

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**“Diseño y evaluación teórica de ciclos
termodinámicos de revalorización de energía con un
polímero conductor nanoestructurado”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
APSAHARA NOHEMÍ GONZÁLEZ HODGES**

DIRECTOR DE TESIS

DR. ROSENBERG J. ROMERO

Dr. Jesús Cerezo Román

Dr. Gabriela Hernández Luna

Dr. Moisés Montiel González

Dra. María Elena Nicho Díaz

CUERNAVACA, MORELOS

Diciembre, 2022

RESUMEN

En este proyecto se presentan las ecuaciones termodinámicas para el cálculo de las potencias y flujos másicos que requiere un aire acondicionado solar operando a temperaturas mayores a 75 °C, con temperaturas ambientales cercanas a 40 °C y con el objetivo de intercambiar calor con el entorno a temperaturas de 20 °C; así también se presentan las consideraciones para un modelo matemático basado en condiciones de equilibrio y cálculo de las entalpías para una solución de bromuro de litio acuoso. La membrana que se ha utilizado para el cálculo del flujo del fluido refrigerante es una membrana polimérica comercial que se ha evaluado en trabajos previos. Las conclusiones indican que es posible operar este sistema con solo el 2 % de energía eléctrica y el resto de la operación (98 %) corresponde a energía térmica.

Así mismo se analizaron las variaciones de potencia que presenta el condensador y los coeficientes de operación en un sistema de aire acondicionado, al incrementar la temperatura suministrada al proceso por colectores solares. El sistema consiste en una novedosa membrana polimérica capaz de realizar la separación del agua de una mezcla acuosa de bromuro de litio que funciona como fluido de trabajo en un ciclo termodinámico. El objetivo es utilizar calor con temperaturas inferiores a 80 °C y que pueda realizar un intercambio de calor en un intervalo de temperatura entre 15 o 20 °C cuando los alrededores se encuentran a 30 °C.

Para finalizar con un estudio comparativo del uso de una membrana comercial contra una membrana modificada, con una alta conductividad térmica relativa, en un proceso de una bomba de calor. Derivado de esta comparación se analizaron las diferencias de la temperatura local junto con la densidad del vapor de agua, observando que para ambos casos se presenta un incremento de la temperatura y la densidad de vapor, al incrementar la conductividad térmica de la membrana utilizada para la separación del fluido refrigerante.

ABSTRACT

This project shows the thermodynamic equations for calculating the powers and flows required by a solar air conditioning operating at temperatures greater than 348.15 K (75°C), with ambient temperatures closet to 313.15 K (40°C) where the aim of exchanging heat with air close to 293.15 k (20°C) in a solar air conditioning system. This project also presents the considerations for a mathematical model based on equilibrium conditions and enthalpy calculation for an aqueous lithium bromide solution. The membrane used for the flow calculation is a commercial polymer membrane and it has been evaluated in previous studies. The conclusions indicate that it is possible to operate this system with only 2% electrical energy and the rest of the operation (98%) corresponds to thermal energy.

Furthermore, the variations presented by the capacitor powers and the operating coefficients in an air conditioning system were analyzed, by increasing the temperature supplied to the process by solar collectors. The system consists of a novel polymer membrane that can perform the separation of water from an aqueous lithium bromide mixture that works as a working fluid in a thermodynamic cycle to use heat at temperatures below 353.15 K (80 °C) and that can perform a heat exchange between 288.15 and 293.15 K (15 and 20 °C) when the surroundings are at 303.15 K (30 °C).

To conclude, a comparative study of the use of a commercial membrane against a modified membrane, was performed with a high relative thermal conductivity, in a heat pump process. Analyzing differences in local temperature and water vapor density, noting that for both cases there is an increase in temperature and vapor density by increasing the thermal conductivity of the membrane used for the separation of the cooling fluid.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, principalmente al Centro en Ingenierías y Ciencias Aplicadas por brindarme todas las herramientas para la realización de este proyecto.

Al Conacyt por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado.

Al Dr. Rosenberg por la confianza y apoyo brindado durante estos años. Por compartir conmigo su conocimiento, apoyándome e impulsándome a seguir día a día.

A la Dra. María Elena Nicho y la Dra. Elsa Carmina por su apoyo, consejos y observaciones que fueron claves para la culminación de este proyecto.

A la Dra. Gabriela por su disposición para ayudar y hacer de este un mejor trabajo, al Dr. Jesús Cerezo por sus comentarios, lecciones y apoyo, al Dr. Moisés Montiel por sus comentarios tan asertivos y significativos.

A mi familia por acompañarme día a día en esta experiencia, a mi hermano Carlos por ayudarme a levantarme y seguir adelante en cada momento, a mi madre Lucero por sus palabras de amor que me hacían recordar cada día de lo que soy capaz, a mi padre que siempre sabe como sacarme una sonrisa para hacer el día más ligero. A mi Ita porque a pesar de la distancia siempre estuvo al pendiente y me impulsaba a seguir hasta alcanzar el objetivo de la mano de Dios y de mi familia.

DEDICATORIAS

A mi abuela Josefina †,

por enseñarme la importancia de reconocer lo que quiero y lo que no,

y esforzarme por ello.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIAS	v
ÍNDICE	vi
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. Sistemas de acondicionamiento de aire	1
1.2. Sistemas de refrigeración y aire acondicionado convencionales	2
1.3. Sistemas de refrigeración por absorción	4
1.4. Separación por membrana	5
1.5. Destilación por membrana con espaciado de aire	6
1.6. Polímeros usados en la destilación por membrana	7
1.7. Membranas	9
1.8. Nanocompuestos poliméricos	10
1.9. Dispersión de nanopartículas en matrices poliméricas	11
1.10. Conductividad térmica de los polímeros con y sin dopaje	13
Capítulo 2	16
Planteamiento del problema	16
2.1. Justificación	16

2.2. Hipótesis	17
2.3. Objetivos	17
Capítulo 3	18
Desarrollo teórico	18
Capítulo 4	31
Resultados y discusión	31
Capítulo 5	41
Conclusiones y recomendaciones	41
5.1. Conclusiones	41
5.2. Recomendaciones	42
Bibliografía	43

Lista de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los polímeros utilizados de forma comercial en procesos de destilación por membrana.	8
Tabla 2. Conductividad térmica y estructura molecular de los polímeros comerciales utilizados en sistemas de destilación por membrana.	13
Tabla 3. Conductividad térmica de diferentes dopantes comparada con la conductividad térmica reportada para el polietileno con la adición de partículas.	14
Tabla 4. Resultados obtenidos de la temperatura y densidad promedio al evaluar en un rango de temperatura de 74 a 79 °C.	39

Lista de figuras

Figura 1. Representación esquemática de un sistema de refrigeración por compresión.....	3
Figura 2. Representación esquemática de un sistema de refrigeración por absorción.	4
Figura 3. Diagrama esquemático de un sistema de separación por membrana.	6
Figura 4. Diagrama esquemático de un sistema de refrigeración.	19
Figura 5 Diagrama de flujo para el cálculo de una bomba de calor por absorción.	22
Figura 6. Elementos del equipo generador – condensador que contiene la membrana.	30
Figura 7. Diagrama de flujo de las condiciones óptimas de operación, para el caso de este proyecto.....	31
Figura 8. Dependencia de la potencia solar en función de la temperatura de desorción.	32
Figura 9. Relación del flujo del fluido de trabajo en función de la temperatura de enfriamiento.	33
Figura 10. Relación de la potencia en función de la temperatura de desorción.....	34
Figura 11. Relación del coeficiente de operación en función de la temperatura de desorción.	35
Figura 12. Representación esquemática de la variación de la temperatura en (a) membrana comercial; (b) membrana modificada.....	36
Figura 13. Representación esquemática sobre la variación de la densidad de vapor de agua en la membrana (a) comercial; (b) modificada.....	38
Figura 14. Perfiles térmicos en el volumen de la membrana modificada.	40

Capítulo 1

Introducción

Como ha sucedido con el desarrollo de la ciencia y la tecnología a lo largo de la historia, constantemente se busca la manera de mejorar los materiales o sistemas existentes, con la intención de incrementar su eficiencia, economizar costos, el sistema de fabricación, etc. En el caso de este proyecto, se busca estudiar desde un punto de vista teórico el uso de una membrana hidrofóbica porosa con una relativa alta conductividad térmica, para que sea utilizada en procesos termodinámicos de revalorización de energía, como sistemas de refrigeración solar ^[1-3].

1.1. Sistemas de acondicionamiento de aire

Los sistemas de refrigeración y aire acondicionado son ampliamente utilizados y a pesar de que son dispositivos funcionales, éstos todavía presentan grandes desventajas como son el uso de la electricidad, emisión indirectos de gases invernadero, costo, tamaño, cantidad de componentes, ruido, etc., es por este motivo que las investigaciones sobre cómo conseguir un dispositivo funcional y por supuesto más amigable con el medio ambiente no han cesado ^[4]. Entre las soluciones encontradas en la literatura están los sistemas de enfriamiento por absorción solar, pues es viable pensar en ellos ya que cuando la radiación solar es mayor la carga de enfriamiento aumenta ^[5].

El problema que presentan este tipo de sistemas es durante el proceso de la desorción por ebullición, debido a que la energía solar térmica que puede ser agregada al sistema está restringida por la temperatura del desorbedor (componente encargado de separar el fluido refrigerante), en éste la separación del fluido refrigerante requiere una carga de calor constante en el desorbedor e incluso presión de vacío (en el caso de H₂O – LiBr) para separar

el fluido refrigerante a bajas temperaturas, es por ésto que la alternativa propuesta para evitar este problema es la separación por membrana [4,6,7].

Se han realizado diversos avances en los últimos años para mejorar la transferencia de calor y masa en los componentes principales de un sistema de refrigeración y aire acondicionado por absorción. Dentro de los estudios presentados se destacaron los intercambiadores de calor basados en una membrana hidrofóbica porosa, la cual actúa como una barrera que solo permite el paso del vapor de agua; con base en los estudios previos se ha presentado un modelo teórico para la transferencia de calor y masa donde se ha hecho una simulación para observar las características de los intercambiadores basados en membranas. El modelo compara el flujo de masa de absorción de diversas configuraciones de intercambiador (de materia y energía) basado en membranas, con los datos de absorción existentes de los absorbedores de película descendente convencionales, resultando que el flujo de absorción se mejora considerablemente mediante el uso de membranas [8].

1.2. Sistemas de refrigeración y aire acondicionado convencionales

Los sistemas de refrigeración por compresión son los más utilizados para su uso en el aire acondicionado. Para llevar a cabo este ciclo, se utiliza energía mecánica, para comprimir un gas refrigerante por medio de un compresor, el cual funciona generalmente por medio de energía eléctrica. Las partes principales de este sistema son el compresor, el condensador, el evaporador y la válvula de expansión como puede observarse en la **Figura 1**.

