ha seleccionado aluminio como material para las placas debido a sus excelentes propiedades de conductividad térmica, que lo hacen especialmente eficaz para la disipación de calor. Estas placas se ubicarán entre la salida del generador y la entrada del condensador, con el objetivo de reducir la temperatura del vapor de amoníaco en tránsito. De este modo, se busca favorecer la condensación de posible agua que no haya sido separada previamente en la bomba de burbujas, permitiendo que dichas gotas retornen por gravedad a través del conducto. Esto resulta fundamental, ya que la presencia de agua en el condensador no solo puede afectar su capacidad de transferencia térmica, sino que además existe el riesgo de que parte de esta agua sea arrastrada hacia el evaporador. En ese caso, podría interferir con el proceso de evaporación del amoníaco, disminuyendo la eficiencia frigorífica e incluso generando bloqueos o pérdida de efecto refrigerante en esa zona crítica del ciclo.



Figura 3-24 Empleo de placas de aluminio en "Electrolux"

Una vez se haya reducido la temperatura de entrada del condensador, se realizará un estudio sobre la evolución de las temperaturas del ciclo para comprobar en qué manera afecta al rendimiento del equipo y, si el problema ha sido solucionado.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis y evaluación del rendimiento

4.1.1 Rendimiento en vacío

- Coeficientes de rendimiento

Para comenzar con el análisis térmico de los equipos, primero se obtendrán los rendimientos de ambos sistemas en las tres posiciones del regulador, “máxima”, “media” y “mínima”.

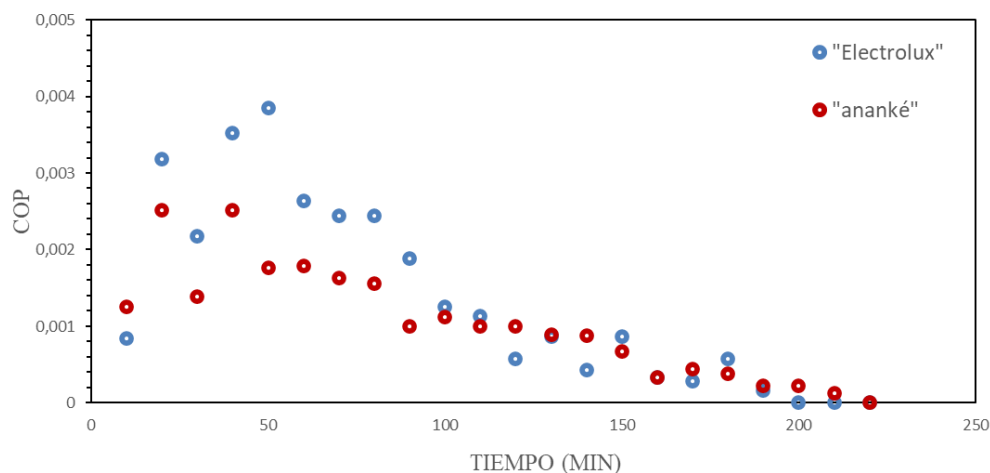


Figura 4-1 COP en vacío a máxima capacidad

En la Figura 4-1 se presentan los datos obtenidos con el regulador ajustado a su máxima capacidad, configurando ambos frigoríficos para alcanzar la temperatura mínima posible de 2°C para ambos equipos. Durante los primeros minutos del experimento, se observa una tendencia ascendente en el COP de ambos equipos. Esto se debe a que, al comienzo, los frigoríficos estaban desconectados de la corriente eléctrica, lo que impidió el inicio inmediato del ciclo de absorción y retrasó la evaporación del refrigerante, en este caso, el amoníaco.

Aproximadamente en el minuto 50, se alcanzan los valores máximos de COP, lo que indica que los frigoríficos han comenzado a funcionar a plena capacidad de enfriamiento. Sin embargo, conforme desciende la temperatura interior, el COP comienza a disminuir. Esto se debe a que, cuanto más baja es la temperatura en el interior del equipo en comparación con la temperatura ambiente, más difícil resulta

extraer calor, lo que reduce la eficiencia del ciclo. Finalmente, el COP llega a cero, lo que significa que los frigoríficos han alcanzado la temperatura de consigna establecida por el regulador.

Al comparar ambos frigoríficos, se observa que "ananké" alcanza su máximo rendimiento aproximadamente a los 30 minutos de funcionamiento, mientras que "Electrolux" lo hace algo más tarde. No obstante, "Electrolux" presenta valores de COP más elevados durante todo el experimento. Por ejemplo, cuando "ananké" alcanza su rendimiento máximo con un COP de aproximadamente 0,0025, "Electrolux" supera esa cifra con valores superiores a 0,003. Además, "Electrolux" alcanza la temperatura de consigna antes, es decir, su COP llega a cero en menos tiempo, lo que indica que tiene una mayor capacidad de enfriamiento.

Los resultados obtenidos en este experimento muestran que, bajo estas condiciones, "Electrolux" presenta un rendimiento claramente superior a "ananké", tanto en eficiencia térmica como en rapidez para alcanzar su temperatura objetivo.

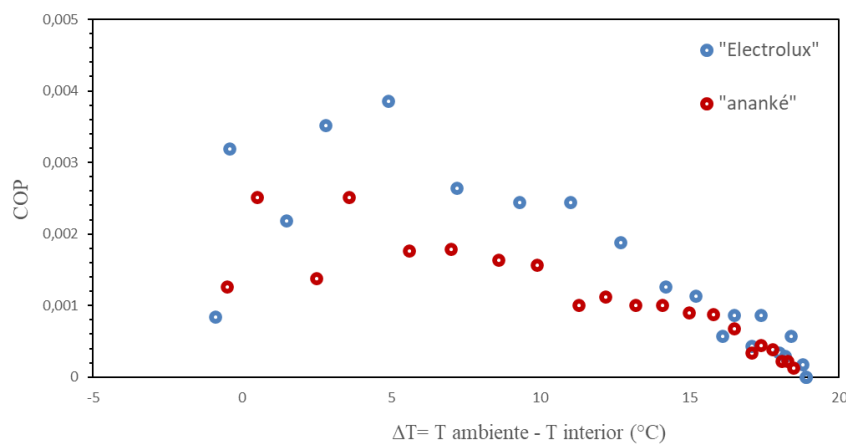


Figura 4-2 Evolución del COP a máxima capacidad respecto a la temperatura exterior

En la Figura 4-2 se representan los valores de rendimiento en función de la diferencia de temperatura entre la interior del equipo, y la temperatura del exterior (21,1°C). Estos gráficos se han generado con el fin de visualizar la caída del rendimiento a medida que en el interior del frigorífico se alcanzan temperaturas más bajas, por tanto, más distantes de la temperatura exterior.

Continuando con el análisis del rendimiento de masa de aire a media capacidad, como se puede observar en la Figura 4-3, se alcanzan valores de COP superiores a los valores logrados a máxima capacidad en la Figura 4-1 para ambos frigoríficos.

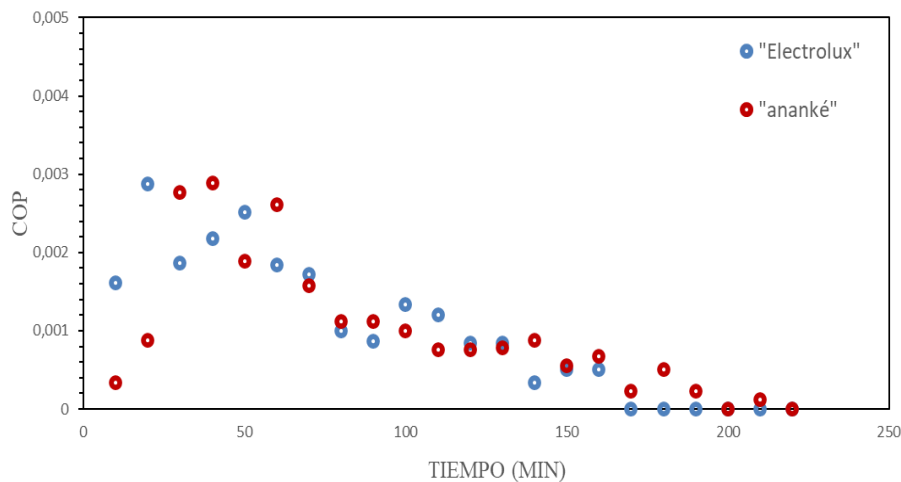


Figura 4-3 COP en vacío a media capacidad

En los primeros minutos del experimento, tanto “Electrolux” como “ananké” muestran una tendencia ascendente del COP, hasta alcanzar su valor máximo, momento en el que el ciclo de absorción entra en pleno funcionamiento. Sin embargo, existen diferencias en la velocidad de respuesta de ambos equipos. Electrolux alcanza su máximo rendimiento térmico en torno a los 20 minutos, mientras que ananké lo hace cerca de los 40 minutos, aunque ambos llegan a un valor similar de $\text{COP} = 0,003$.

A partir de este punto, la gráfica sigue una tendencia descendente, ya que la temperatura interna va reduciéndose y la diferencia de temperatura con el exterior se hace menor, lo que dificulta la extracción de calor y disminuye la eficiencia del sistema. Aunque en la parte final de la gráfica los valores de Electrolux y ananké parecen similares, se puede afirmar que Electrolux ha tenido un mejor rendimiento global, ya que alcanza antes el $\text{COP} = 0$, lo que significa que logra enfriar con mayor rapidez y llegar a la temperatura de consigna más rápido.

Además, “Electrolux” mantiene valores de COP similares a “ananké” cuando está cerca de la temperatura de consigna (3°C para ambos frigoríficos) mientras que “ananké” aún presenta valores de COP elevados en momentos en los que todavía está lejos de su temperatura final, lo que sugiere que “Electrolux” extrae calor de forma más eficiente a lo largo del proceso.

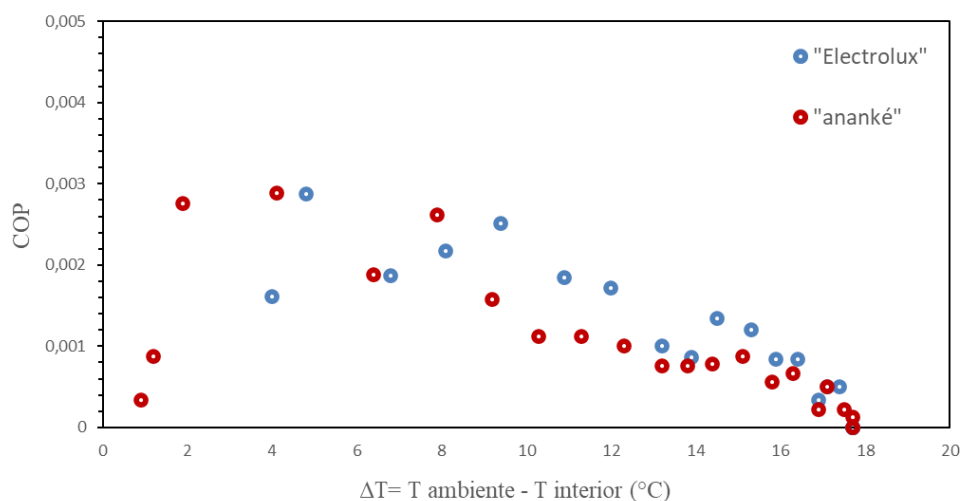


Figura 4-4 Evolución del COP a media capacidad respecto a la temperatura exterior

En la Figura 4-5 se muestra la evolución del COP cuando el regulador está configurado en mínima capacidad, es decir, estableciendo la temperatura de consigna más alta dentro de las tres configuraciones analizadas (5°C “Electrolux” y 7°C “ananké”). En esta condición, se observa una tendencia ascendente en los primeros minutos, hasta alcanzar un pico máximo de COP, seguido de una disminución progresiva conforme avanza el tiempo y se estabiliza la temperatura interna.

En la fase inicial, tanto Electrolux como ananké presentan valores crecientes de COP, lo que indica que el sistema de absorción está ganando eficiencia a medida que el refrigerante comienza a evaporarse y el ciclo se estabiliza. Electrolux alcanza valores máximos de COP superiores a los de ananké, lo que sugiere una mayor eficiencia en la extracción de calor. Sin embargo, en esta configuración, ambos equipos muestran un comportamiento muy similar en términos de tendencia.

A medida que el proceso avanza, el COP disminuye de forma progresiva, lo que refleja que la temperatura interna del frigorífico se va acercando a la de consigna. Al alcanzar una temperatura más alta que en las configuraciones media y máxima, la diferencia térmica con el exterior es menor, lo que facilita la estabilización del sistema y genera un descenso más controlado del COP.

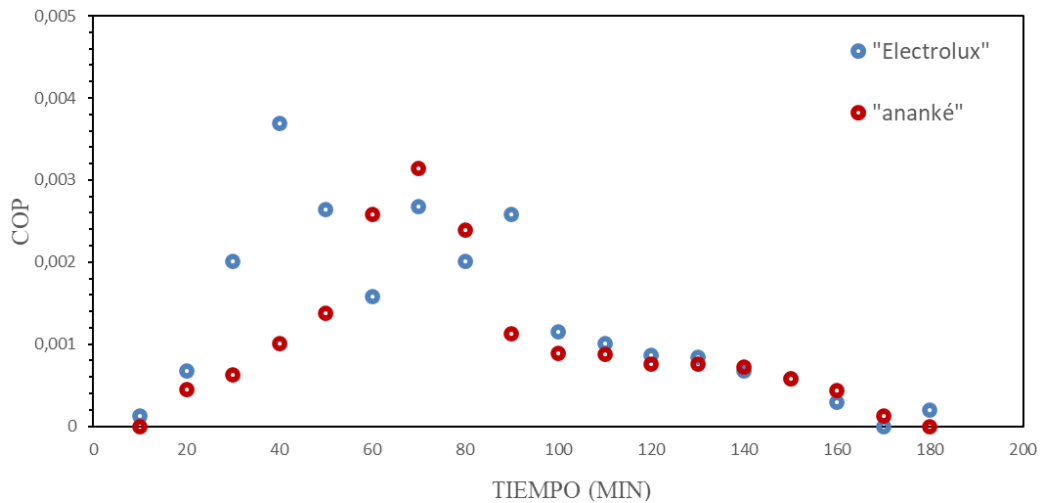


Figura 4-5 COP en vacío a mínima capacidad

En la fase inicial, tanto Electrolux como ananké presentan valores crecientes de COP, lo que indica que el sistema de absorción está ganando eficiencia a medida que el refrigerante comienza a evaporarse y el ciclo se estabiliza. Electrolux alcanza valores máximos de COP superiores a los de “ananké”, lo que sugiere una mayor eficiencia en la extracción de calor. Sin embargo, en esta configuración, ambos equipos muestran un comportamiento muy similar en términos de tendencia.

A medida que el proceso avanza, el COP disminuye de forma progresiva, lo que refleja que la temperatura interna del frigorífico se va acercando a la de consigna. Al alcanzar una temperatura más alta que en las configuraciones media y máxima, la diferencia térmica con el exterior es menor, lo que facilita la estabilización del sistema y genera un descenso más controlado del COP.

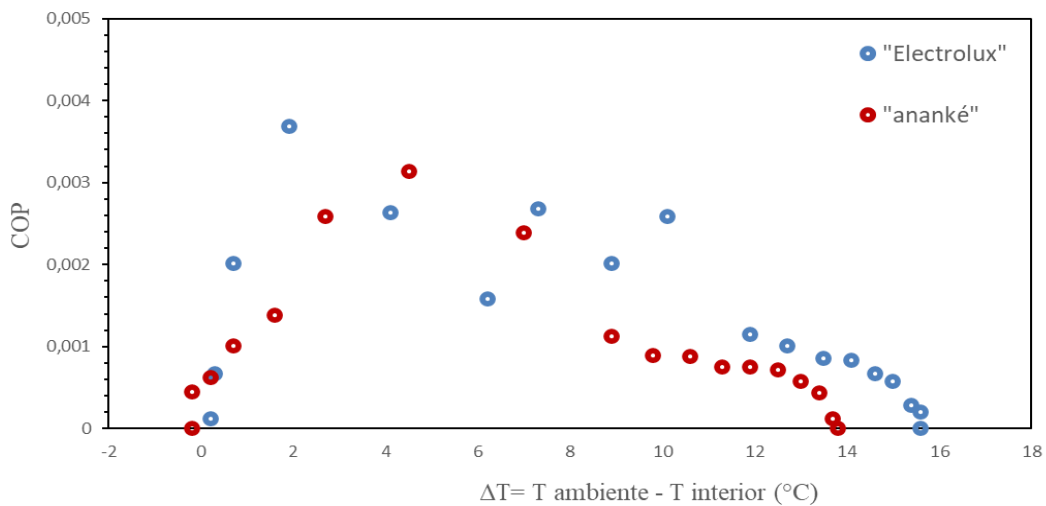


Figura 4-6 Evolución del COP a mínima capacidad respecto a la temperatura exterior

En la fase final de la gráfica, el COP se aproxima a cero, indicando que los frigoríficos han alcanzado el equilibrio térmico y la potencia frigorífica del sistema es prácticamente nula. Esto ocurre de manera más lenta que en la configuración de máxima capacidad, ya que el regulador limita la intensidad del enfriamiento, reduciendo la velocidad de extracción de calor.

En la Figura 4-6 se muestra el descenso de los valores del COP conforme se alcanzan temperaturas más alejadas de la temperatura ambiente. Se puede apreciar la gran diferencia entre ambos equipos, ya que “ananké” alcanza su máximo valor de COP en un valor de $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ mientras que en “Electrolux”

ese valor máximo ya se ha alcanzado a un valor de $\Delta T = 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto confirma la diferencia de velocidad de enfriamiento entre ambos equipos y sus capacidades.

- Curvas de enfriamiento

En la Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9 se muestran las distintas curvas de enfriamiento relaciones con las distintas posiciones del regulador. La curva de enfriamiento se basa en el estudio del descenso progresivo de la temperatura interior del frigorífico en función del tiempo. Para la curva que representa el comportamiento de la nevera en máxima capacidad de enfriamiento, se observa que, en los primeros momentos del ciclo de absorción, la temperatura apenas experimenta variaciones. En el caso de “Electrolux”, la temperatura comienza a descender bruscamente alrededor de los 20 minutos, lo que indica el inicio del proceso de evaporación del amoníaco y, por tanto, el comienzo efectivo del enfriamiento. Por otro lado, en ananké, esta caída de temperatura se inicia aproximadamente a los 30 minutos, pero de forma más gradual, lo que sugiere que su ciclo de refrigeración opera a un ritmo más lento. Como resultado de esta diferencia en la velocidad del proceso, “Electrolux” alcanza la temperatura de consigna antes que “ananké”, demostrando una mayor capacidad de enfriamiento.

En lo que respecta a la curva correspondiente a la media capacidad, apenas se Figura 4-9 observan diferencias significativas en comparación con la de máxima capacidad. Esto se debe a que la temperatura de consigna es muy similar en ambos casos, fijándose en 3°C para media capacidad y en 2°C para máxima capacidad. Dado que el experimento se realiza con masa de aire, la cantidad de calor extraído es muy pequeña, razón por la que se obtienen valores de COP extremadamente bajos. Como consecuencia, las diferencias en la velocidad de enfriamiento entre ambas configuraciones son mínimas y apenas perceptibles.

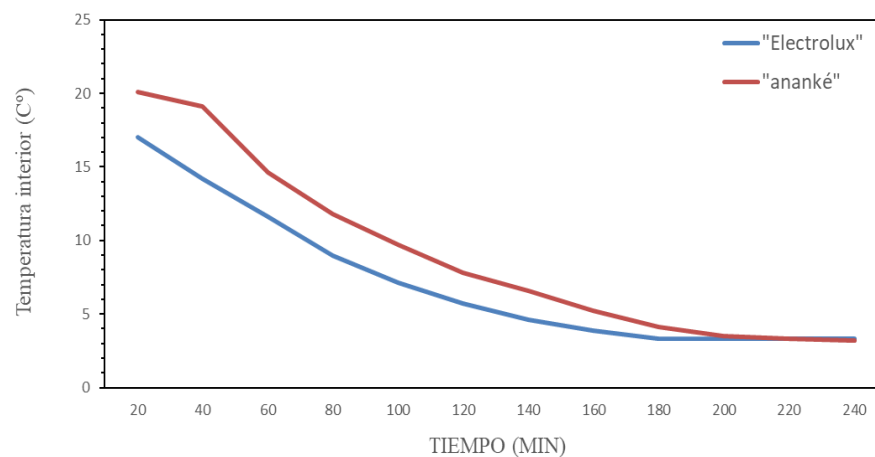


Figura 4-7 Curva de enfriamiento en vacío a máxima capacidad

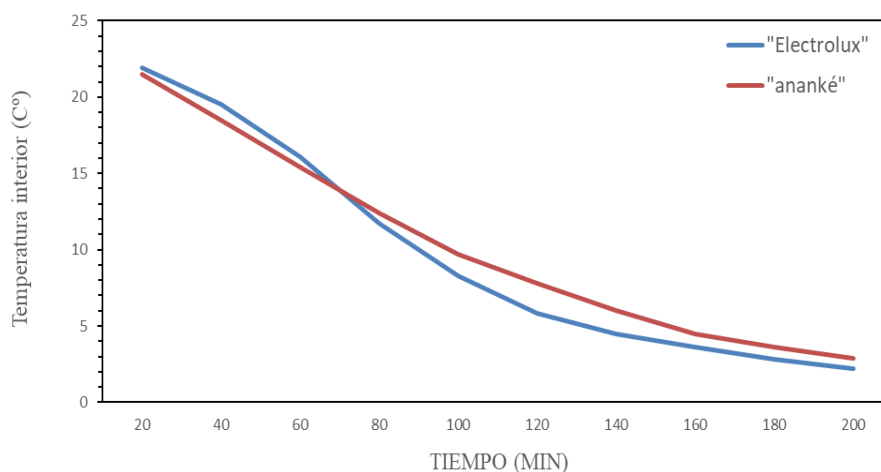


Figura 4-8 Curva de enfriamiento en vacío a media capacidad

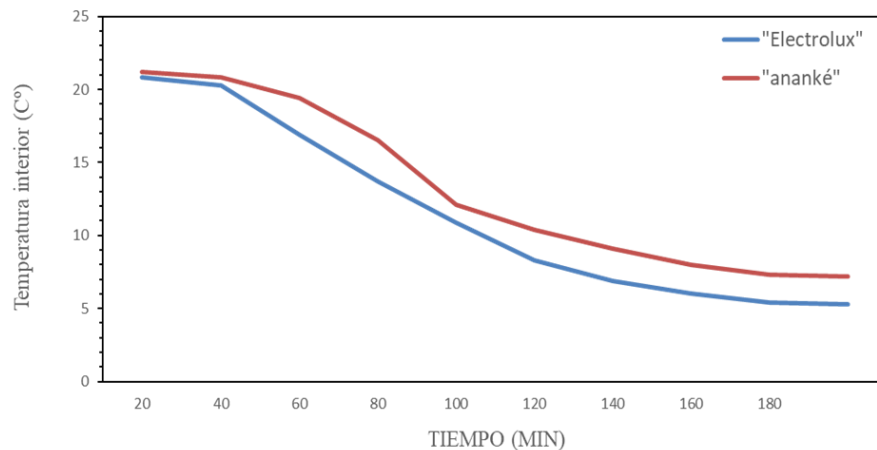


Figura 4-9 Curva de enfriamiento en vacío a mínima capacidad

Para concluir, en cuanto a la evolución de la temperatura en la configuración de mínima capacidad, se observa una diferencia notable con respecto a las otras dos configuraciones (“máxima y media”). En este caso, el descenso de la temperatura comienza alrededor de los 40 minutos, lo que supone prácticamente el doble de tiempo en comparación con las configuraciones anteriores. Esto confirma que, con el regulador en mínima capacidad, el ciclo de refrigeración se ralentiza significativamente, proporcionando un enfriamiento más gradual y pausado.

A pesar de esta reducción en la velocidad del proceso, “Electrolux” continúa demostrando una mayor capacidad de enfriamiento en comparación con “ananké”, manteniendo su superioridad en eficiencia térmica.

- Consumo energético

La evolución del consumo eléctrico durante todo el experimento se representa en la Figura 4-10, Figura 4-11y Figura 4-12, reflejando los kWh que se han consumido en cada intervalo de 10 minutos durante todo el experimento. Esta información es crucial dado que determina el rendimiento del sistema.

En todas las configuraciones analizadas, “Electrolux” se muestra como el equipo más eficiente en términos de consumo energético, registrando valores inferiores a los de “ananké” en cada fase del experimento. Como se espera, ambos equipos consumen más a medida que aumentamos la capacidad de enfriamiento del frigorífico.

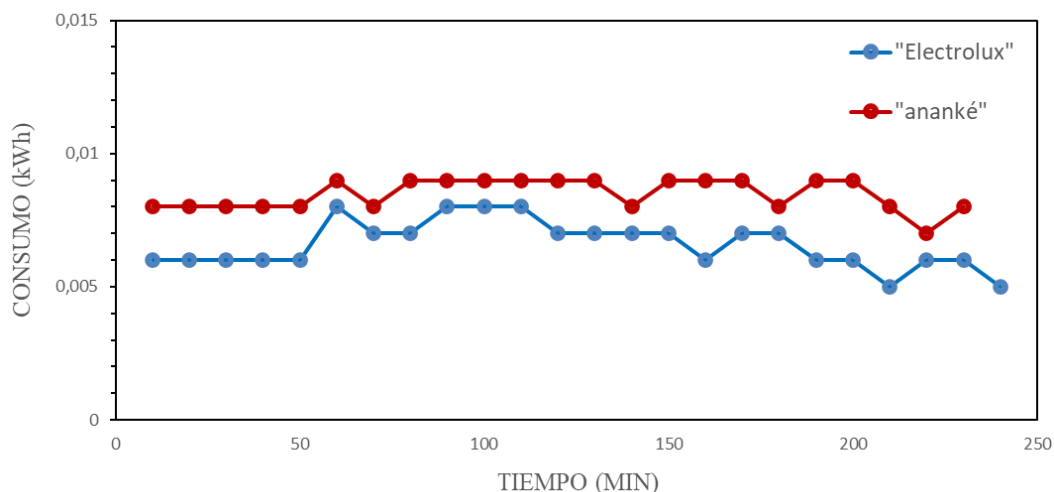


Figura 4-10 Consumo energético en vacío a máxima capacidad

En la configuración de máxima capacidad, el consumo se mantiene más estable a lo largo del tiempo, mientras que en las configuraciones de media y mínima capacidad se observan mayores fluctuaciones, especialmente en “Electrolux”, lo que sugiere una regulación más dinámica de su consumo energético. Además, la ligera reducción del consumo en la fase final del experimento indica que ambos frigoríficos han alcanzado la temperatura de consigna, lo que disminuye la demanda energética y estabiliza el sistema de refrigeración.