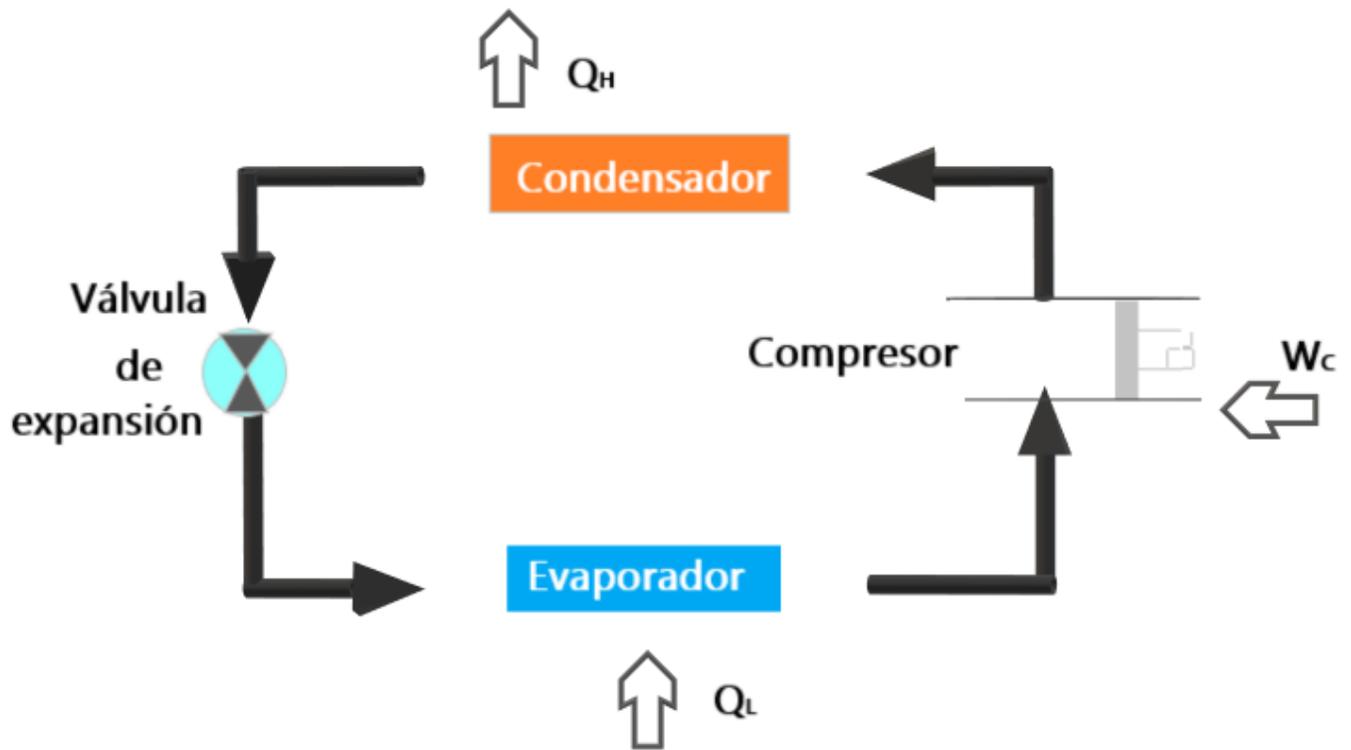


Figura 1. Representación esquemática de un sistema de refrigeración por compresión.

En la **Figura 1**, se representa el ciclo de un sistema de refrigeración por compresión, en este proceso el refrigerante ingresa al compresor en forma de vapor saturado para comprimirse a una presión más alta, en consecuencia una temperatura más alta, siendo ahora vapor sobrecalentado que circulará hacia el condensador, en esta zona el refrigerante es enfriado hasta condensarse por completo provocando el intercambio de calor hacia el medio de refrigeración (sea aire o agua), en este punto el refrigerante es un líquido saturado listo para pasar a la válvula de expansión, aquí se somete a una abrupta reducción de presión resultando en una evaporación instantánea de una parte del fluido reduciendo a su vez la temperatura. Para finalizar el proceso con ayuda de aire caliente se evapora la parte líquida de la mezcla

refrigerante fría, enfriando el aire circulante y bajando la temperatura obteniendo nuevamente vapor saturado para comenzar el ciclo nuevamente.

1.3. Sistemas de refrigeración por absorción

Un método potencial sustituto para los equipos convencionales, son los sistemas de refrigeración por absorción, en donde el refrigerante no es comprimido mecánicamente, el proceso ocurre por una diferencia de presión causada por el efecto de desorción y absorción de un vapor, sustituyendo así el compresor. El vapor es el refrigerante absorbido por un líquido sorbente y transferido a un nivel de presión superior por medio de una bomba. Este proceso esta ilustrado en la **Figura 2**.

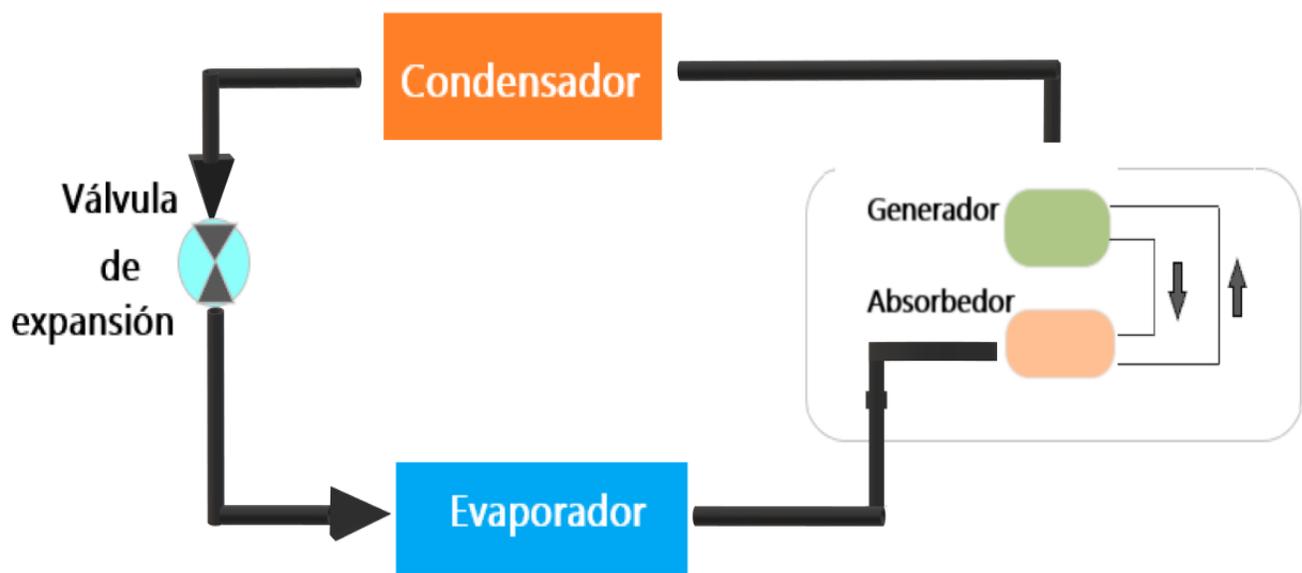


Figura 2. Representación esquemática de un sistema de refrigeración por absorción.

En este método la operación del proceso de refrigeración resulta más económica y ecológica, al sustituir el uso de un compresor alimentado por energía eléctrica, pero presenta la desventaja de que su rendimiento es bastante menor, así como un costo mayor de inversión inicial en su construcción. Por lo que su costo inicial puede ser compensado con una fuente de energía residual o un subproducto. El refrigerante utilizado en estos sistemas, es así mismo más amable con el ambiente, utilizando generalmente bromuro de litio – agua.

1.4. Separación por membrana

La destilación por membrana MD (por sus siglas en inglés, membrane distillation) es una tecnología emergente, basada en que existe un gradiente de presión de los vapores que circulan a través de una membrana hidrófoba porosa; este concepto puede ser usado para los futuros equipos de aire acondicionado amigables con el ambiente ^[6].

En este tipo de sistemas, una membrana hidrofóbica será la encargada de realizar las operaciones de generación (desorción de agua) de una mezcla de fluido de trabajo, como el bromuro de litio acuoso. Así mismo también disminuye la temperatura del agua separada en la fase líquida (condensado) representado en la **Figura 3**.

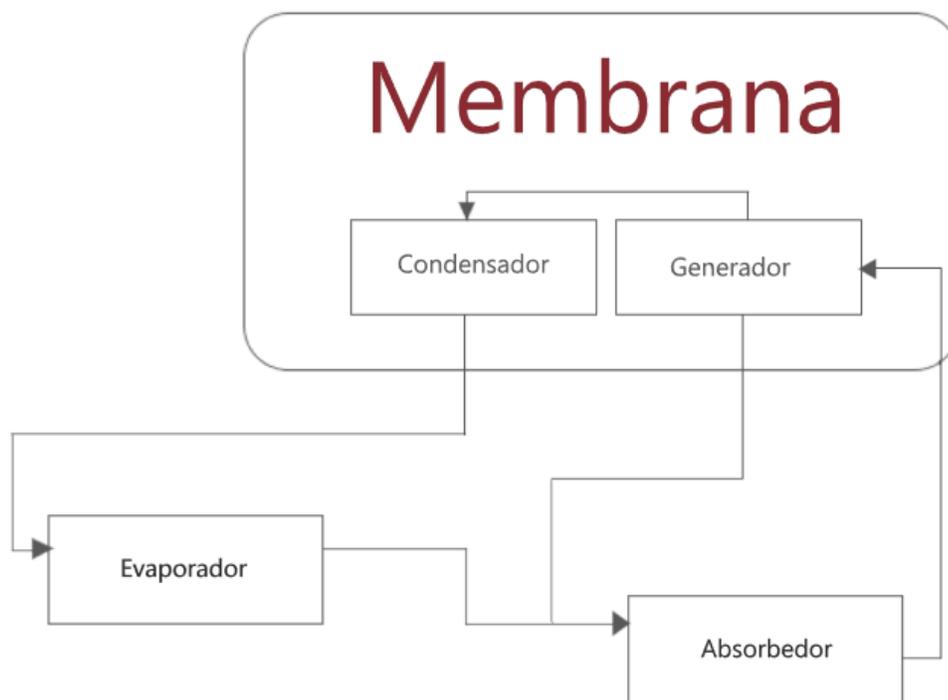


Figura 3. Diagrama esquemático de un sistema de separación por membrana.