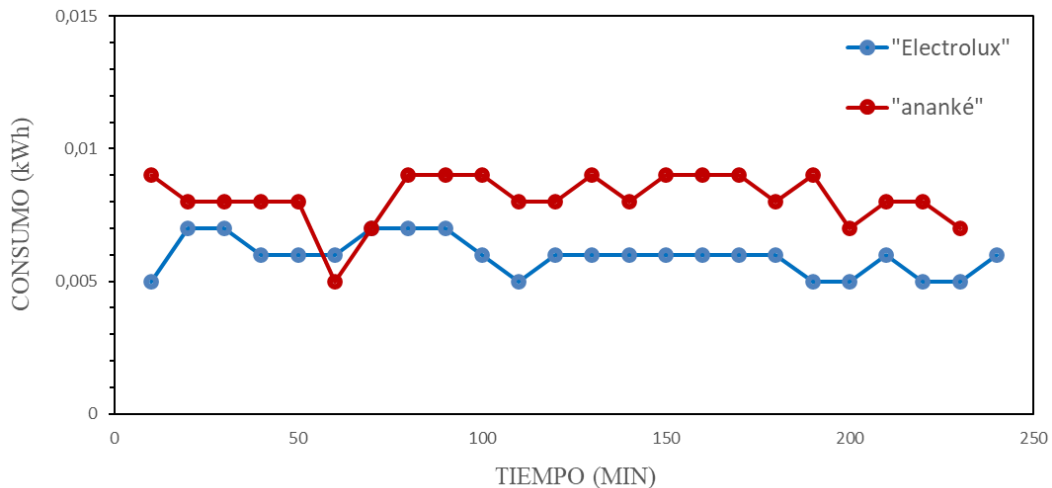


Figura 4-12 Consumo energético en vacío a media capacidad

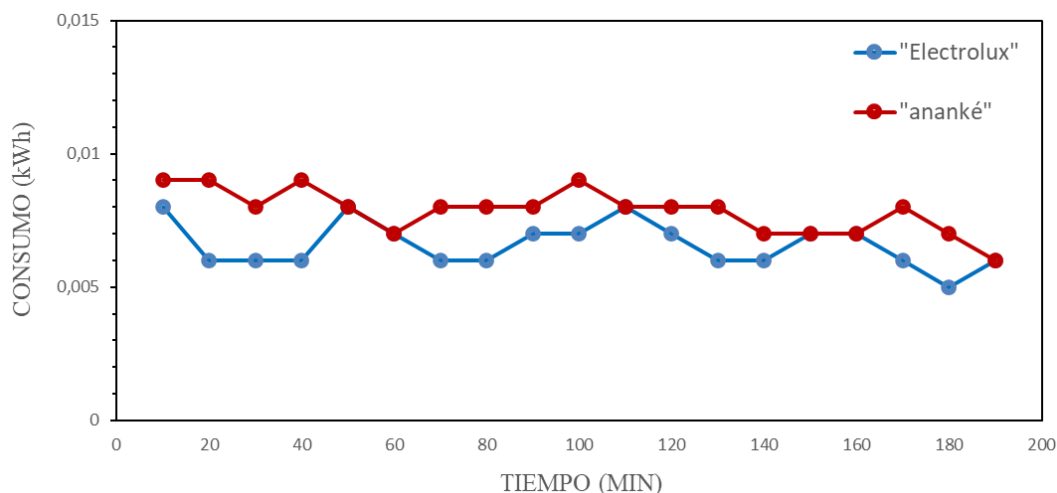


Figura 4-11 Consumo eléctrico masa de aire a mínima capacidad

Como conclusión del experimento, cabe destacar que, al considerar únicamente la masa de aire, los frigoríficos no presentan una dificultad significativa para alcanzar el enfriamiento deseado. Esto se debe a que la placa base del ciclo regula automáticamente el funcionamiento de la resistencia eléctrica, activándola o desactivándola según sea necesario para optimizar el proceso y garantizar que se alcance la temperatura de consigna establecida.

A partir del análisis de los datos obtenidos, se puede concluir que la configuración más eficiente para el enfriamiento de la masa de aire es la de media capacidad, ya que permite lograr una reducción de temperatura similar a la de máxima capacidad, pero con un menor consumo energético, lo que la convierte en la opción más eficiente.

En todas las configuraciones analizadas, "Electrolux" ha demostrado una mayor potencia frigorífica, logrando reducir la temperatura de forma más efectiva. Además, lo hace con un menor consumo energético, lo que confirma que, en lo que respecta al enfriamiento de la masa de aire, "Electrolux" es el equipo más eficiente en comparación con "ananké".

4.1.2 Rendimiento enfriando 1 Litro de agua

Este experimento se ha dividido en dos fases diferentes. En la primera, se ha analizado el proceso de enfriamiento de 1 litro de agua, reduciendo su temperatura desde 26°C hasta 16°C, mientras que en la segunda prueba se ha evaluado el enfriamiento de 12°C a 8°C.

Para comenzar con el análisis, se estudiará la evolución del rendimiento en ambas pruebas. En la primera fase del experimento, la evolución del COP puede observarse en la Figura 4-13, donde se representa el rendimiento térmico de "Electrolux" y "ananké" durante el proceso de enfriamiento.

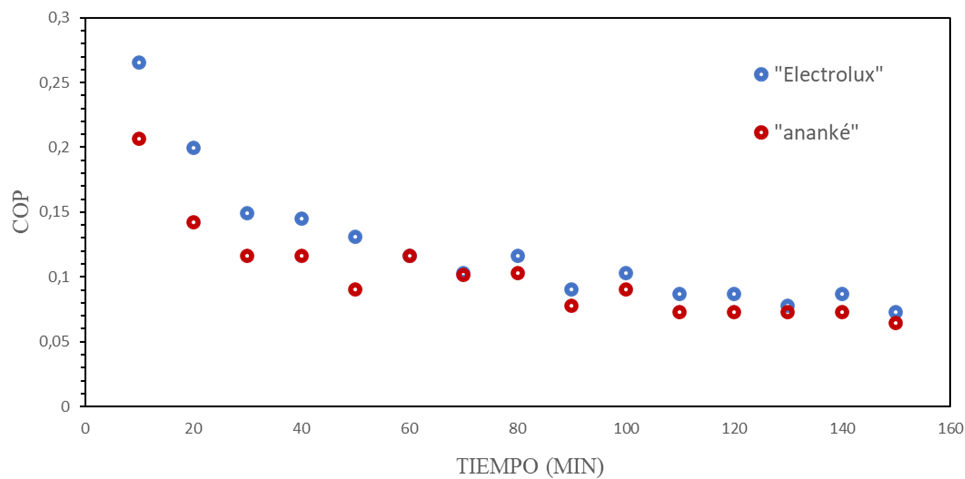


Figura 4-13 COP de 1 L de agua (26°C-16°C)

Dado que este experimento se lleva a cabo con los ciclos de refrigeración ya en pleno funcionamiento, el COP es más alto en el instante inicial, ya que el agua se encuentra a una temperatura superior a la temperatura ambiente (21,6°C), lo que favorece la transferencia de calor y facilita el enfriamiento. A medida que la temperatura del agua se va reduciendo y se aleja cada vez más de la temperatura ambiente, el proceso de extracción de calor se vuelve más difícil para el frigorífico. Como resultado, se observa una tendencia descendente en la curva del COP a lo largo del tiempo, reflejando la progresiva disminución en la eficiencia del proceso de enfriamiento.

Al comparar ambos equipos, se puede observar que "Electrolux " mantiene un rendimiento superior a lo largo de todo el experimento, lo que indica una mayor capacidad para extraer calor con un menor consumo energético.

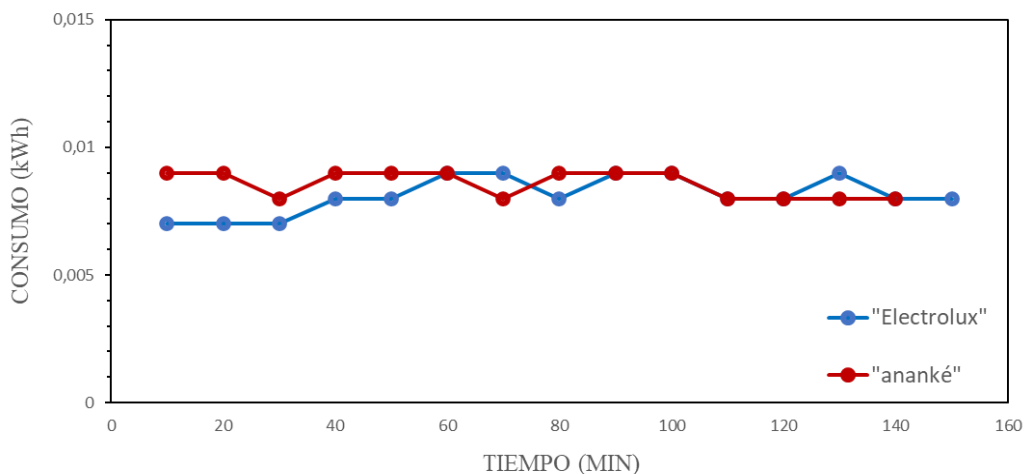


Figura 4-14 Consumo energético 1 L de agua (26°C-16°C)

En la Figura 4-14, se representan los consumos de ambos frigoríficos en intervalos de 10 minutos. Un aspecto destacable es que, en los primeros instantes, "Electrolux" presenta un consumo energético inferior, pero a medida que el enfriamiento se vuelve más exigente, el equipo detecta la dificultad para extraer calor y aumenta su consumo, alcanzando valores similares a los de "ananké". A lo largo del resto del experimento, el consumo se mantiene prácticamente constante, ya que ambos frigoríficos necesitan operar a máximo rendimiento para continuar con la extracción de calor de manera eficiente.

Dado que ambos equipos presentan consumos energéticos similares, la superioridad en el rendimiento de "Electrolux" solo puede explicarse por una mayor potencia frigorífica, es decir, por su capacidad para extraer calor del interior del frigorífico de manera más eficiente y en menos tiempo. Este hecho queda reflejado en la Figura 4-15, donde se comparan las temperaturas del agua y las temperaturas internas de ambos equipos, evidenciando la superioridad de "Electrolux" en el proceso de enfriamiento.

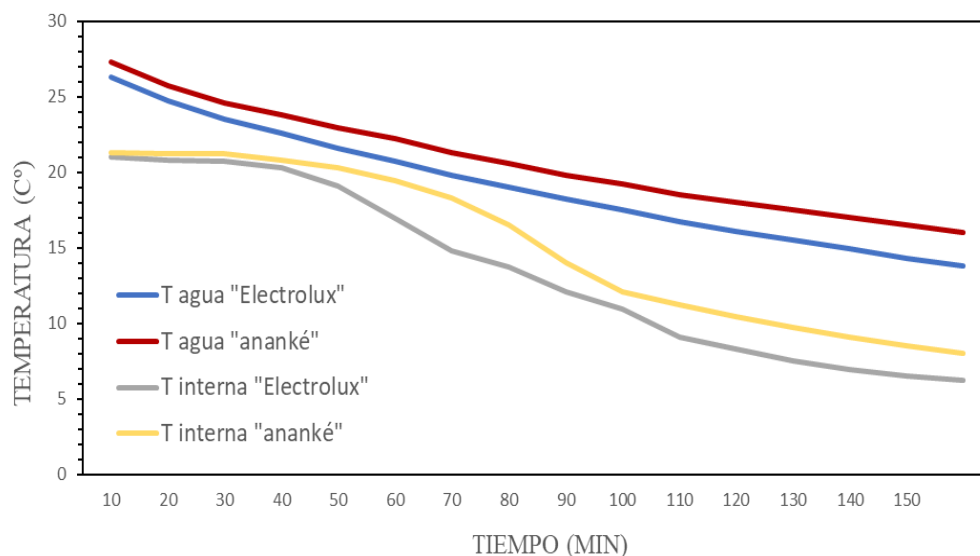


Figura 4-15 Evolución de temperaturas 1 L de agua (26°C-16°C)

En la segunda fase del experimento, donde el agua se enfría de 12°C a 8°C, se mantiene la misma metodología y análisis que en la fase anterior. La evolución del COP, representada en la Figura 4-16, refleja valores significativamente bajos, ya que la temperatura inicial del agua es considerablemente más baja, lo que dificulta la extracción de calor. A pesar de ello, se sigue observando una tendencia descendente en el rendimiento, aunque de forma más atenuada en comparación con la fase anterior, ya que la reducción de temperatura es menor. "Electrolux" continúa mostrando rendimientos superiores en comparación con "ananké", reafirmando su mayor eficiencia en el proceso de enfriamiento.

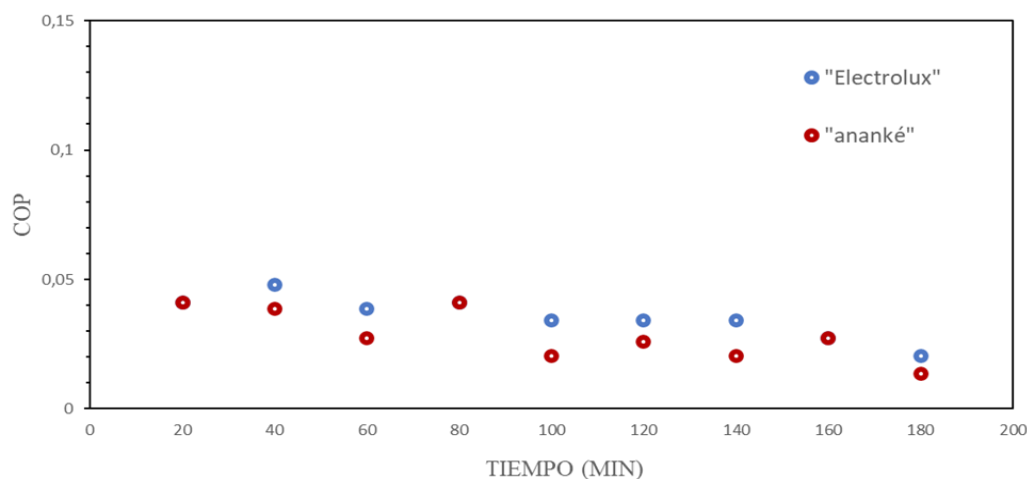


Figura 4-16 COP de 1 L de agua (12°C a 8°C)

Al examinar el consumo eléctrico de ambos equipos en intervalos de 20 minutos (Figura 4-17), se observa que el consumo se mantiene prácticamente idéntico y constante en ambos casos. Esto se debe a que tanto "Electrolux" como "ananké" operan a máxima capacidad, aprovechando al máximo su ciclo de refrigeración para extraer calor de manera continua.