1.5. Destilación por membrana con espaciado de aire

Un sistema de destilación por membrana con espaciado de aire, es decir, una configuración AGMD (por sus siglas en inglés, Air Gap Membrane Destilation) consta de un espacio donde fluye la solución acuosa caliente, una membrana hidrofóbica porosa, un espacio de aire entre la membrana y la zona de condensación o lado frío. En este sistema la separación de la mezcla de trabajo es debida a la diferencia de temperatura entre las dos caras de la membrana, provocando una diferencia parcial de presiones. Es así como el componente más volátil será evaporado en la interfaz líquido-membrana, atravesando la membrana porosa para posteriormente condensar en el lado frío. Este proceso tiene dos ventajas principales, menores pérdidas de calor y

menor polarización de la temperatura, así mismo presenta una desventaja en la disminución de la tasa de desorción, debido a la resistencia adicional a la transferencia de masa por el espaciado de aire.

La viabilidad de un desorbedor de membrana para un sistema de acondicionamiento de aire por absorción y alimentado por energía solar, en una configuración AGMD, fue estudiado a diferentes condiciones térmicas de funcionamiento con LiBr/H₂O. En las pruebas experimentales encontraron que la mayor tasa de desorción fue de 5.69 kg /m²/h para una solución de LiBr a 95.2 °C y agua de refrigeración a 14.6 °C, con base en los datos experimentales, se simuló un sistema de colector solar a mayor escala con un área de membrana de 1 m² utilizando los datos meteorológicos del municipio de Emiliano Zapata en Morelos, México. De acuerdo a los resultados numéricos, nueve colectores solares con un área total de 37.4 m² proporcionan una fracción solar de 0.79. Por lo tanto, el desorbedor/condensador de membrana acoplado a un sistema solar puede proporcionar un promedio de 16.8 kg/día de fluido refrigerante posible de utilizar para producir un efecto de enfriamiento en un sistema refrigerante de absorción, mostrando la viabilidad de este componente en sistemas de refrigeración [4].

1.6. Polímeros usados en la destilación por membrana

La destilación por membrana ha tenido complicaciones por la falta de membranas de alto rendimiento y consumo de energía. Las membranas comerciales utilizan principalmente cuatro polímeros para desarrollarlas, el politetrafluoroetileno (PTFE), polipropileno (PP), fluoruro de polivinilideno (PVDF) y polietileno (PE). Para su uso se debe considerar principalmente el costo y facilidad de manufactura, así como su estabilidad térmica [9,10].

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los polímeros utilizados de forma comercial en procesos de destilación por membrana.

Material	Ventajas	Desventajas
PTFE	Estabilidad térmica y resistencia química	Manufactura difícil
PP	Bajo costo de fabricación	Estabilidad térmica moderada en temperaturas altas
PVDF	Fácil manufactura	Estabilidad térmica moderada Fácil disolución en solventes comunes
PE	Fácil de conseguir y fabricar	Pobre estabilidad térmica

Los polímeros son materiales caracterizados por ser moléculas muy grandes, con altos pesos moleculares, constituidos por la repetición de unidades más pequeñas, llamadas monómeros, unidas por enlaces covalentes. Los polímeros han acompañado a la humanidad desde el principio de los tiempos, es así como los polímeros naturales han servido de inspiración para la creación de los conocidos polímeros sintéticos que han ayudado a diferentes

procesos en la industria. Al ser compuestos tan versátiles, han tenido un sinnúmero de aplicaciones entre las que destacan el uso de polímeros en membranas para poder realizar la separación de diferentes componentes.

1.7. Membranas

Las membranas son materiales con un espesor pequeño, flexibles y resistentes que son utilizadas para realizar la separación de componentes en dos fases diferentes, esta separación puede ser por tamaños o por afinidades químicas y físicas. Las propiedades de la membrana serán claves para una separación óptima de las fases, ya que su permeabilidad, tamaño de poros, espesor o cargas eléctricas sobre la superficie serán las encargadas de la división de los componentes ^[11]. Por este motivo es que el estudio de la modificación de la estructura de las membranas para mejorar sus propiedades ha sido una parte importante del desarrollo científico y tecnológico. Existen diferentes clasificaciones para las membranas,

- Desde su origen: Naturales y sintéticas
- Por su espesor: Gruesas y delgadas
- Por su estructura: Porosas y compactas

Las membranas sintéticas son generalmente creadas a base de polímeros, éstas pueden ser tan diversas como su diseño lo permita. Los materiales de elaboración presentan una gran cantidad de propiedades que los hace tan interesantes para la fabricación de productos, como su flexibilidad, resistencia, maleabilidad y facilidad de fabricación. Aunado a esto se han incorporado

propiedades extrínsecas a los materiales para poder tener una mayor cantidad de aplicaciones de los polímeros modificados o en materiales compuestos [12].

Desde el descubrimiento de los polímeros éstos han sido considerados materiales aislantes térmicos y eléctricos, hasta que en 1977 se descubrieron lo que se conocen hoy en día como polímeros conductores intrínsecos, los cuales son materiales poliméricos que poseen propiedades de conducción de forma inherente debido a su estructura de dobles enlaces conjugados, permitiendo un movimiento parcial de fonones y electrones por la red polimérica constituyendo una mejor conducción en comparación de los polímeros aislantes [11].

En la búsqueda de aumentar las propiedades de conducción térmica en los polímeros se han llevado a cabo diversas investigaciones en donde se adiciona algún material, conocido como dopante, para favorecer la mejora de la propiedad buscada. En los últimos años se ha popularizado la adición de nanopartículas en la matriz polimérica aumentando la conductividad térmica de diferentes polímeros en varios ordenes de magnitud [13-16].

1.8. Nanocompuestos poliméricos

La nanotecnología es una rama de la ciencia que estudia los compuestos en la escala nanométrica (1×10^{-9} m), en la actualidad es una herramienta útil para la mejora de las propiedades de los materiales. Permitiendo la creación de nanomateriales, o materiales compuestos en los que se adicionan nanomateriales a materiales bulto cuyo objetivo es mejorar alguna propiedad en específico, como pueden ser las propiedades eléctricas, térmicas, mecánicas [17,18].

Existen varios ejemplos en la literatura en donde se han mejorado las propiedades de conducción térmica de los polímeros con la ayuda de la

nanotecnología. Esta mejora de propiedades se puede dar con la adición de nanopartículas de carbono, cerámicas o metálicas en la estructura de la red polimérica. Otra posibilidad es el nano moldaje cuyo objetivo es cambiar el orden de las fibras para mejorar sus propiedades de conductividad térmica [14,19].

En el caso de la adición de nanopartículas a la red polimérica se han reportado diversos factores con los cuales se debe tener cuidado durante la síntesis. El porcentaje en peso de las nanopartículas, el cual mejora a mayores concentraciones llegando a un punto máximo en la gran mayoría de los casos. Por este motivo estudiar el porcentaje de concentración óptimo puede ser determinante para un correcto diseño experimental [20].

La revisión bibliográfica expone diferentes factores que pueden contribuir en la mejora de la conductividad térmica de los polímeros para su uso en intercambiadores de calor [4,21]. Se ha demostrado que se pueden adicionar rellenos de cerámicas, carbono o metales a la base polimérica donde los últimos dos han logrado un aumento en la conductividad térmica de hasta un orden de magnitud mayor al de los polímeros puros. En este tipo de compositos existen varios factores que tendrán que ser analizados durante la síntesis: tratamiento de la superficie del relleno, fracción de volumen del relleno, relación de aspecto del relleno, orientación del relleno, estructura química del polímero, temperatura, viscosidad así como dispersión y distribución de la carga en el polímero [1,21].

1.9. Dispersión de nanopartículas en matrices poliméricas

La dispersión de las nanopartículas en la red polimérica es importante ya que se ha observado que, si se presentan cúmulos de nanopartículas agregados,

disminuirá la conductividad térmica mejorada con la adición de nanopartículas. Por lo que será necesario buscar un método de síntesis que permita una dispersión uniforme de las nanopartículas en la red [14,22].

Como se mencionó anteriormente, en la búsqueda de mejorar las propiedades de los polímeros, se han llevado a cabo diversas investigaciones para que los polímeros que generalmente son considerados aislantes por su baja conductividad, puedan tener una mejora en la conducción. En los últimos años se ha popularizado la adición de nanopartículas en la matriz polimérica resultado de la adición de algún dopante que mejore sus propiedades [13,23]. Para la dispersión de nanopartículas en las matrices poliméricas se pueden usar nanoaditivos de diferente naturaleza, éstos pueden ser clasificados de acuerdo al tamaño, dimensión cero (0D), unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), así como nanoaditivos híbridos. La naturaleza de los dopantes puede ser diversa, de acuerdo al interés que tengamos. Los nanoaditivos más populares para la mejora de las propiedades térmicas se han clasificado de acuerdo a su fuente [14,19]:

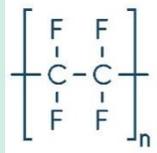
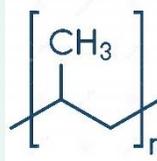
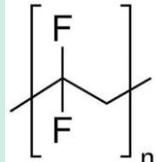
-Nanoestructuras de carbono: Se ha estudiado la incorporación de diferentes estructuras carbonosas (grafeno, nanotubos, nanofibras, etc.) para la mejora de las propiedades térmicas de los materiales, en donde se ha podido observar el incremento de hasta un orden de magnitud de la conductividad térmica [23-25].

-Nanopartículas metálicas: Los elementos metálicos tienen grandes propiedades de conducción térmica y eléctrica, las cuales se han intentado incorporar a los polímeros para la creación de materiales compuestos. Adicionando nanopartículas de diferentes metales como cobre, plata, oro, aluminio, óxidos de cromo se ha logrado aumentar las propiedades de conducción de los materiales, obteniendo composites de interés para desarrollos científicos y tecnológicos [26,27].

1.10. Conductividad térmica de los polímeros con y sin dopaje

Como se ha mencionado con anterioridad, los polímeros generalmente presentan una baja conductividad térmica como es el caso de los 4 polímeros utilizados de forma comercial para los procesos de destilación por membrana. En la **Tabla 2** podemos ver la conductividad reportada para estos polímeros y su estructura química. Para el caso del polietileno, se considera el polietileno de alta densidad.

Tabla 2. Conductividad térmica y estructura molecular de los polímeros comerciales utilizados en sistemas de destilación por membrana.

Polímero	Conductividad térmica W / (K*m)	Estructura
PTFE politetrafluoroetilino	0.25	
PP polipropileno	0.22	
PVDF floruro de polivinilideno	0.19	

PE polietileno	0.43	
-------------------	------	---

En la literatura se reportan diversas técnicas y dopantes para mejorar las características de conductividad de estos polímeros, en la **Tabla 3** se pueden observar algunos ejemplos de estas modificaciones para el caso del polietileno, se puede observar un aumento de más del 100% en la conductividad térmica del composito comparado con el polímero usado como matriz.

Tabla 3. Conductividad térmica de diferentes dopantes comparada con la conductividad térmica reportada para el polietileno con la adición de partículas.