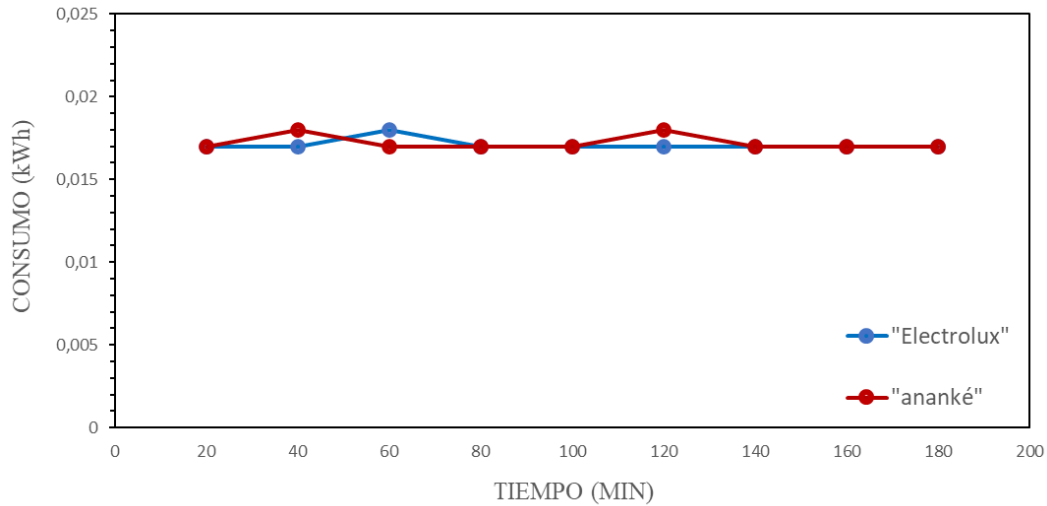


Figura 4-17 Consumo energético 1 L (12°C-8°C)

El análisis de la evolución de las temperaturas en la Figura 4-18 confirma que, sabiendo que ambos equipos presentan un consumo energético similar, "Electrolux" logra extraer una mayor cantidad de calor que "ananké", lo que explica sus valores de rendimiento superiores. Desde el inicio del experimento, el litro de agua contenido en "Electrolux" parte de una temperatura ligeramente más alta, pero al finalizar los 160 minutos de prueba, consigue enfriar el agua hasta 7,3°C, mientras que "ananké" solo alcanza una temperatura final de 8°C.

Si se analiza la temperatura del aire interior, aunque ambos frigoríficos parten de valores distintos, en el caso de "Electrolux" se aprecia un descenso más pronunciado, lo que refuerza su mayor eficiencia en la extracción de calor en comparación con "ananké".

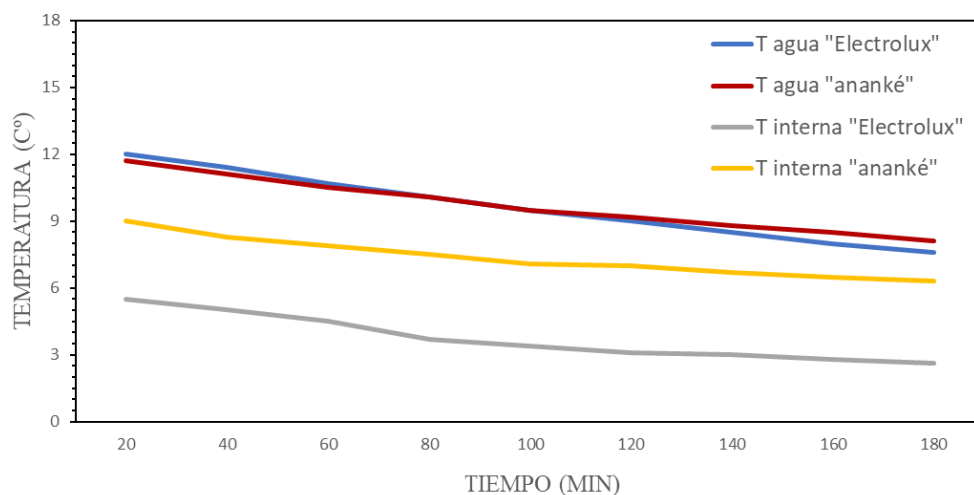


Figura 4-18 Evolución de temperaturas 1 L de agua (12°C-8°C)

Como resultado del experimento, se ha obtenido un COP total de 0,12 para "Electrolux" y de 0,1 para "ananké". Para este cálculo, se han tomado como referencia los valores obtenidos durante la primera fase del experimento (26°C-16°C), con el objetivo de obtener una estimación más realista. En condiciones óptimas, el COP esperado para frigoríficos con estas características suele situarse alrededor

de 0,2 [33]. En este análisis, "Electrolux" ha demostrado una mayor potencia frigorífica, lo que le permite ser más eficiente, ya que ambos equipos operan con un consumo energético idéntico de 65 W (establecido en las características de los equipos).

Este experimento confirma que, cuando los frigoríficos deben enfriar masas con un elevado calor específico, como es el caso del agua, el sistema se ve obligado a llevar su consumo energético al máximo y a optimizar al máximo su ciclo de absorción para lograr extraer el calor de manera eficiente.

4.1.3 Rendimiento enfriando 2 Litros de agua

Este experimento también se ha dividido en dos fases diferentes. En la primera, se ha analizado el proceso de enfriamiento de 2 litros de agua, en intervalos de 20 minutos, reduciendo su temperatura desde 30°C hasta los 20°C, mientras que en la segunda prueba se ha evaluado el enfriamiento de 12°C a 8°C.

El rendimiento de la primera fase se representa en la Figura 4-19 y muestra la misma tendencia que en el experimento anterior. En los primeros instantes se alcanzan los valores más altos debido a la alta temperatura de inicio (30°C) que comparada con la temperatura exterior (21,3°C), facilita en gran la labor de los frigoríficos de extracción de calor. Se produce la habitual curva descendente a medida que desciende la temperatura del agua y avanza el tiempo. También en este experimento "Electrolux" sigue mostrando una eficiencia superior a la de "ananké" a lo largo de toda la prueba.

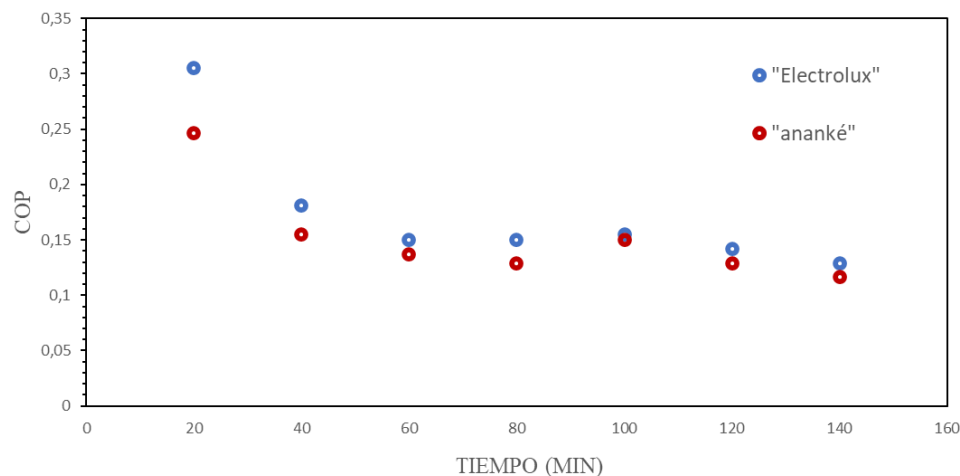


Figura 4-19 COP de 2 L de agua (30°C-20°C)

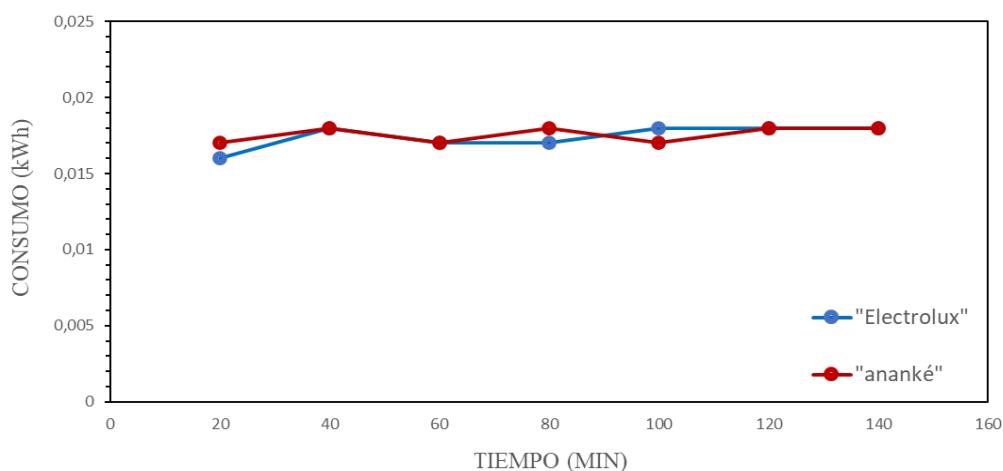


Figura 4-20 Consumo energético 2 L de agua (30°C-20°C)

El análisis del consumo energético, representado en la Figura 4-20, muestra que ambos equipos mantienen un consumo bastante estable y similar a lo largo del experimento. Sin embargo, como es habitual, "Electrolux" destaca por su menor consumo energético, ajustando su demanda únicamente cuando es necesario para alcanzar el objetivo de enfriamiento de manera eficiente.

En la Figura 4-21 se refleja la evolución de las temperaturas del agua y del aire, confirmando una vez más la mayor eficiencia de "Electrolux" en comparación con "ananké". El agua parte de una temperatura inicial de 30°C, y al final del experimento, se observa que la temperatura del agua dentro de "Electrolux" es ligeramente inferior, lo que indica un mejor desempeño en la extracción de calor, sabiendo que ambos equipos presentan un consumo energético similar.

Este comportamiento también se evidencia en la evolución de la temperatura del aire interno, donde la tendencia en "Electrolux" muestra un descenso más pronunciado en comparación con "ananké", reafirmando su superioridad en eficiencia térmica.

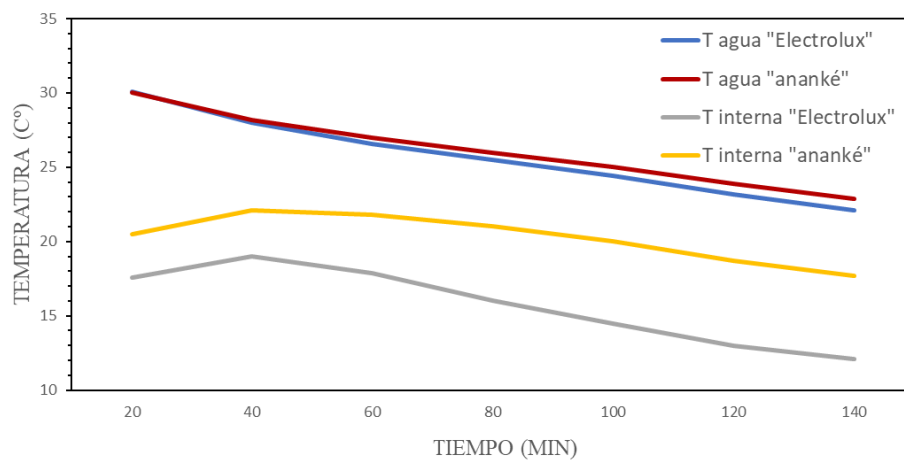


Figura 4-21 Evolución de temperaturas 2 L de agua (30°C-20°C)

En la segunda fase del experimento, en la que el agua se enfría de 14°C a 11°C, se confirman de manera definitiva las tendencias observadas en las pruebas anteriores. Dado que en esta etapa se trabaja con temperaturas más bajas, los valores de rendimiento (Figura 4-22) se mantienen reducidos, aunque sigue presente la tendencia descendente, ya que la eficiencia del proceso disminuye a medida que la temperatura del agua se aleja de la temperatura ambiente. A lo largo de toda la prueba, "Electrolux" continúa registrando rendimientos superiores en comparación con "ananké", reafirmando su mayor capacidad de enfriamiento.

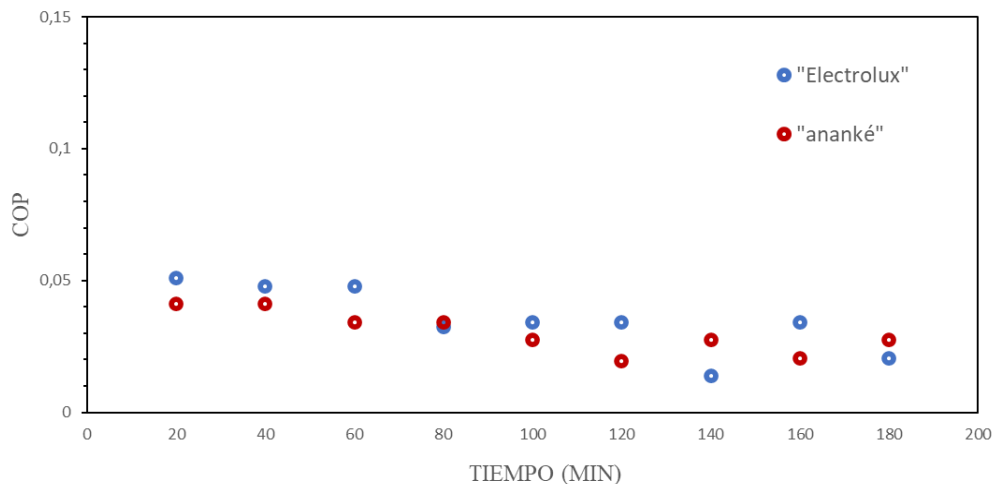


Figura 4-22 COP de 2 L de agua (14°C-11°C)

Al examinar el consumo enero de ambos equipos en intervalos de 20 minutos (Figura 4-23), se observa que el consumo se mantiene prácticamente similar y constante en ambos casos pues operan a máxima capacidad debido a la gran cantidad de calor que deben extraer del interior del equipo.

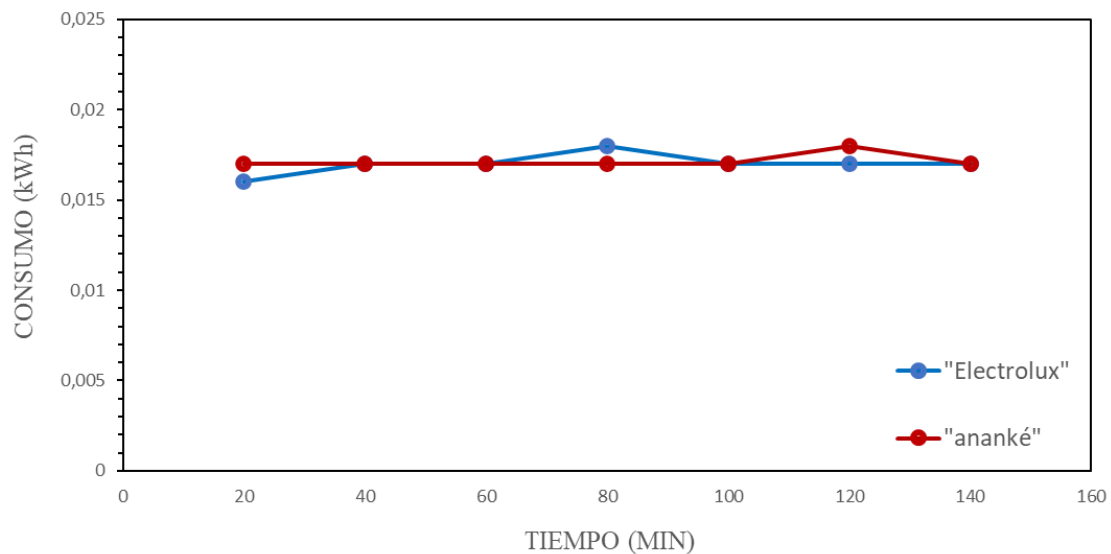


Figura 4-23 Consumo energético de 2 L (14°C-11°C)

El estudio de la evolución de las temperaturas, representado Figura 4-24, explica los valores de COP obtenidos, ya que está directamente relacionado con la variación de temperatura en el interior de. A lo largo del experimento, "Electrolux" consigue mantener una ligera diferencia de temperatura en comparación con "ananké", mostrando una mayor capacidad de extracción de calor. Esta diferencia se hace aún más evidente en la temperatura del aire, donde la tendencia muestra una variación más marcada a favor de "Electrolux".

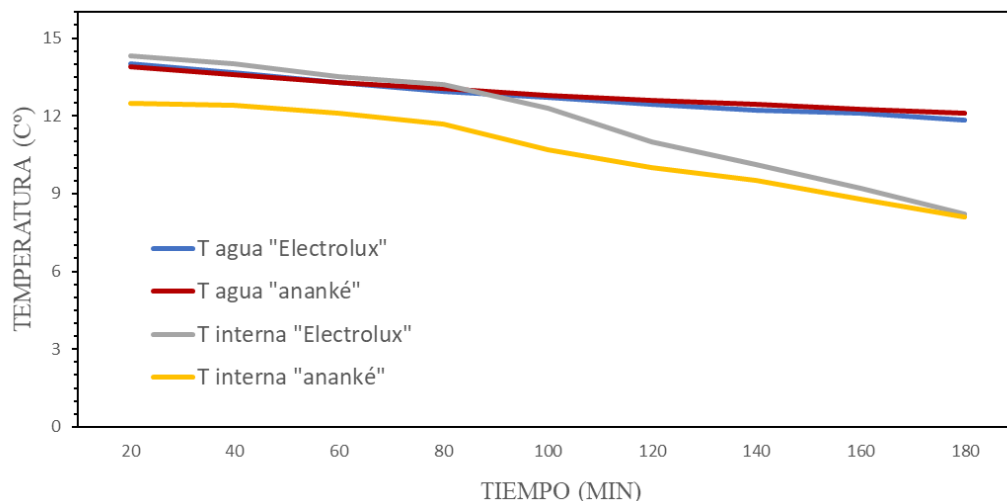


Figura 4-24 Evolución de temperaturas 2 L de agua (14°C-11°C)

Los resultados del experimento reflejan un COP total de 0,17 para "Electrolux" y 0,14 para "ananké". Para este cálculo, se han tomado como referencia los valores obtenidos en la primera fase del experimento (30°C - 20°C) con el objetivo de obtener una estimación más precisa del rendimiento.

Esta prueba puede considerarse la más representativa del comportamiento real de los frigoríficos, ya que, al utilizar 2 litros de agua como fuente de calor a extraer, se trabaja con una cantidad de energía significativa. La reducción de temperatura de 30°C a 20°C en 2 litros de agua supone una extracción

aproximada de 70.000 J, lo que permite minimizar el impacto de otros factores no considerados en la fase experimental, como la humedad ambiental o el enfriamiento de las paredes interiores.

A partir de estos resultados, se puede concluir que el rendimiento real de ambos equipos se encuentra dentro del rango de 0,2 a 0,1, siendo "Electrolux" el que demuestra una mayor eficiencia frigorífica. En cuanto al consumo energético, ambos frigoríficos presentan valores muy similares a lo largo del experimento. Sin embargo, "Electrolux" inicia el proceso con un consumo menor, ajustándose dinámicamente a las necesidades del enfriamiento, mientras que "ananké" mantiene un consumo ligeramente superior desde el principio.

4.2 Análisis del flujo de calor

Tras recopilar los datos requeridos para aplicar la Ecuación 3 y Ecuación 4, obteniendo valores de potencia frigorífica (P) y UA en intervalos de 10 minutos para ambos equipos, se realiza un análisis de la evolución de estos parámetros en función del tiempo, así como una comparación de la eficiencia de sus capacidades de aislamiento.

En la Figura 4-25 se realiza la comparación de los valores que ha tomado UA a lo largo del experimento para ambos experimentos. El experimento comienza cuando las neveras se desconectan de la corriente, lo que provoca que la resistencia deje de generar calor. Sin embargo, el ciclo de refrigeración continúa funcionando por algunos minutos, manteniendo un efecto de enfriamiento cada vez más débil y en menor medida. Este proceso se prolonga hasta que la temperatura en el generador ya no es suficiente para producir burbujas de amoníaco que asciendan al condensador. Alrededor de los 30 minutos de experimento, se empiezan a notar los efectos del flujo de calor proveniente del exterior, lo que provoca un aumento progresivo en la temperatura del agua interior hasta alcanzar un valor estable de UA.

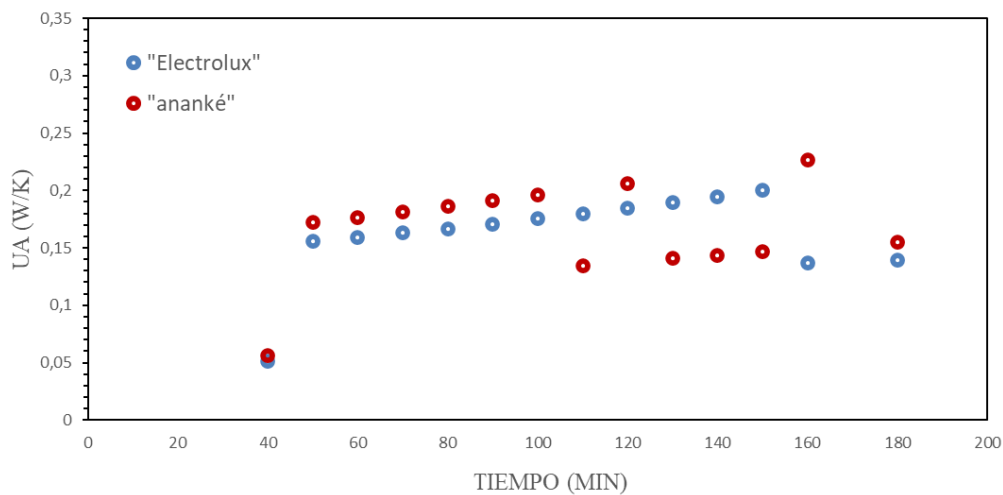


Figura 4-25 Capacidad de aislamiento

Como se muestra en la gráfica, a los 40 minutos comienza el aumento de UA, ya que el agua empieza a perder temperatura debido al ingreso del flujo de calor. Transcurrida una hora de experimento, el valor de UA se estabiliza en ambos equipos, con "ananké" presentando un valor ligeramente mayor.

En la Figura 4-26 se refleja la evolución de las temperaturas interna y de agua en función del tiempo para el frigorífico "ananké". Durante los primeros 20 minutos del experimento, se advierte que el equipo continúa refrigerando, ya que la temperatura del agua experimenta un ligero descenso antes de comenzar a aumentar. En contraste, esto no ocurre con el aire, que, debido a su bajo calor específico, se calienta desde el inicio como consecuencia del flujo de calor entrante.

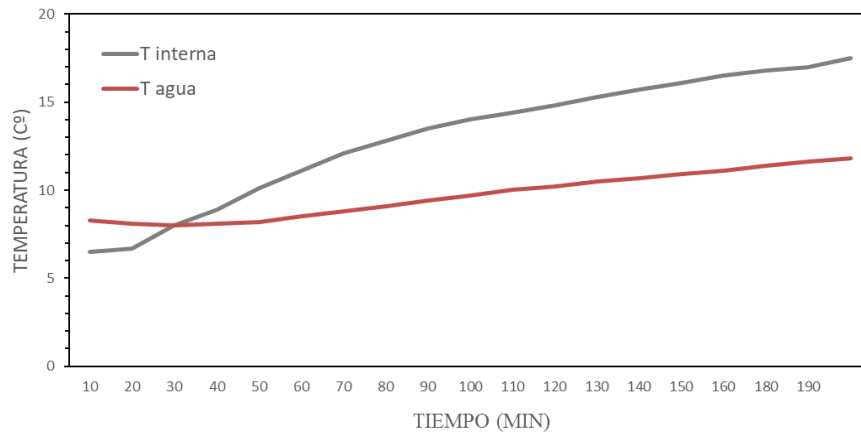


Figura 4-26 Evolución de temperaturas UA "ananké"

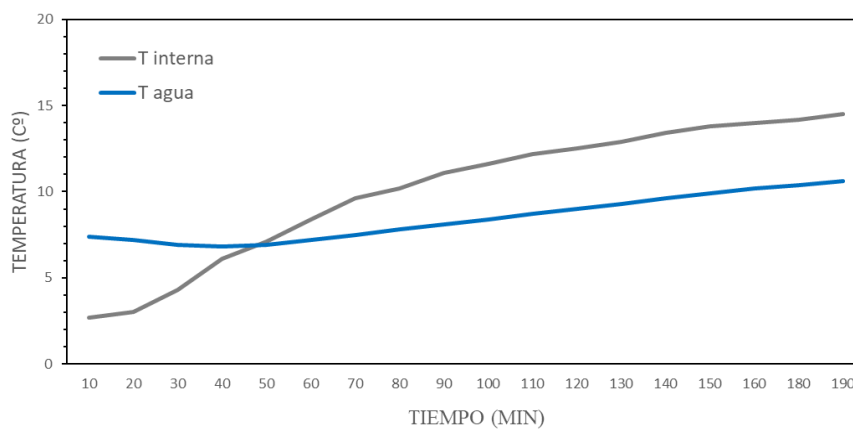


Figura 4-27 Evolución de temperaturas UA "Electrolux"

Para el caso de "Electrolux", se presenta en la Figura 4-27 un comportamiento muy similar, donde la temperatura del agua desciende ligeramente durante los primeros 20 minutos antes de comenzar a aumentar. En cuanto a la temperatura del aire en el interior, esta empieza a elevarse desde el inicio del experimento, intensificando su tendencia ascendente a partir de la media hora.

Como conclusión, a partir del análisis de los valores de potencia frigorífica (P) y del coeficiente de transferencia de calor (UA) en ambos equipos, se ha podido evaluar su desempeño térmico y eficiencia en la capacidad de aislamiento.

Los resultados muestran que, al desconectar las neveras de la corriente, el ciclo de refrigeración continúa funcionando por algunos minutos, generando un efecto de enfriamiento hasta que la temperatura en el generador ya no es suficiente para mantener el proceso de refrigeración. Aproximadamente 30 minutos, se observa un incremento progresivo en UA debido al flujo de calor proveniente del exterior, alcanzando valores estables aproximadamente una hora después del inicio del experimento.

En cuanto a la evolución de temperaturas, tanto en el frigorífico "Ananké" como en "Electrolux", se evidencia un comportamiento similar: la temperatura del agua disminuye ligeramente en los primeros 20 minutos y luego comienza a aumentar, mientras que la temperatura del aire interno aumenta desde el inicio debido a su menor capacidad calorífica. No obstante, "Ananké" presenta un valor de UA ligeramente mayor, lo que sugiere una menor eficiencia en el aislamiento térmico en comparación con "Electrolux".