Material	Conductividad térmica dopante (W/m*K)	Conductividad del composito de nanopartículas en polietileno (W/m*K)
CuO	483	0.1209 (0.1% en peso) CuO

MWCNTs	2000 - 3000	0.76 (10% en peso; d=12nm) 0.63 (10% en peso; d=58 nm)
Grafito	209	~ 1.59 (7% en peso) ~ 2.8 (50% en peso)
Grafeno	4840 - 5300	1.49 (5% en peso)

Capítulo 2

Planteamiento del problema

2.1. Justificación

Existen diversos procesos termodinámicos de revalorización de energía donde aún es necesario investigar sobre procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente. En el caso de los sistemas de aire acondicionado solar, la destilación por membrana utilizando una mezcla de trabajo acuosa de LiBr, donde el LiBr acuoso es un absorbente y el agua se usa como refrigerante, ésta es una solución amigable con el ambiente. Sin embargo, aún resulta necesario continuar con las investigaciones pertinentes para incrementar la eficiencia de estos dispositivos, donde el mayor problema es la necesidad de equipos auxiliares de transferencia de calor en el proceso de desorción y condensación del fluido, si se lleva a cabo este proceso de destilación por membrana con espaciado de aire la transferencia de calor y masa se dará a través de una membrana porosa e hidrófoba, eliminando el uso de equipos eléctricos auxiliares.

Para mejorar la eficiencia de estos procesos en la literatura se reporta estudios sobre la influencia de la porosidad de las membranas, en los que destaca que si la membrana presenta poros menores a 1 micra son adecuadas en el uso de desorbedores, pues cuando las gotas caen en una superficie nanoestructura hidrofóbica, hay un exceso de energía, incidiendo en el incremento del rendimiento en la transferencia de calor. El generar un prototipo de membrana que tenga mayor conductividad térmica, podría ser implementado en ciclos termodinámicos por absorción para aire

acondicionado solar, en la que se tiene la condición de a mayor incidencia solar sea mayor la producción de fluido refrigerante a través de la membrana superhidrofóbica con alta conductividad térmica SH-HTC.

2.2. Hipótesis

A partir del diseño teórico de una membrana hidrofóbica con nanopartículas metálicas se puede incrementar la desorción / condensación en un ciclo de absorción para aplicaciones de acondicionamiento de espacios por efecto del incremento de su conductividad térmica.

2.3. Objetivos

General

Desarrollar un análisis teórico para un ciclo termodinámico de revalorización de energía, donde se realizará el cambio de una membrana comercial por una membrana con una conductividad térmica mayor relativa.

Particulares

- Calcular el ciclo termodinámico completo de generación, condensación, evaporación y absorción del bromuro de litio acuoso.
- Realizar una comparación teórica de la temperatura y densidad del vapor de agua de una membrana comercial vs una membrana modificada.

Capítulo 3

Desarrollo teórico

Para calcular las condiciones de operación de un ciclo de absorción que opera utilizando como fluido de trabajo $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ se consideraron los siguientes supuestos:

- o Equilibrio termodinámico
- o Estado estacionario
- o Saturación en las salidas de los componentes
- o Sin pérdidas o ganancias de calor en la tubería y en todos los componentes del sistema.
- o Proceso isobárico
- o Bombas isentrópicas
- o Válvula isoentálpica
- o Trabajo de bombeo del 2%
- o Sin evaporación del absorbente.

Con estas condiciones es posible disponer de un sistema controlado y realizar los cálculos pertinentes para el sistema. En la **Figura 4** se muestran las conexiones del sistema numeradas, para ser identificadas en los cálculos siguientes.

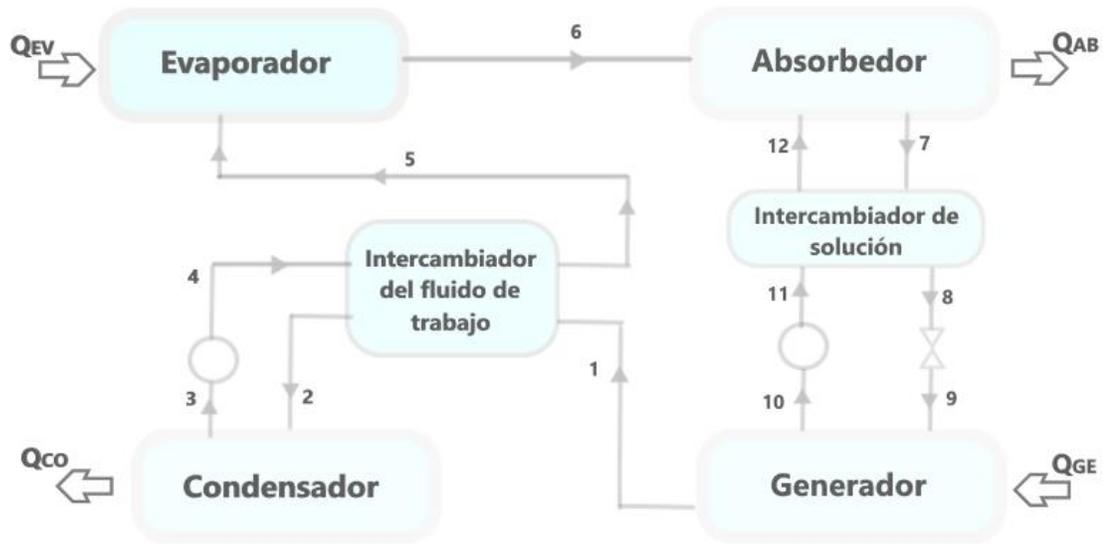


Figura 4. Diagrama esquemático de un sistema de refrigeración.

El cálculo del proceso inicia definiendo las temperaturas del sistema, considerando que las temperaturas de evaporación, para un sistema de aire acondicionado son inferiores a la temperatura del ambiente. La temperatura del condensador (temperatura de salida del líquido condensado, 40°C) y del absorbedor (temperatura del líquido con concentración diluida, 40 °C) deben ser superiores pero cercanas a la temperatura del ambiente para un sistema de aire acondicionado. La temperatura del generador (temperatura del líquido de alta concentración, 75 °C) debe ser ligeramente inferior a la temperatura de la fuente de calor disponible para que pueda existir el intercambio de calor, las temperaturas que se mencionan son las que se consideran para los cálculos en este proyecto, con una temperatura del ambiente de 25°C.

Posteriormente es necesario calcular las entalpías del agua, a partir de las tablas de las propiedades de vapor de agua saturado o usando las siguientes ecuaciones:

Para el cálculo de la entalpía del vapor saturado

$$h_V = 1.7908 T_v + 2502.4 \quad 1$$

Para el cálculo de la entalpía del líquido saturado

$$h_L = 4.177 T_{li} + 0.4717 \quad 2$$

En el ciclo definiremos tres flujos de la mezcla de bromuro de litio, el fluido refrigerante que circula entre el condensador y el evaporador (m_{WF}), el flujo concentrado en el generador (m_{Ge}) y el flujo diluido en el absorbedor (m_{Ab}). Ésto será útil para calcular la relación de flujo (FR), que esta definida como:

$$FR = m_{Ab} / m_{Ev} = m_{Ab} / m_{WF} \quad 3$$

Para calcular las potencias dentro del ciclo se utilizaron las siguientes relaciones

1) Potencia de evaporación

$$Q_{Ev} = |m_{WF} h_{v,Ev} - m_{WF} h_{L,Co}| \quad 4$$

2) Potencia de Condensación

$$Q_{Co} = |m_{WF} h_{L,Co} - m_{WF} h_{v,Ge}| \quad 5$$

3) Potencia de absorción de vapor

$$Q_{Ab} = |m_{WF} h_{v,Ev} + m_S h_{S,Ge} - m_D h_{D,Ab}| \quad 6$$

4) Potencia del desorbedor (por membrana).

$$Q_{Ge} = |m_D h_{D,Ab} - m_{WF} h_{v,Ge} - m_S h_{S,Ge}| \quad 7$$

Donde Q corresponde a las cargas térmicas, h corresponde a la entalpía calculada para cada flujo indicado, m corresponde al flujo másico, y los

subíndices wf corresponde al fluido de trabajo, V corresponde a vapor, L corresponde a líquido, Ev corresponde al componente evaporador, Co corresponde al componente Condensador, Ge corresponde al componente Desorbedor, Ab corresponde al componente Absorbedor, S corresponde a la solución concentrada de bromuro de litio y finalmente D corresponde a la solución acuosa de bromuro de litio diluida.

Estos cálculos se llevaron a cabo para un sistema de aire acondicionado que proporciona una cantidad útil de intercambio con los alrededores a 1 kW térmico (sistema de ventana agua - aire). Adicionalmente se han calculado las potencias térmicas con el software reportado en [6] basado en programación dirigida a objetos y para la mezcla de bromuro de litio - agua reportada por McNelly [4]. Este procedimiento puede ser observado en la **Figura 5**.

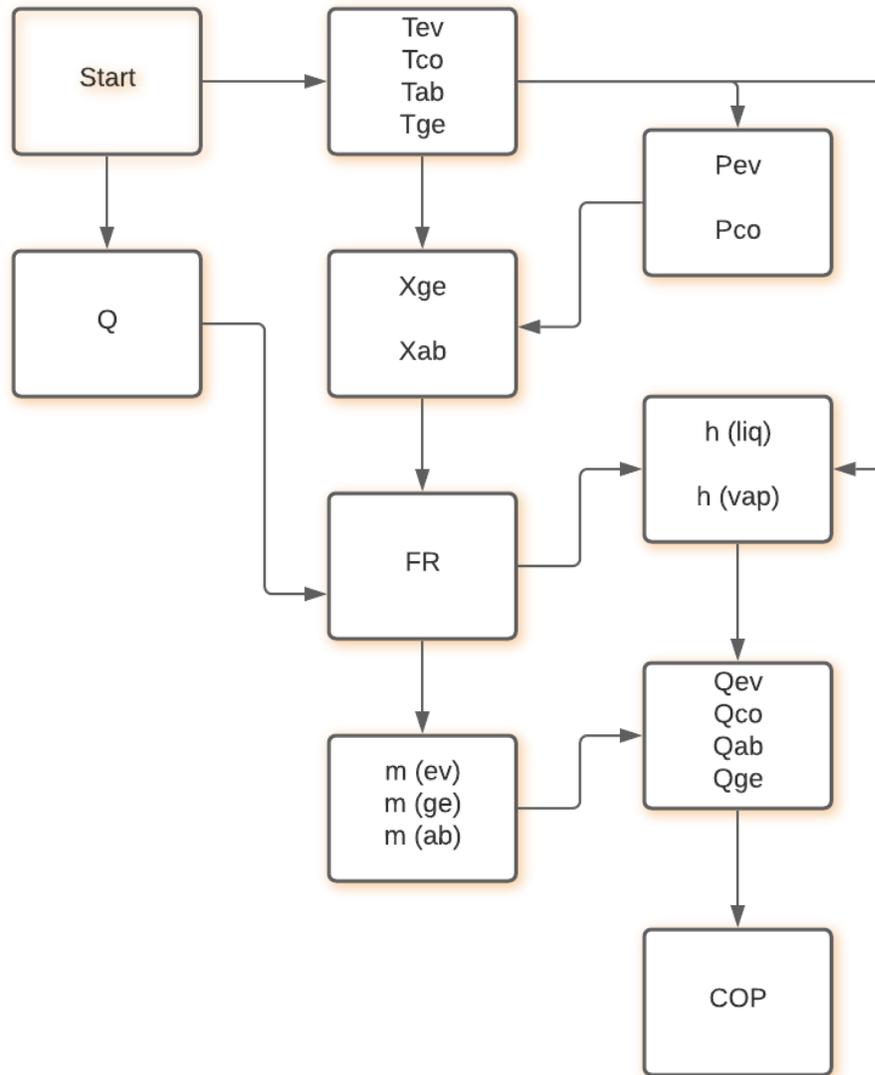


Figura 5 Diagrama de flujo para el cálculo de una bomba de calor por absorción.