4.3 Evolución de las temperaturas del ciclo

El frigorífico “ananké” muestra una evolución térmica (véase Figura 4-28) que sigue el comportamiento esperado en un sistema de refrigeración por difusión-absorción. Al principio del experimento, se observa un incremento progresivo de la temperatura en el generador, a medida que la resistencia calienta el conducto por el que circula la solución amoníaco-agua, alcanzando a la salida de este un valor estable en torno a los 100°C. Este calentamiento es necesario para activar la bomba de burbujas y generar el flujo de amoníaco hacia el evaporador.

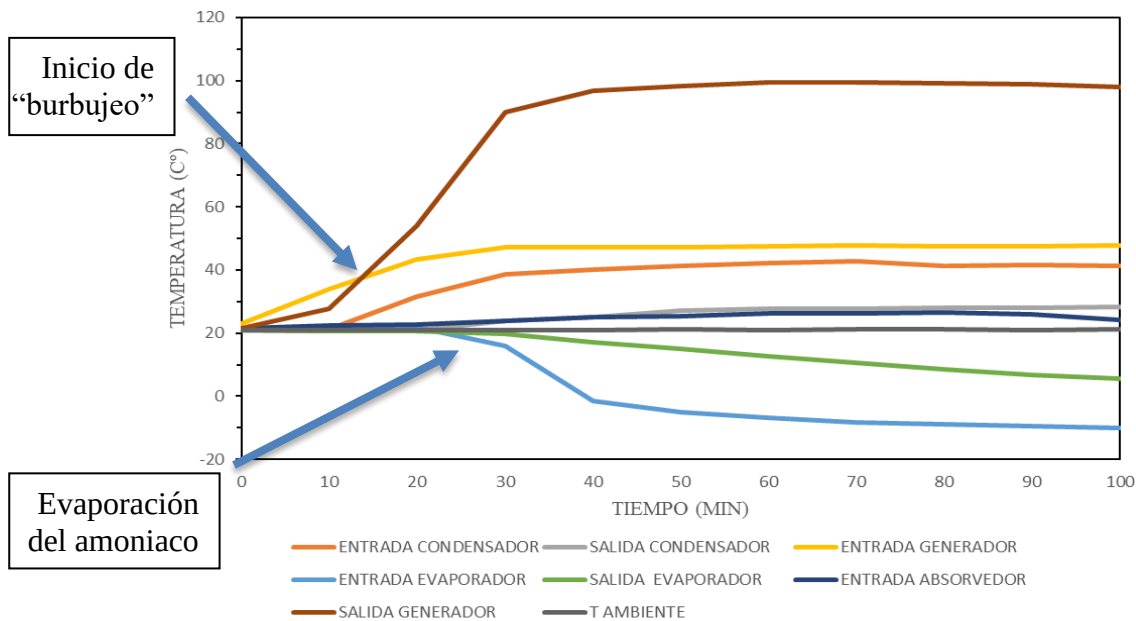


Figura 4-28 Temperaturas del ciclo "ananké"

El condensador presenta un comportamiento típico, con una diferencia de temperatura moderada entre la entrada y la salida. Esto indica que el calor disipado en el condensador sigue un patrón estable.

La entrada y salida del condensador muestran un ascenso en los primeros 30 minutos, debido a la circulación del amoníaco en estado gaseoso y a gran temperatura, estabilizándose posteriormente. Respecto al evaporador, la temperatura a la entrada desciende de manera drástica después de los 30 minutos, con una caída marcada que confirma el inicio del proceso de refrigeración. La salida del evaporador, por su parte, refleja un enfriamiento progresivo, alcanzando temperaturas cercanas a los 0°C, lo que indica que la evaporación del amoníaco está logrando extraer calor del sistema de manera efectiva, al aumentar notablemente su temperatura respecto a la de entrada.

Como se puede observar en la Figura 4-28, aproximadamente a los 15 minutos de experimento se produce el “Inicio de burbujeo” [33]. Este hecho se produce cuando la temperatura en la salida del generador supera la de entrada, lo que indica que el amoníaco ha comenzado a separarse del agua en forma de burbujas. Este proceso permite que el vapor ascienda por el conducto hasta la salida del generador, provocando un aumento significativo en su temperatura.

Por otro lado, también se aprecia el momento en que el frigorífico inicia su proceso de enfriamiento, a la media hora después del inicio del ciclo, cuando la temperatura en la entrada del evaporador disminuye de manera drástica. Esto ocurre cuando una cantidad significativa de amoníaco fluye desde el condensador y, al mezclarse con el hidrógeno, comienza a evaporarse dentro del evaporador, generando el efecto refrigerante. Una característica distintiva de este equipo (véase apartado 3.2.2) es que la entrada del evaporador está diseñada en forma de serpentín, el cual recorre su trayectoria en

paralelo al evaporador. Este diseño permite que el amoníaco llegue a una temperatura aún más baja antes de entrar en el evaporador, optimizando el rendimiento del sistema.

Respecto al frigorífico “Electrolux” se muestra una evolución similar (véase Figura 4-29) a la “ananké”, pero con ciertas diferencias clave en el comportamiento de los componentes. El generador muestra una curva de calentamiento más pronunciada en los primeros minutos, hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 100°C en la salida. Esto indica que el sistema podría estar acelerando el proceso de activación del burbujeo. En el condensador, destaca frente a “ananké” su alta temperatura de entrada, en torno a los 50°C, debido a que este equipo no consta de un rectificador. Como es lógico, a la salida del condensador también se aprecian temperaturas ligeramente superiores.

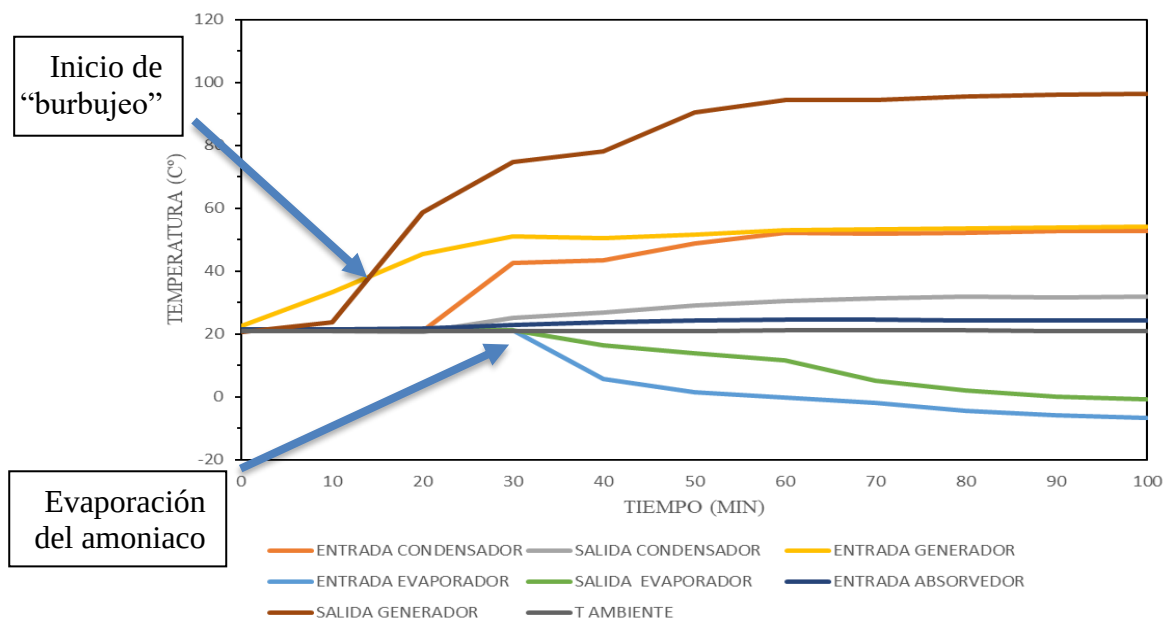


Figura 4-29 Temperaturas del ciclo "Electrolux"

El evaporador en “Electrolux” muestra un enfriamiento similar, aunque registra temperaturas de entrada superiores debido a su diseño, ya que a diferencia de “ananké”, la entrada al evaporador se produce de manera prácticamente inmediata desde que se mezcla con el hidrógeno (ver apartado 3.2.1)

En este equipo, el inicio del “burbujeo” ocurre también alrededor de los 15 minutos de experimento, evidenciado por un notable incremento en la temperatura de salida del condensador en comparación con la de entrada. Este aumento indica la presencia de burbujas de amoníaco a alta temperatura que se dirigen hacia el condensador, señalando el avance del ciclo de refrigeración.

Como conclusión del experimento, se ha cumplido con el objetivo de analizar la evolución térmica de ambos equipos y comparar sus similitudes y diferencias. Se ha podido comprobar que el inicio del burbujeo y el tiempo de enfriamiento son muy similares en “ananké” y “Electrolux”, cuando operan bajo las mismas condiciones de temperatura ambiente. En cuanto al comportamiento del resto de los componentes, las temperaturas registradas coinciden con los valores típicos observados en sistemas de refrigeración por difusión-absorción.

Entre las diferencias más destacadas, se observa que la temperatura de entrada al evaporador alcanza valores significativamente más bajos en “ananké” en comparación con “Electrolux”. Esto podría atribuirse a su diseño y a ciertas variaciones en el ciclo de refrigeración, lo que podría afectar negativamente su eficiencia.

Por otro lado, en “Electrolux”, la temperatura a la entrada del condensador es notablemente más alta, lo que puede ser perjudicial para el sistema. Un aumento excesivo en esta temperatura podría favorecer la introducción de agua en el condensador, afectando su funcionamiento y alterando el equilibrio del

ciclo de refrigeración. Este factor podría estar relacionado con el fallo del equipo tras varias horas de operación, un aspecto que se analizará en mayor profundidad en el siguiente experimento (véase apartado 4.4)

4.4 Análisis específico del refrigerador "Electrolux"

4.4.1 Capacidad de enfriamiento

Las temperaturas registradas en los cuatro puntos del evaporador de ambos equipos se representan en la Figura 4-30 y Figura 4-31. La primera medición corresponde a la entrada del evaporador, mientras que la última se ubica en la zona más próxima a su salida. En la fase inicial del experimento, se observa un descenso pronunciado de la temperatura en la entrada del evaporador, lo que indica el inicio de la evaporación del amoníaco. A medida que este proceso avanza, se produce un enfriamiento progresivo en los puntos siguientes del evaporador, siguiendo un patrón en el que las zonas más cercanas a la entrada presentan temperaturas más bajas.

Este comportamiento continúa hasta que el sistema alcanza el punto en el que se ha evaporado la totalidad del amoníaco que el ciclo es capaz de introducir en el evaporador. Dicho momento coincide con la fase final del experimento, en la que las temperaturas comienzan a estabilizarse. En ese estado estacionario, la temperatura más baja se registra en el segundo punto (T 2), lo que sugiere que en esa zona tiene lugar la mayor parte del proceso de evaporación del refrigerante. Cuanto más se extienda la zona de bajas temperaturas a lo largo del evaporador, mayor será la cantidad de amoníaco que se está evaporando. Esto implica, por tanto, una mayor cantidad de refrigerante en circulación y, en consecuencia, una mayor capacidad de absorción de calor por parte del sistema.

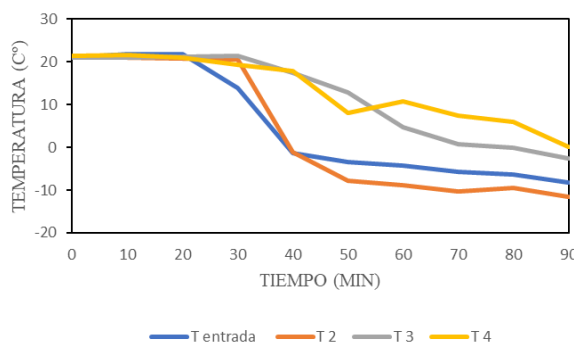


Figura 4-30 Temperaturas de evaporador "ananké"

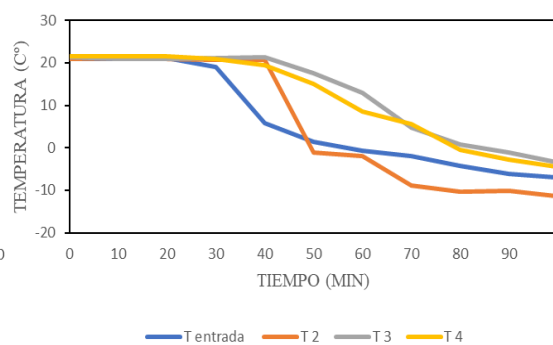


Figura 4-31 Temperaturas de evaporador "Electrolux"

Para comprobar si "Electrolux" introduce una mayor cantidad de refrigerante en el evaporador, es necesario analizar la temperatura más próxima a su salida, correspondiente al punto cuatro (T 4). En este punto, se registra una temperatura de $-4,4^{\circ}\text{C}$ en "Electrolux", mientras que en "ananké" se alcanza un valor de 0°C . Este dato, junto con el hecho de que "Electrolux" también presenta temperaturas más bajas en el punto tres (T 3), permite deducir que en su evaporador se está produciendo una mayor cantidad de evaporación de amoníaco. Esta diferencia indica que "Electrolux" está introduciendo un mayor volumen de refrigerante en el evaporador.

Este análisis permite justificar por qué "Electrolux" alcanza un mayor nivel de enfriamiento en comparación con "ananké", a pesar de presentar una temperatura de entrada al evaporador más elevada y de iniciar el proceso de burbujeo de forma simultánea en ambos equipos. La mayor cantidad de amoníaco en evaporación influye positivamente en el rendimiento térmico del sistema, incrementando

su capacidad de refrigeración. No obstante, este mismo factor podría estar generando un desequilibrio en el ciclo, lo cual podría explicar la interrupción del funcionamiento tras varias horas de funcionamiento.