El cálculo del ciclo se ha realizado a partir de 4 temperaturas, que corresponden a la temperatura representativa de la operación unitaria y se ha utilizado como base de cálculo el requerimiento de aire acondicionado de 1 kW. Con las temperaturas se ha calculado por equilibrio termodinámico la

presión, una vez definida la presión, se determinan las concentraciones de equilibrio.

Se realizó una simulación asistida por computadora para calcular los flujos térmicos de los componentes y con ellos calcular el coeficiente de operación, definido en este caso como la relación entre el flujo de calor del evaporador y el flujo de calor del generador. Ese coeficiente de operación no puede ser mayor a la unidad. La definición de este coeficiente relaciona cuanta energía es utilizada a 15 °C, (que es el efecto refrigerante o de aire acondicionado) entre la energía suministrada entre 70 y 79 °C (que es la energía que podría provenir de una fuente solar).

Se analizó la variación cada 0.5 °C desde 70 hasta 79 °C para estudiar la dependencia del coeficiente de operación que podría motivar un cambio de conductividad de una membrana polimérica dopada con grafito con la posibilidad de incidir en cambios de la temperatura de operación en el generador hasta 5 °C. La simulación considera que el condensador y el absorbedor operan a una temperatura idéntica de equilibrio termodinámico igual a 30 °C. Al ser una simulación no se ha considerado una expansión de errores experimentales.

La efectividad del intercambiador del fluido de trabajo se define como:

$$EF_{WFE} = \frac{H_5 - H_4}{H_1 - H_4} \quad 8$$

$$EF_{SE} = \frac{H_{11} - H_{12}}{H_{11} - H_{12,7}} \quad 9$$

donde las H_n son las entalpías de los fluidos en los puntos n y $H_{12,7}$ la entalpía de la solución evaluada con la concentración de la solución concentrada (X_{12}) y la temperatura de la solución diluida (T_7).

El análisis de las propiedades del sistema, que se llevó a cabo bajo los mismos supuestos, se realizó por la resolución del siguiente algoritmo:

a) Como datos de entrada se tienen las temperaturas T_1 , T_3 , T_6 y T_7 , el calor disipado en el absorbedor Q_{AB} y las efectividades de los intercambiadores EF_{WFE} y EF_{SE} .

b) Por el equilibrio termodinámico establecido, se tiene que

$$T_{10} = T_1 \quad 10$$

c) Al considerar saturación en el condensador y evaporador

$$P_3 = P(T_3) \quad 11$$

$$P_6 = P(T_6) \quad 12$$

d) Debido a que se considera que no hay pérdidas de presión en el sistema

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_9 = P_{10} \quad 13$$

$$P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_{11} = P_{12} \quad 14$$

e) Al existir saturación en la salida de los componentes, se utilizan las ecuaciones 10 y 13

$$X_{10} = X(P_{10}, T_{10}) \quad 15$$

f) Así mismo, se puede calcular la concentración en la solución diluida

$$X_7 = X(P_7, T_7) \quad 16$$

g) Al no existir intercambio de masa entre las líneas que unen al generador y al absorbedor

$$X_7 = X_8 = X_9 \quad 17$$

$$X_{10} = X_{11} = X_{12} \quad 18$$

- h) Debido a que no hay evaporación del absorbente, se establece que la concentración del bromuro de litio en el punto 1 es cero

$$X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = X_6 = 0 \quad 19$$

- i) Por la saturación del sistema

$$H_7 = H(T_7, X_7) \quad 20$$

$$H_{10} = H(T_{10}, X_{10}) \quad 21$$

- j) De la consideración de saturación

$$H_3 = H(T_3) \quad 22$$

$$H_6 = H(T_6) \quad 23$$

- k) Ya que el vapor a la salida del generador esta en condiciones de sobrecalentamiento

$$H_1 = H(P_1, T_1) \quad 24$$

- l) Al estar en saturación, el volumen específico del agua a la salida del condensador

$$V_3 = V(T_3) \quad 25$$

- m) Como el trabajo efectuado por las bombas es isentrópico, el cambio de entalpía a través de la bomba del fluido de trabajo es

$$\Delta H_{P1} = V_3 (P_6 - P_3) \quad 26$$

la entalpía a la salida de la bomba se calcula como

$$H_4 = H_3 + \Delta H_{P1} \quad 27$$

n) El cambio de entalpía a través de la bomba de la solución es

$$\Delta H_{P2} = V_{10} (P_{11} - P_{10}) \quad 28$$

la entalpía a la salida de la bomba

$$H_{11} = H_{10} + \Delta H_{P2} \quad 29$$

o) La entalpía en el punto 12, se puede encontrar después de calcular la entalpía $H_{12,7}$, a partir de la definición de la efectividad (ecuación 9), se calcula como

$$H_{12,7} = H (X_{12}, T_7) \quad 30$$

Utilizando la ecuación 9

$$H_{12} = H_{11} - EF_{SE} (H_{11} - H_{12,7}) \quad 31$$

p) Usando la ecuación 8 se encuentra que la entalpía a la salida del intercambiador del fluido de trabajo es

$$H_{12} = H_{11} - EF_{WFE} (H_1 - H_4) \quad 32$$

q) Efectuando un balance de energía en el intercambiador del fluido de trabajo y considerando que no hay pérdidas ni ganancias de calor

$$H_2 = H_1 + H_4 - H_5 \quad 33$$

r) Si la relación de flujo (FR) es la razón del flujo de masa que va del absorbedor al generador entre el flujo de masa del fluido de trabajo

$$FR = \frac{M_7}{M_1} \quad 34$$

Este puede ser calculado en función de las concentraciones al realizar un balance de materia en el absorbedor

$$FR = \frac{X_{10}}{X_{10} - X_7} \quad 35$$

- s) Usando la ecuación 34 y efectuando los balances de masa y energía en el absorbedor, se puede calcular M_1

$$M_1 = \frac{Q_{Ab}}{H_6 - H_{12} + FR(H_{12} - H_7)} \quad 36$$

- t) Realizando un balance de masa en el absorbedor, M_{10} se calcula como

$$M_{10} = M_7 - M_1 \quad 37$$

- u) Considerando que no hay pérdidas ni ganancias de calor y realizando un balance de energía en el intercambiador de la solución

$$H_8 = \frac{M_{10}}{M_7} (H_{11} - H_{12}) + H_7 \quad 38$$

- v) Aplicando la condición de isoentalpía en el proceso a través de la válvula de expansión

$$H_9 = H_8 \quad 39$$

- w) Las potencias absorbidas o disipadas en los diferentes componentes del sistema se determinan como

$$Q_{Ge} = M_1 H_1 + M_{10} H_{10} - M_7 H_9 \quad 40$$

$$Q_{Co} = M_1 (H_2 - H_3) \quad 41$$

$$Q_{Ab} = M_1 H_6 + M_{10} H_{12} - M_7 H_7 \quad 42$$

$$Q_{Ev} = M_1 (H_6 - H_5) \quad 43$$

- x) El trabajo efectuado por las bombas se calcula en el fluido de trabajo y de la solución

$$W_{P1} = M_1 \Delta H_{P1} \quad 44$$

$$W_{P2} = M_{10} \Delta H_{P2} \quad 45$$

y) Definiendo el coeficiente de operación como

$$COP = \frac{Q_{Ev}}{Q_{Ge} + W_{P1} + W_{P2}} \quad 46$$

z) El coeficiente de operación entálpico, se puede definir por las ecuaciones 40 y 43, despreciando el trabajo que es realizado por las bombas

$$COP_{ET} = \frac{M_1 (H_6 - H_5)}{M_1 H_1 + M_{10} H_{10} - M_7 H_9} \quad 47$$

También se analizaron los cambios de temperatura que habría por zonas a través del ancho de la membrana, considerando una membrana comercial (aislante) y una membrana con un dopante de carb4wono (conductividad relativa). Por medio de la ecuación de Fourier, fue posible establecer un sistema de datos en Excel para determinar las temperaturas locales al considerar estudiar el ancho de la membrana. Posteriormente se dedujo una fórmula a través de las tablas de vapor, para que utilizando los resultados de estas temperaturas fuera posible calcular la densidad que existiría en cada punto, así comparar la densidad junto con la temperatura promedio de ambas membranas, cuyo objetivo es disponer de un cálculo aproximado de la mejora en el flujo del fluido refrigerante por el aumento de la conductividad.

El uso de una membrana hidrofóbica para realizar las funciones de generación y condensación en un ciclo de aire acondicionado se planteó en la sección 1.4. En la **Figura 6** se muestran los elementos que conforman la membrana estudiada para ser utilizada en el proceso.

1. soporte externo,
2. sello de silicón,
3. membrana (de este estudio),
4. sello de neopreno,
5. malla metálica,
6. sello de neopreno,
7. sello de silicón,
8. placa condensadora,
9. sello de silicón y
10. soporte externo.

Estas partes excluyen solo los tornillos que unen a este equipo.

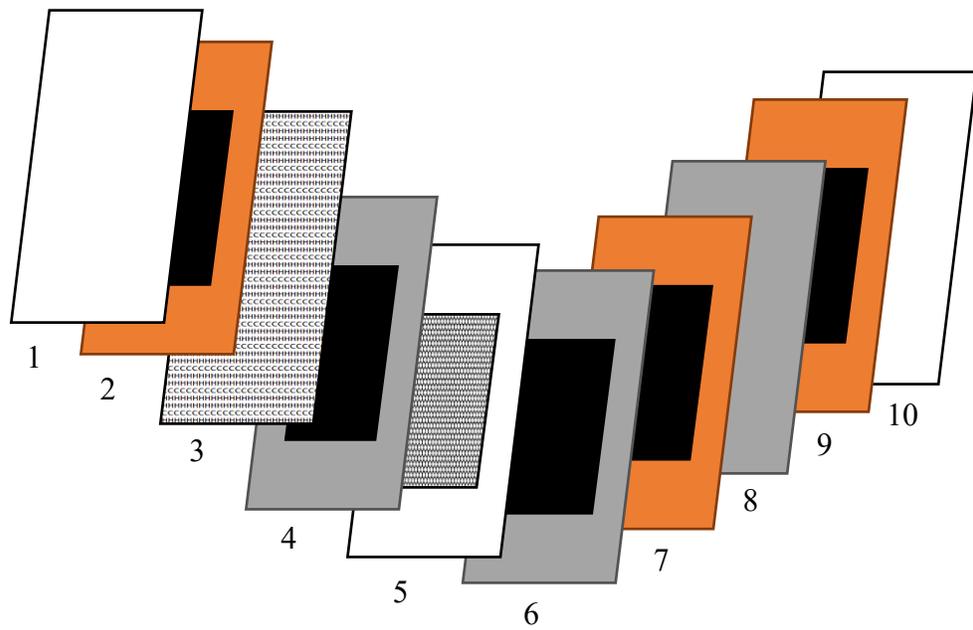


Figura 6. Elementos del equipo generador – condensador que contiene la membrana.

Capítulo 4

Resultados y discusión

El fluido de trabajo que sale del sistema de membrana requiere 1330 W para poder generar enfriamiento a una potencia constante de 1000 W en condición de equilibrio térmico con el condensador y absorbedor cuyos requerimientos son 1042 W y 1288 W, respectivamente. Para los cálculos realizados se estableció una temperatura de equilibrio con el ambiente a 40 °C, se requiere que la membrana opere a 75 °C para obtener enfriamiento a 20 °C, usando las condiciones termodinámicas presentadas en la **Figura 7**, resultados de esta investigación.

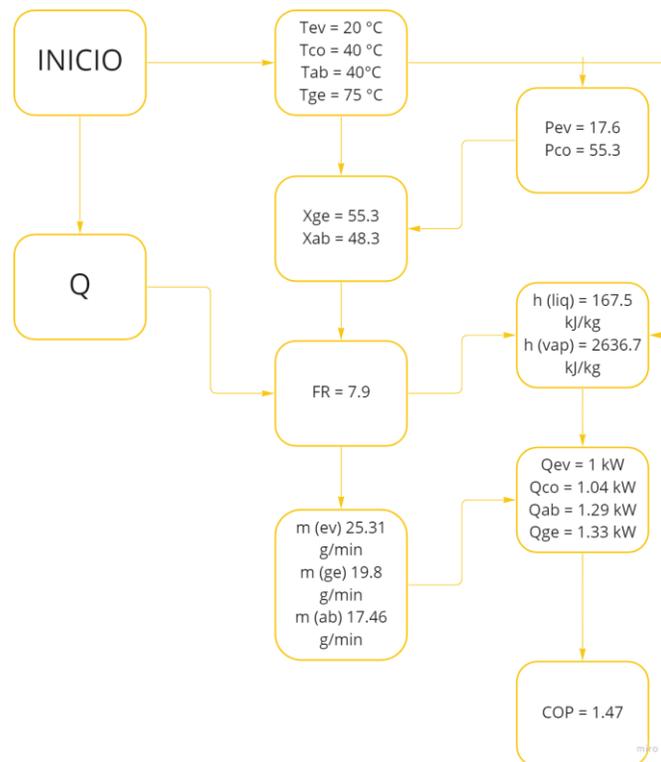


Figura 7. Diagrama de flujo de las condiciones óptimas de operación, para el caso de este proyecto.

Con estas condiciones el flujo calculado corresponde a 25.31 g/min, cuyo requerimiento será 1 m² de membrana hidrofóbica, utilizada en el prototipo analizado [3].

En la **Figura 8** se puede observar que para poder alcanzar el objetivo de 1 kW de carga de enfriamiento, el incremento de la temperatura supone una disminución de la potencia de desorción, esa potencia es el calor del sistema solar que suministra la energía para que el proceso de aire acondicionado solar ocurra en las condiciones señaladas.

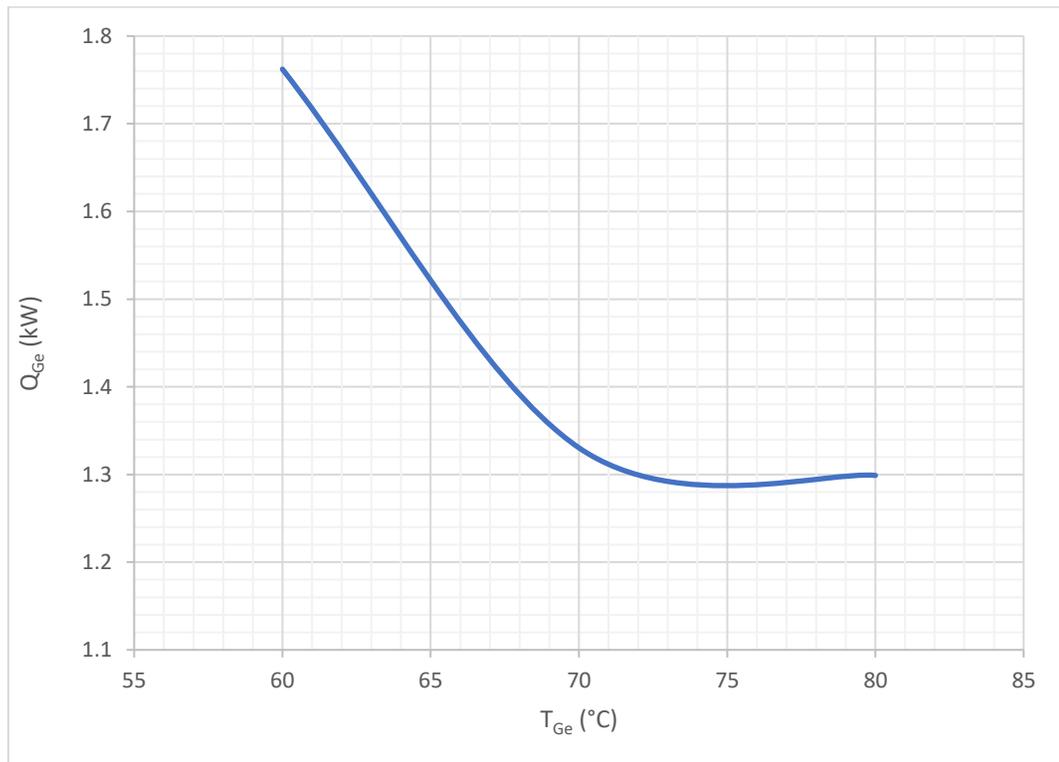


Figura 8. Dependencia de la potencia solar en función de la temperatura de desorción.

En la **Figura 9**, se puede observar la existencia de una relación lineal entre en que, dependiendo de la temperatura de operación del aire acondicionado solar, para una potencia constante de 1 kW, el flujo disminuye cuando la temperatura del evaporador aumenta. Esto es un fenómeno esperado en la que el sistema requiere de mayor cantidad de fluido refrigerante a menores temperaturas para una carga térmica constante comparado con una temperatura mayor (más cercana al ambiente) en la que para la misma carga térmica el flujo requerido es menor.

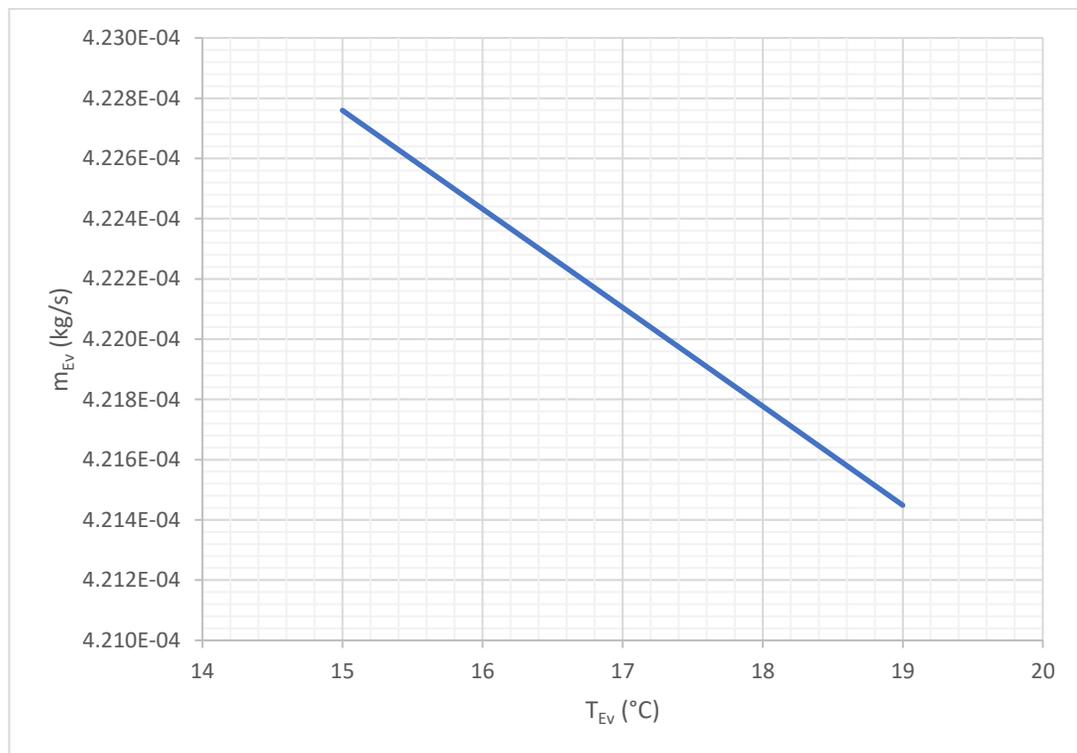


Figura 9. Relación del flujo del fluido de trabajo en función de la temperatura de enfriamiento.

Al variar las condiciones de operación del generador en un rango de temperaturas de 70 °C a 79 °C, es posible evaluar el comportamiento que ocurre en el lado externo de la membrana en una bomba de calor. Es así como podemos observar una eficiencia máxima en la potencia del condensador, en temperaturas de 71.5 °C a 74 °C, es posible observar esto en la **Figura 10**. Los resultados dentro del generador indican que el fenómeno termodinámico no es lineal y por lo tanto existen condiciones factibles para incrementar la eficiencia del ciclo termodinámico, considerando que el coeficiente de operación está definido como la energía del evaporador entre la energía suministrada al generador.