4.4.2 Empleo de placas de aluminio

Tras la instalación de las placas de aluminio, se observa una variación significativa en las temperaturas medidas a la entrada y salida del condensador, en comparación con los valores previos. La temperatura de entrada al condensador se reduce de 50 °C a 44 °C, mientras que la temperatura de salida desciende de 32 °C a 27 °C. Esta disminución de temperatura implica que el amoníaco accede al evaporador a una temperatura más baja, lo que favorece una evaporación más eficiente y, en consecuencia, mejora el rendimiento global del sistema de refrigeración.

Una vez comprobada la eficacia de las placas de aluminio en la disipación de calor, se procede a analizar cómo esta mejora térmica influye en el comportamiento general del ciclo de refrigeración. Tal y como se muestra en la Figura 4-32, se observa un descenso más pronunciado en la temperatura de entrada al evaporador. Esto se debe a que el amoníaco, al salir del condensador a una temperatura más baja, se evapora con mayor facilidad al interactuar con el hidrógeno, lo que favorece una transferencia de calor más eficiente.

Se aprecia, además, que el inicio del proceso de enfriamiento se adelanta, produciéndose a los 20 minutos del experimento, en comparación con los 30 minutos requeridos en el caso del "Electrolux" original. Asimismo, se alcanzan temperaturas más bajas dentro del evaporador, lo que se traduce en un enfriamiento más rápido y efectivo. Esta mejora tiene un impacto directo en el rendimiento térmico del sistema. Es relevante señalar que no se han detectado variaciones significativas en el comportamiento del resto de los componentes del circuito, lo que confirma que la incorporación de las placas de aluminio en la zona de entrada al condensador representa una mejora clara en la eficiencia, sin alterar negativamente el equilibrio del sistema.

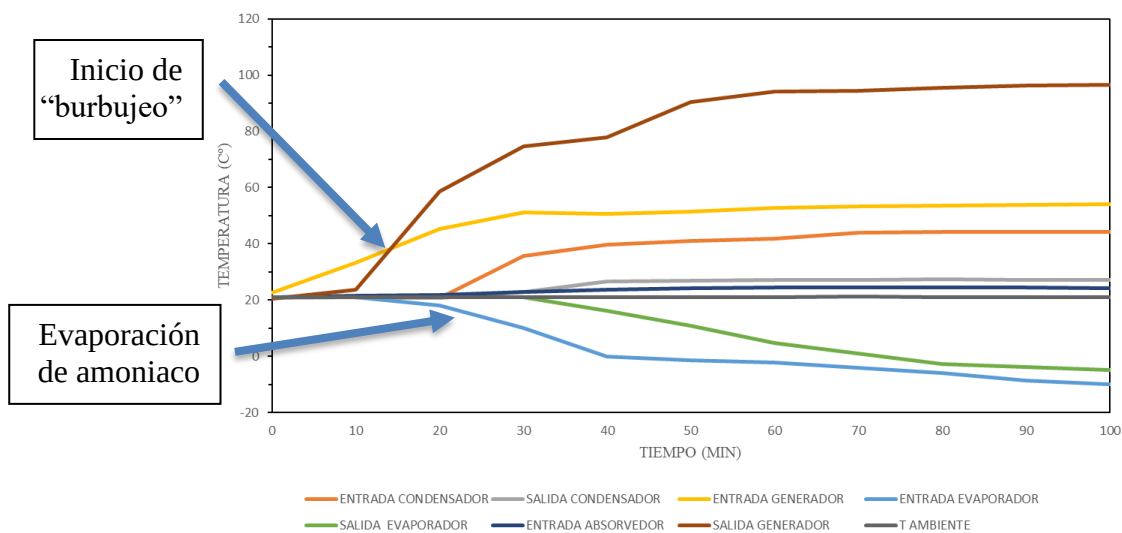


Figura 4-32 Temperaturas del ciclo "Electrolux" con placas de aluminio

Aunque la instalación de las placas de aluminio ha contribuido a mejorar la capacidad de enfriamiento del equipo, uno de los objetivos principales de su incorporación era facilitar la condensación de posibles trazas de agua que pudieran estar accediendo al condensador y, potencialmente, provocando el fallo del sistema. Sin embargo, tras aproximadamente seis horas de

funcionamiento continuo, el equipo vuelve a presentar la misma anomalía: la evaporación del amoníaco se interrumpe repentinamente, lo que indica que el problema persiste.

Este resultado sugiere que, si bien la presencia de agua en el condensador no puede descartarse por completo, su probabilidad como causa principal del fallo se ve reducida. En consecuencia, será necesario continuar explorando otras hipótesis que puedan explicar el comportamiento anómalo del sistema.

4.4.3 Hipótesis y razonamiento sobre los posibles fallos del ciclo.

A partir de los experimentos y análisis realizados, es posible formular varias hipótesis respecto al origen de la anomalía que presenta el frigorífico "Electrolux". En el apartado 4.4.2 se aborda la hipótesis relacionada con la posible entrada de agua en el condensador. Aunque se logra reducir la temperatura de entrada mediante la incorporación de placas disipadoras, el equipo continúa presentando fallos, lo que indica que esta no sería la causa principal del problema.

Adicionalmente, se ha evaluado la cantidad de refrigerante en fase de evaporación dentro del evaporador de ambos equipos. Los resultados muestran que, a pesar de que "ananké" contiene 100 g de NH_3 frente a los 90 g de NH_3 en "Electrolux", es este último el que presenta una mayor cantidad de amoníaco en evaporación. Este comportamiento sugiere una mejor separación del amoníaco en la bomba de burbujas de "Electrolux", lo que inicialmente mejora su rendimiento. Sin embargo, este exceso de refrigerante podría provocar un desequilibrio en el sistema, comprometiendo la estabilidad del ciclo a largo plazo.

En relación con los materiales empleados en los conductos del sistema, es importante destacar que, aunque ambos equipos están fabricados con acero [38], existen diferencias significativas en el tipo de aleación utilizada. En el caso de "ananké", se utiliza acero inoxidable, lo cual justifica la ausencia de aditivos anticorrosivos en el circuito. Este material, sin embargo, presenta una conductividad térmica inferior, aproximadamente $15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, en comparación con el acero al carbono empleado en "Electrolux", cuya conductividad térmica ronda los $45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y que requiere la incorporación de cromato de sodio como inhibidor de la corrosión.

Esta diferencia en las propiedades térmicas implica una variación sustancial en el diseño del sistema. En "Electrolux", por ejemplo, la alta conductividad del acero al carbono permite reducir la temperatura del refrigerante desde aproximadamente 100°C a 50°C entre la bomba de burbujeo y el condensador sin necesidad de incorporar un rectificador, como sí ocurre en "ananké".

Con base en esta información, pueden plantearse las siguientes hipótesis respecto al comportamiento diferencial de ambos equipos:

- Exceso de calor en el generador implica demasiada separación del amoníaco que puede provocar un exceso de cantidad de refrigerante en el evaporador [33].

Los datos experimentales indican que "Electrolux" presenta una mayor cantidad de amoníaco en evaporación dentro del evaporador, a pesar de tener una carga total de refrigerante inferior (90 g frente a los 100 g de "ananké"). Esto sugiere una separación más eficiente del amoníaco en la bomba de burbujas, lo que a corto plazo incrementa el rendimiento del sistema. Sin embargo, si la cantidad de amoníaco en el evaporador supera la capacidad de absorción del ciclo, puede provocar un desequilibrio interno, dificultando la reabsorción del gas y generando acumulaciones que bloquean o detienen el ciclo térmico tras varias horas de funcionamiento.

- Acumulación de gases no condensables [39].

Durante el funcionamiento prolongado del equipo, pueden acumularse gases no condensables como aire o vapor de agua en el interior del circuito, especialmente en la zona del evaporador. Estos gases

interfieren en el proceso de evaporación del amoníaco al modificar la presión parcial dentro del tubo, dificultando la transición de fase del refrigerante. Como resultado, se reduce la eficiencia térmica y, eventualmente, se detiene la evaporación, provocando que el evaporador permanezca a temperatura ambiente y se pierda completamente el efecto frigorífico. La recuperación temporal del sistema tras desenchufarlo respalda esta hipótesis, ya que permite la redistribución y posible disolución de estos gases.

- Obstrucciones internas por residuos de corrosión [40] .

El uso de cromato de sodio como inhibidor de la corrosión en "Electrolux" sugiere que el equipo está fabricado con acero al carbono, un material susceptible a la formación de óxidos y residuos sólidos con el paso del tiempo. Estos productos pueden depositarse en los conductos más estrechos, como (como la entrada al evaporador) del sistema generando obstrucciones parciales. Este tipo de bloqueos afectan la circulación del refrigerante, alterando presiones, flujos y temperaturas, y pueden ser responsables de una parada progresiva del ciclo frigorífico. Esta opción es la más probable pues este frigorífico es una versión antigua de un modelo que ya está descatalogado por lo que probablemente tenga demasiados años de uso.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Tras el desarrollo teórico y experimental llevado a cabo en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones clave sobre el funcionamiento y el rendimiento energético de los sistemas de refrigeración por absorción de tipo difusión-absorción (DAR) aplicados a frigoríficos de pequeña capacidad:

Viabilidad técnica del sistema DAR: Los sistemas de refrigeración por difusión-absorción basados en la mezcla amoníaco-agua-hidrógeno han demostrado ser una alternativa funcional a los sistemas tradicionales de compresión, especialmente en contextos donde se valora la simplicidad, la ausencia de partes móviles y la posibilidad de funcionar con un consumo eléctrico reducido.

Bajo rendimiento energético (COP): Los valores de COP obtenidos durante la fase experimental, tanto con cargas de aire como de agua, se sitúan en el rango esperado para este tipo de sistemas (0.2 – 0.3). Este rendimiento es significativamente inferior al de los sistemas por compresión de vapor, lo que limita su aplicación a contextos muy específicos.

Diferencias entre equipos analizados: Aunque ambos modelos (“Electrolux” y “ananké”) comparten el mismo principio de funcionamiento, se observaron diferencias en su rendimiento. El frigorífico “Electrolux” muestra valores superiores al introducir mayor cantidad de refrigerante en el evaporador, aunque en estos sistemas el equilibrio entre soluciones ha de ser el idóneo para el buen funcionamiento del ciclo.

Importancia del control térmico y diseño del ciclo: Las temperaturas alcanzadas en cada fase del ciclo (generador, condensador, evaporador y absorbedor) afectan directamente al rendimiento global. Cualquier desviación o fallo en el equilibrio térmico puede comprometer la capacidad de enfriamiento, tal y como se observó en el caso del “Electrolux”, donde se hipotetizaron posibles fallos en la circulación del hidrógeno o en la absorción del amoníaco. En cuanto al diseño del ciclo, se ha demostrado que es clave disminuir la temperatura del refrigerante una vez que atraviesa la bomba de burbujas, con el fin de que alcance el evaporador a una temperatura lo más baja posible. Esto favorece su evaporación y mejora directamente la eficiencia del ciclo y para ello es imprescindible un diseño optimizado del sistema.

Aplicabilidad en entornos específicos: A pesar de su bajo rendimiento, los sistemas DAR siguen siendo útiles en situaciones donde el acceso a electricidad es limitado, el ruido debe reducirse al mínimo, o se dispone de una fuente de calor residual o renovable. Esto los hace especialmente atractivos para aplicaciones portátiles, navales o en entornos sin red eléctrica.

En conjunto, este trabajo ha permitido confirmar tanto las limitaciones como las fortalezas de los sistemas de refrigeración por absorción-difusión, evidenciando que, si bien no son la opción más eficiente desde el punto de vista energético, sí ofrecen ventajas considerables en términos de simplicidad operativa, ahorro energético, sostenibilidad y adaptabilidad a escenarios específicos.

5.2 Líneas futuras

En base a los resultados obtenidos, se abren diversas líneas de trabajo orientadas a mejorar el rendimiento de los sistemas de absorción y a potenciar su aplicación en sectores donde sus ventajas puedan ser determinantes.

Una de las principales vías de mejora pasa por optimizar el diseño térmico de los componentes clave del ciclo DAR, especialmente en lo referente a la transferencia de calor y el aislamiento del sistema. Mejorar la geometría de los intercambiadores, incorporar materiales con mayor conductividad térmica o rediseñar la distribución interna del frío puede traducirse en un aumento significativo del rendimiento.

Asimismo, el uso exclusivo de energía térmica en estos sistemas permite su integración natural con fuentes renovables como la energía solar o el calor residual. Promover esta combinación permitiría disponer de equipos más eficientes, autónomos y respetuosos con el medio ambiente, especialmente útiles en zonas aisladas o sin acceso a electricidad.

Por otro lado, resulta de gran interés seguir investigando nuevos pares de trabajo y gases inertes que puedan ofrecer mejores prestaciones, mayor seguridad o un impacto ambiental aún más reducido. También se podrían explorar nuevas configuraciones híbridas que combinen la absorción con otras tecnologías para aumentar su flexibilidad y adaptabilidad.

Finalmente, es fundamental fomentar el uso de estos sistemas en entornos específicos donde sus ventajas sean especialmente relevantes: medios navales, vehículos, zonas rurales o aplicaciones portátiles. Para ello, será clave impulsar su estandarización, mejorar su accesibilidad y promover políticas que incentiven su desarrollo y adopción. En este contexto, una línea especialmente interesante para futuros Trabajos de Fin de Grado en la Escuela Naval Militar podría centrarse en la mejora y análisis en profundidad del funcionamiento del frigorífico "Electrolux" así como el estudio de posibles mejoras aplicadas a este tipo de sistemas, el cual ha mostrado anomalías durante los ensayos experimentales. Comprender con mayor precisión el origen de estas posibles deficiencias (ya sea por fallos térmicos, circulación deficiente de hidrógeno o problemas de absorción) permitiría no solo optimizar este modelo en particular, sino también avanzar en el entendimiento general del comportamiento real de los sistemas de difusión-absorción.