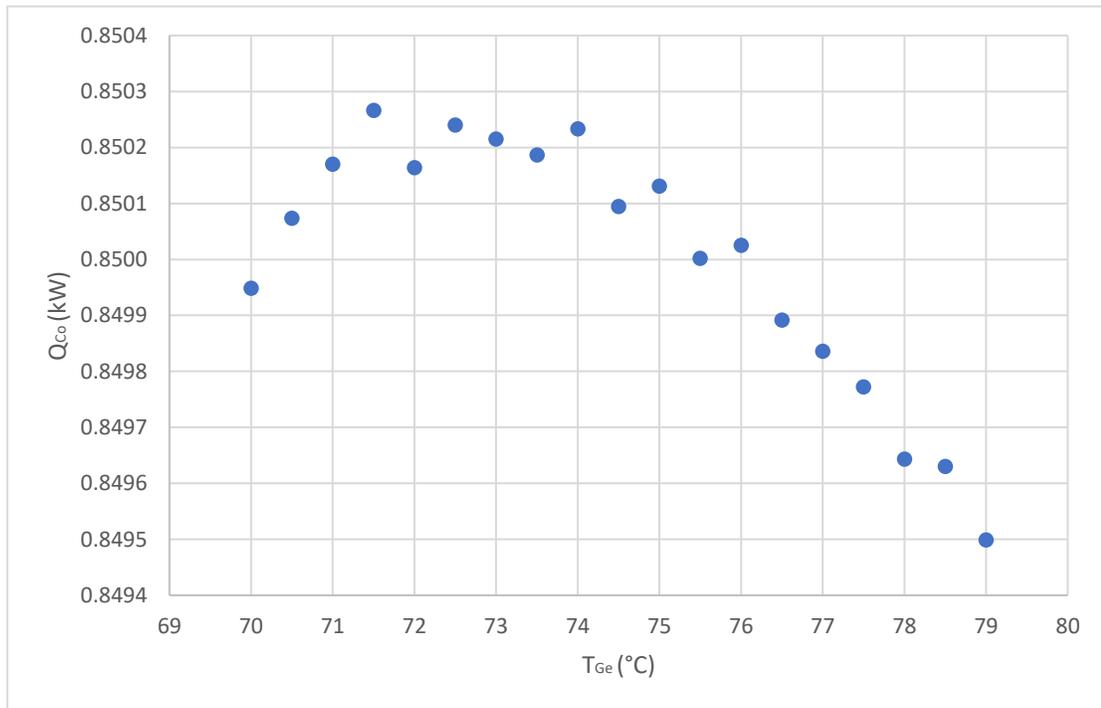


Figura 10. Relación de la potencia en función de la temperatura de desorción.

Si analizamos el lado interno de la membrana, suponiendo un ingreso constante de energía de 1 kW, observamos que no existe una variación considerable para el coeficiente de operación (COP), debido a que este se mantiene constante en valores de 0.0813 con una variación máxima de 0.0004, como puede ser observado en la

Figura 11.

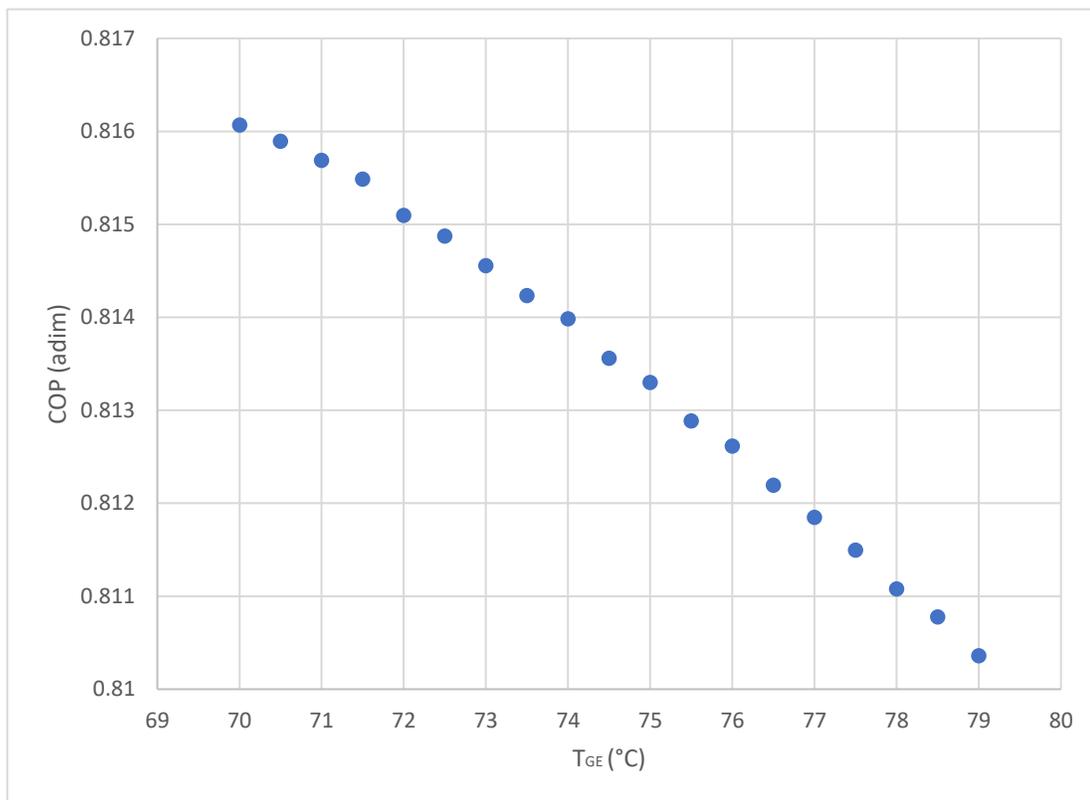


Figura 11. Relación del coeficiente de operación en función de la temperatura de desorción.

Al analizar el comportamiento de la temperatura a través del ancho de la membrana, podemos pensar en tener zonas más pequeñas en las cuáles su temperatura dependerá de las zonas colindantes a ella.

Estas variaciones de la conductividad térmica relativa de la membrana, provocan que la variación en la temperatura a través del área de la membrana sea mayor para el caso de la membrana sin modificar, debido a que las temperaturas en los bordes de la membrana se mantienen por esta baja conductividad térmica. Resultando así en una temperatura promedio de 47.3 °C y 72.3 °C, respectivamente.

Al considerar los resultados experimentales de la densidad del vapor de agua reportados en las tablas de propiedades de vapor de agua saturado, se obtuvo una ecuación para calcular la densidad en las diferentes temperaturas a través del ancho de la membrana comercial y modificada. De los resultados es posible destacar que, en el caso de la membrana modificada se considera una mayor conductividad mayor causando a su vez una menor variación de la temperatura a través de la membrana, como veíamos en el caso anterior. Esto conduce a una densidad de flujo mayor en el caso de la membrana modificada con una conductividad térmica relativa mayor, como se puede apreciar en la **Figura 13** con una variación en la densidad promedio esperada de 56.7 kg/m³ y de 147.7 kg/m³, respectivamente.

(a)

20	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75
19.9	15.8	20	25.3	32.1	40.6	51.5	65.3	82.7	105	133	75
19.8	15.7	19.9	25.2	32	40.6	51.4	65.2	82.6	105	132	75
19.7	15.7	19.8	25.1	31.9	40.5	51.3	65.1	82.5	105	132	75
19.6	15.6	19.8	25.1	31.8	40.4	51.2	65	82.4	104	132	75
19.6	15.5	19.7	25	31.7	40.3	51.1	64.9	82.3	104	132	75
19.5	15.5	19.6	24.9	31.6	40.2	51	64.8	82.2	104	132	75
19.4	15.4	19.6	24.8	31.5	40.1	50.9	64.7	82.1	104	132	75
19.3	15.4	19.5	24.7	31.5	40	50.8	64.6	82	104	132	75
19.2	15.3	19.4	24.7	31.4	39.9	50.7	64.5	81.9	104	132	75
19.1	15.3	19.4	24.6	31.3	39.8	50.6	64.4	81.8	104	132	75
19	24.1	29.2	34.3	39.4	44.5	49.6	54.6	59.7	64.8	69.9	75

ρ (promedio): 56.7 kg/m³

(b)

70	70.5	70.9	71.4	71.8	72.3	72.7	73.2	73.6	74.1	74.5	75
69.9	135	138	141	144	147	150	154	157	161	164	75
69.8	134	137	140	144	147	150	153	157	160	164	75
69.7	134	137	140	143	147	150	153	157	160	164	75
69.6	133	136	140	143	146	150	153	157	160	164	75
69.5	133	136	139	142	146	149	153	156	160	164	75
69.4	132	136	139	142	145	149	153	156	160	164	75
69.4	132	135	138	142	145	149	152	156	160	164	75
69.3	131	135	138	141	145	148	152	156	160	164	75
69.2	131	134	137	141	144	148	152	156	160	164	75
69.1	130	134	137	141	144	148	152	155	159	163	75
69	69.5	70.1	70.6	71.2	71.7	72.3	72.8	73.4	73.9	74.5	75

ρ (promedio): 147.7 kg/m³

Figura 13 .Representación esquemática sobre la variación de la densidad de vapor de agua en la membrana (a) comercial; (b) modificada.

Este procedimiento se llevó a cabo en un rango de temperaturas de 74 a 79 °C, para poder observar la variación que existe dentro del rango de temperaturas en la que puede operar esta membrana. Las temperaturas y densidad promedio obtenidas, se pueden observar en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la temperatura y densidad promedio al evaluar en un rango de temperatura de 74 a 79 °C.

Temperatura de operación (°)	Membrana comercial		Membrana modificada	
	Temperatura promedio (°C)	Densidad promedio (kg/m ³)	Temperatura promedio (°C)	Densidad promedio (kg/m ³)
74	46.8	54.9	71.8	144.2
75	47.3	56.7	72.25	147.7
76	47.8	58.5	72.8	151.4
77	48.3	60.4	73.3	155.1
78	48.8	62.3	73.8	159.0
79	49.3	64.3	74.3	163.0

Con los resultados obtenidos podemos observar un incremento de la temperatura, así como también de la densidad promedio al aumentar la temperatura de operación. Si se mantiene una mayor densidad de flujo en el caso de la membrana modificada, lo que puede verse reflejado en una mejor separación de la mezcla de trabajo.

En la **figura 14** se describen los perfiles térmicos en el volumen de la membrana modificada, se puede ver que el promedio de la densidad del vapor de agua promueve el proceso del aire acondicionado propuesto, existe una

distribución no lineal. Es decir, hay una distribución dependiente de las temperaturas del borde que contienen la membrana estudiada. Debido a este comportamiento observado, es necesario hacer un cálculo por zonas y obtener una densidad promedio, ya que esto nos brinda una aproximación más cercana a la realidad.