Este enfoque permitiría consolidar una base experimental más robusta para el estudio de sistemas térmicos autónomos, alineándose con las necesidades específicas del entorno naval, donde la fiabilidad, la autonomía energética y la baja sonoridad de los equipos son factores clave. Así, se propone continuar con la línea de investigación iniciada en este trabajo mediante nuevos proyectos que, desde un enfoque aplicado, profundicen en el diseño, diagnóstico y mejora de frigoríficos de absorción en condiciones reales de uso.

En conjunto, los sistemas de absorción presentan un enorme potencial para convertirse en una alternativa real y eficiente, especialmente en el contexto de transición energética actual. Impulsar su evolución tecnológica y su implementación práctica será un paso clave hacia un modelo de refrigeración más sostenible.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Biografía de William Cullen Bryant,” Biografías y Vidas. [En línea]. Disponible en: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/bryant.htm>. [Consultado: 6 de febrero de 2025].
- [2] I. González Cortés, «Análisis exérgico del sistema de refrigeración por absorción», Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2014. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000706704/3/0706704.pdf>
- [3] López, M. A. N., «Sistema de refrigeración doméstico a través de energía solar», Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2020. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000804498/3/0804498.pdf>
- [4] P. Hertzmann, «The Refrigerator Revolution». Technological University Dublin, 31 de mayo de 2016. Accedido: 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://arrow.tudublin.ie/dgs/2016/May31/19/>
- [5] «Jacob Perkins», Google Arts & Culture. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://artsandculture.google.com/entity/jacob-perkins/m077wcm>
- [6] R. C. Grados, «La invención de Carré para el frío – Revista Cero Grados». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://0grados.com/la-invencion-de-carre-para-el-frio/>
- [7] «Segunda Ley de la Termodinamica». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.fisicalab.com/apartado/segundo-principio-termo#google_vignette
- [8] «Ciclos-Termodinamicos 2 | PDF | Motor de combustión interna | Calor», Scribd. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/451789809/ciclos-termodinamicos-202-1>
- [9] «Eficiencia energética en las instalaciones de climatización en los edificios». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://reader.digitalbooks.pro/content/preview/books/39119/book/OEBPS/Text/chapter1.html>
- [10] refrinoticias, «aire acondicionado de los aviones », REFRINOTICIAS.com :::: EL PORTAL LÍDER EN INFORMACIÓN HVAC/R DE LATINOAMÉRICA. Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://refrinoticias.com/aire-acondicionado-en-los-aviones/>
- [11] E. J. Casas Del Ángel, L. A. López López, J. A. Vazquez Aguilar, A. I. Camarena Ortiz, J. U. Jiménez García, y J. M. Belman Flores, «Modelo empírico de una planta de refrigeración usando R1234ze(E)», *JÓVENES EN Cienc.*, vol. 28, oct. 2024, doi: 10.15174/jc.2024.4474.

- [12] T. G. Edgar Vicente, A. C. Fernando Gabriel, L. L. Raúl, L. M. Helen Denise, y T. A. Alejandro, «Estudio exergoeconómico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor de dos etapas», en *Libro de actas XI Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío Cytef2022. Avances en Ciencias y Técnicas del Frío - 11*, Universidad Politécnica de Cartagena. Ediciones UPCT, abr. 2022. doi: 10.31428/10317/11563.
- [13] T. O. Babarinde, S. A. Akinlabi, y D. M. Madyira, «The Use of Hydrocarbon Refrigerants in Combating Ozone Depletion and Global Warming: A Review», en *Trends in Mechanical and Biomedical Design*, E. T. Akinlabi, P. Ramkumar, y M. Selvaraj, Eds., en *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 731-739. doi: 10.1007/978-981-15-4488-0_61.
- [14] A. N. A. Esquivel, «ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE SUSTANCIAS AGOTADORAS DE LA CAPA DE OZONO-SAO Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN EN COLOMBIA».
- [15] «La Evolución de los Refrigerantes», Blog Quimobásicos. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogquimobasicos.com/2018/03/01/la-evolucion-de-los-refrigerantes/>
- [16] W. Y. Park, N. Karali, y N. Shah, «Hacia equipos de refrigeración comercial eficientes y responsables con el clima en Chile».
- [17] B. M. Murillo, «Análisis energético del ciclo de compresión de vapor con eyector utilizando refrigerantes naturales».
- [18] N. D. Miranda, P. Giovani Palafox-Alcantar, R. Khosla, y M. D. McCulloch, «Metrics for the emissions of F-gas refrigerants», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 58, p. 103348, ago. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103348.
- [19] E. D. M. Cabrera y C. B. González, «TECNOLOGÍA QUÍMICA Vol. XXV, No. 2, 2005 21 IMPACTO AMBIENTAL DE SUSTANCIAS AGOTADORAS DE OZONO», n.º 2, 2005.
- [20] J. M. Belman Flores y J. L. Rodríguez-Muñoz, «Modelado del evaporador de un sistema difusión-absorción: análisis energético y efecto sobre el diseño de un frigobar», *Nova Sci.*, vol. 7, n.º 14, p. 24, may 2015, doi: 10.21640/ns.v7i14.95.
- [21] C. A. Isaza-Roldan, «Integración de un refrigerador por absorción doméstico a un sistema de energía solar», Universidad Pontificia Bolivariana, 2015. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/266566248>
- [22] B. R. Miguel Ángel, C. S. Alberto, V. R. Joan Manel, H. Ullrich, G. Martin, y W. Thomas, «Estudio del funcionamiento de sistemas de refrigeración por absorción-resorción con amoniaco-agua», en *IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica*, Universidad Politécnica de Cartagena, jun. 2015. doi: 10.31428/10317/9934.
- [23] J. A. B. Orozco y J. C. G. Ramírez, «ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN DE DOBLE EFECTO CON EYECTO-COMPRESIÓN».
- [24] Universidad de Sevilla, «Máquinas de absorción», Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería,. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5070/fichero/CAPITULO+3%252FCAP%C3%8DTULO+3.0+MAQUINAS+DE+ABSORCION.pdf>
- [25] D. A. T. Vera y S. L. Dahl, «Revista Investigaciones Aplicadas | ISSN 2011-0413 | Medellín - Colombia Vol. 6, No.2 (2012) Julio – Diciembre | PP.70-92 <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas>».

- [26] B. Modi, A. Mudgal, y B. Patel, «Energy and Exergy Investigation of Small Capacity Single Effect Lithium Bromide Absorption Refrigeration System», *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 203-210, mar. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.040.
- [27] H. A. Tariq, A. Altamirano, R. Collignon, B. Stutz, y A. Coronas, «Experimental study on the effect of an ionic liquid as anti-crystallization additive in a bi-adiabatic H₂O-LiBr absorption chiller prototype», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 259, p. 124756, ene. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124756.
- [28] V. Novotny, J. Spale, J. Pavlicko, D. J. Szucs, y M. Kolovratnik, «Experimental development of a lithium bromide absorption power cycle», *Renew. Energy*, vol. 207, pp. 321-347, may 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.02.123.
- [29] O. M. Rueda y J. M. Bautista, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN SOLAR», 2010.
- [30] M. Berdasco, M. Vallès, y A. Coronas, «Thermodynamic analysis of an ammonia/water absorption–resorption refrigeration system», *Int. J. Refrig.*, vol. 103, pp. 51-60, jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.03.023.
- [31] A. S. Rattner y S. Garimella, «Low-source-temperature diffusion absorption refrigeration. Part I: Modeling and cycle analysis», *Int. J. Refrig.*, vol. 65, pp. 287-311, may 2016, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.010.
- [32] A. Najjaran, J. Freeman, A. Ramos, y C. N. Markides, «Experimental investigation of an ammonia-water-hydrogen diffusion absorption refrigerator», *Appl. Energy*, vol. 256, p. 113899, dic. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113899.
- [33] A. Abuhabaya, M. Rady, M. Aljahdli, E. Almatrafi, F. Al Batati, y A. Attar, «Experimental characterization of an ammonia – water – hydrogen diffusion absorption refrigeration system», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 52, p. 103802, dic. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103802.
- [34] S. Hanriot, P. Brito, C. Maia, y A. Rêgo, «Analysis of working parameters for an ammonia-water absorption refrigeration system powered by automotive exhaust gas», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 13, p. 100406, mar. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100406.
- [35] S. Hanriot, P. Brito, C. Maia, y A. Rêgo, «Analysis of working parameters for an ammonia-water absorption refrigeration system powered by automotive exhaust gas», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 13, p. 100406, mar. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100406.
- [36] A. Najjaran, J. Freeman, A. Ramos, y C. N. Markides, «Experimental investigation of an ammonia-water-hydrogen diffusion absorption refrigerator», *Appl. Energy*, vol. 256, p. 113899, dic. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113899.
- [37] N. Yousuf, E. Bateau, T. Anderson, M. Gschwendtner, y R. Nates, «Modelling the Performance of a Diffusion Absorption Refrigeration System».
- [38] Dometic, «DOMETIC REFRIGERTION ECOLINE». [En línea]. Disponible en: https://www.dometic.com/externalassets/dometic-rh-440-lgc_73482.pdf
- [39] P. K. Merrell, «Experimentation, modeling and optimization of a waste heat fired ammonia/water absorption refrigeration unit for the transportation industry», The Ohio State University, 2000. [En línea]. Disponible en: https://etd.ohiolink.edu/etd/send_file/send?accession=osu173151629723642&disposition=inline
- [40] I. Mariusz, «Corrosion aspects in indirect systems with secondary refrigerants», Tesis doctoral, Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suecia, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:483528/FULLTEXT01.pdf>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El desarrollo y estudio de sistemas de refrigeración por absorción, especialmente en aplicaciones de pequeña capacidad, presenta una serie de implicaciones relevantes en distintos ámbitos que van más allá del mero rendimiento técnico.

Desde una perspectiva social, este tipo de sistemas representa una solución accesible y segura para entornos donde el acceso a la electricidad es limitado o inexistente, como zonas rurales, áreas en vías de desarrollo o escenarios de emergencia. Su capacidad para operar exclusivamente mediante fuentes térmicas (como el gas o la energía solar) permite garantizar la conservación de alimentos y medicamentos en condiciones básicas, mejorando así la calidad de vida y la seguridad sanitaria de muchas comunidades. Además, al ser sistemas silenciosos y sin partes móviles, su mantenimiento es mínimo, lo que reduce la dependencia de asistencia técnica especializada.

Económicamente, aunque los sistemas de absorción actuales presentan un coste inicial más elevado y una eficiencia inferior respecto a los de compresión, ofrecen ventajas a largo plazo gracias a su bajo consumo eléctrico o incluso su completa independencia de la red. Esto puede traducirse en un ahorro significativo en costes operativos en determinadas aplicaciones, especialmente en entornos donde el acceso a la electricidad es caro, limitado o intermitente. Asimismo, su mayor durabilidad y simplicidad mecánica reducen los costes de mantenimiento y sustitución, lo que refuerza su viabilidad económica en aplicaciones específicas.

Desde el punto de vista ambiental, los sistemas de absorción destacan por utilizar refrigerantes naturales como el amoníaco, que no dañan la capa de ozono y presentan un potencial de calentamiento global (GWP) muy bajo, en contraste con los HFC empleados en sistemas de compresión convencionales. Además, su funcionamiento mediante fuentes de calor (especialmente si son renovables o residuales) contribuye a la reducción del consumo energético global y de las emisiones de gases de efecto invernadero. En un contexto de creciente preocupación por la sostenibilidad, los sistemas de absorción representan una alternativa tecnológica con bajo impacto ambiental y alto potencial de desarrollo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La investigación y el desarrollo de tecnologías como los sistemas de refrigeración por absorción no solo implican una mejora técnica, sino que también conllevan una serie de reflexiones éticas y sociales que deben ser consideradas a la hora de plantear su implementación y difusión.

El impulso de sistemas energéticamente más sostenibles refleja una responsabilidad ética hacia el medio ambiente y las generaciones futuras. Apostar por tecnologías que reduzcan el consumo eléctrico y minimicen el uso de refrigerantes contaminantes representa un paso firme hacia una ingeniería más consciente y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (conjunto de 17 objetivos globales establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 dentro de la Agenda 2030, con el fin de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar el bienestar para todos), en particular los relacionados con la energía asequible y no contaminante (ODS 7), la acción por el clima (ODS 13), y la industria, innovación e infraestructura (ODS 9).

Desde una perspectiva social, los sistemas de absorción pueden suponer una herramienta de equidad, al permitir el acceso a la refrigeración en lugares remotos o con infraestructuras energéticas limitadas. Facilitar su disponibilidad y adaptabilidad, especialmente en regiones en desarrollo, puede mejorar significativamente la calidad de vida, preservando alimentos, medicamentos y reduciendo el desperdicio. En este sentido, promover el acceso universal a tecnologías básicas como la refrigeración se convierte también en una cuestión de justicia social.

Como futuros ingenieros, resulta fundamental adoptar una actitud crítica y responsable frente al impacto de nuestras decisiones técnicas. Investigar alternativas a los sistemas tradicionales no es solo una cuestión de innovación, sino de compromiso ético con un desarrollo que priorice la eficiencia, la seguridad y el respeto por el entorno. Fomentar soluciones más limpias y accesibles, incluso cuando ello implique desafíos técnicos o económicos, es parte de la responsabilidad que conlleva ejercer la ingeniería con vocación de servicio público.