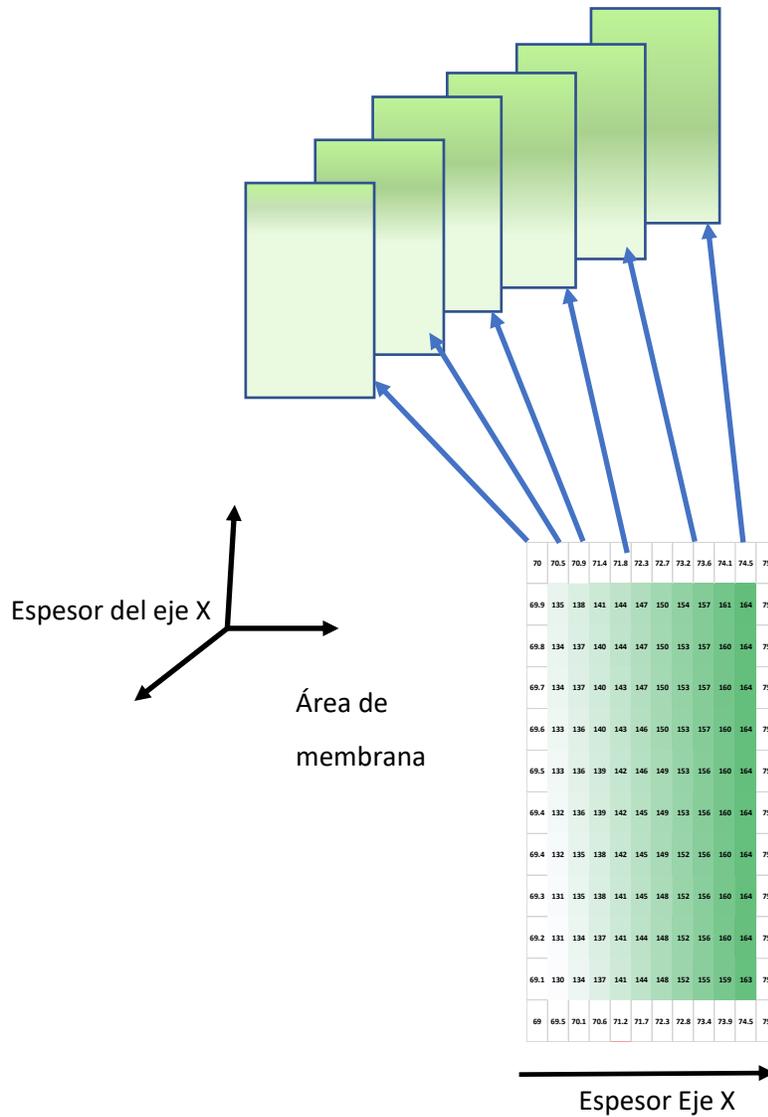


Figura 14. Perfiles térmicos en el volumen de la membrana modificada.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Un prototipo de aire acondicionado operado con una membrana hidrofóbica puede suministrar 1 kW térmico de aire acondicionado a 20 °C, con energía para la desorción a 75 °C, que puede ser proveniente de colectores solares, cuando la temperatura ambiental esta cercana a 40 °C. El flujo requerido para funcionamiento del ciclo es de 25.31 g/min de agua separada por la membrana polimérica.

Es posible que al operar un aire acondicionado solar exista una variación de temperatura en el generador, al evaluar en un rango de 70 °C a 79°C podemos observar que, aunque esto ocurre, el coeficiente de operación se mantiene prácticamente constante, con una variación de +/- 0.0004, teniendo una eficiencia constante con la variación de la temperatura. Por otro lado, la potencia térmica del condesado si se ve afectada negativa o positivamente, dependiendo de la variación de la temperatura del generador/condensador. La conductividad de la membrana puede aumentar la potencia del condensador si pasa de 70 °C a 71.5 °C, o disminuir ese flujo térmico si es mayor a 74°C.

Es posible concluir que no existe un único valor de temperatura para toda la membrana, cuando la membrana se ve afectada por las partículas que modifican su conductividad se presenta una distribución diferente de temperaturas. Esa distribución de temperaturas afecta las propiedades de transporte, como caso de estudio se calculó la densidad del vapor dentro de los poros de las membranas, en donde calculamos un aumento de la densidad

promedio esperada de 56.7 kg/m^3 para el caso de la membrana comercial, a 147.7 kg/m^3 para la membrana modificada.

5.2. Recomendaciones

Es necesario continuar con los estudios acerca de los demás fenómenos de transporte como es la viscosidad del vapor de agua, en comparación de ambos casos, para comprender las diferencias o similitudes que pueden existir entre la membrana comercial y la membrana modificada. Enriquecer los valores considerando conductividad de los materiales que pueden ser utilizados en las membranas, aumentar las variables como es la concentración del dopante, ancho de la membrana, tipo de polímero para tener un mejor estudio preliminar.

Al considerar la ecuación de Fourier, de forma similar, se pueden incorporar los valores de conductividad térmica reportados en la literatura para el caso del polietileno de alta densidad. Con este procedimiento propuesto se tendría un cálculo más cercano a la realidad del comportamiento de la membrana de polietileno con y sin modificaciones. Para lograr este objetivo se propone utilizar los valores presentados en la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

Todos los cálculos que se proponen, se basan en un modelo idealizado con la suposición de que toda la energía se transfiere al fluido, en la realidad la temperatura del ambiente se ve afectada por pérdidas térmicas asociadas a la convección y radiación. Es por esto que será necesario un estudio detallado de la variación de la conductividad en función de la concentración ya en el dispositivo instalado.

Bibliografía

1. Nasr Isfahani, R., Sampath, K., & Moghaddam, S. (2013). Nanofibrous membrane-based absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 36(8), 2297–2307. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.07.019>
2. Romero, R. J., Siqueiros, J., & Huicochea, A. (2007). Increase of COP for heat transformer in water purification systems. Part II - Without increasing heat source temperature. *Applied Thermal Engineering*, 27(5–6), 1054–1061. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.041>
3. Ibarra-Bahena, J., Raman, S., Galindo-Luna, Y. R., Rodríguez-Martínez, A., & Rivera, W. (2020). Role of membrane technology in absorption heat pumps: A comprehensive review. *Membranes*, 10(9), 1–28. <https://doi.org/10.3390/membranes10090216>
4. Ibarra-Bahena, J., Venegas-Reyes, E., Galindo-Luna, Y. R., Rivera, W., Romero, R. J., Rodríguez-Martínez, A., & Dehesa-Carrasco, U. (2020). Feasibility analysis of a membrane desorber powered by thermal solar energy for absorption cooling systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10031110>
5. Duffie, J. A., B. W. A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. In Wiley (Ed.), *Clinics in Laboratory Medicine* (Vol. 9, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/s0272-2712\(18\)30627-9](https://doi.org/10.1016/s0272-2712(18)30627-9)
6. Nasr Isfahani, R., & Moghaddam, S. (2013). Absorption characteristics of lithium bromide (LiBr) solution constrained by superhydrophobic nanofibrous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.053>

7. Miljkovic, N., Preston, D. J., Enright, R., & Wang, E. N. (2013). Electric-field-enhanced condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces. *ACS Nano*, 7(12), 11043–11054. <https://doi.org/10.1021/nn404707j>
8. Luo, J., Liu, Y., Wei, H., Wang, B., Wu, K.-H., Zhang, B., & Su, D. S. (2017). A green and economical vapor-assisted ozone treatment process for surface functionalization of carbon nanotubes. *Green Chem.*, 19(4), 1052–1062. <https://doi.org/10.1039/C6GC02806C>
9. Zhai, C., Wu, W., & Coronas, A. (2021). Membrane-based absorption cooling and heating: Development and perspectives. *Renewable Energy*, 177, 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.156>
10. Ali, A. H. H., & Schwerdt, P. (2009). Characteristics of the membrane utilized in a compact absorber for lithium bromide-water absorption chillers. *International Journal of Refrigeration*, 32(8), 1886–1896. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.07.009>
11. Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). Introduction to polymer science. In *Introduction to polymers* (pp. 3–14).
12. Ramírez Jaime, A. (2013). Membranas compuestas base polimérica: preparación, caracterización y estudios para la separación de gases. In *Centro de Investigación en Química Aplicada*.
13. Yamamoto, R., Kowalski, D., Zhu, R., Wada, K., Sato, Y., Kitano, S., Zhu, C., Aoki, Y., & Habazaki, H. (2020). Fabrication of superhydrophobic copper metal nanowire surfaces with high thermal conductivity. *Applied Surface Science*, 537, 147854. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147854>

14. Balram, A., Santhanagopalan, S., Hao, B., Yap, Y. K., & Meng, D. D. (2016). Electrophoretically-Deposited Metal-Decorated CNT Nanoforests with High Thermal/Electric Conductivity and Wettability Tunable from Hydrophilic to Superhydrophobic. *Advanced Functional Materials*, 26(15), 2571–2579. <https://doi.org/10.1002/adfm.201504208>
15. Tran, H. N., Lien Nghiem, T. H., Duong Vu, T. T., Pham, M. T., Nguyen, T. Van, Tran, T. T., Chu, V. H., Tong, K. T., Tran, T. T., Xuan Le, T. T., Brochon, J.-C., Nguyen, T. Q., Hoang, M. N., Duong, C. N., Nguyen, T. T., Hoang, A. T., & Nguyen, P. H. (2013). Dye-doped silica-based nanoparticles for bioapplications. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 4(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/4/4/043001>
16. Jin, W., Fu, Y., Hu, M., Wang, S., & Liu, Z. (2020). Highly efficient SnS-decorated Bi₂O₃ nanosheets for simultaneous electrochemical detection and removal of Cd(II) and Pb(II). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 856, 113744. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113744>
17. Dowling, a, Clift, R., Grobert, N., Hutton, D., Oliver, R., O'neill, O., Pethica, J., Pidgeon, N., Porritt, J., Ryan, J., & Et Al. (2004). Nanoscience and nanotechnologies : opportunities and uncertainties. *London The Royal Society The Royal Academy of Engineering Report*, 46(July), 618–618. <https://doi.org/10.1007/s00234-004-1255-6>
18. De Mello Donegá, C. (2014). Nanoparticles: Workhorses of nanoscience. In *Nanoparticles: Workhorses of Nanoscience* (Vol. 9783662448). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44823-6>
19. Cao, B. Y., Kong, J., Xu, Y., Yung, K. L., & Cai, A. (2013). Polymer nanowire arrays with high thermal conductivity and superhydrophobicity

fabricated by a nano-molding technique. *Heat Transfer Engineering*, 34(2–3), 131–139. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.703097>

20. Tessema, A., Zhao, D., Moll, J., Xu, S., Yang, R., Li, C., Kumar, S. K., & Kidane, A. (2017). Effect of filler loading , geometry , dispersion and temperature on thermal conductivity of polymer nanocomposites. *Polymer Testing*, 57, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.015>

21. Afrin Roja Jahir Hussain, Abbas A. Alahyari, Scott A. Eastman, Catherine Thibaud-Erkey, Stephen Johnston, M. J. S. (2017). Review of polymers for heat exchanger applications: Factors concerning thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 113(25), 1118–1127. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.041>

22. Cao, B., Li, Y., Kong, J., Chen, H., Xu, Y., Yung, K., & Cai, A. (2011). High thermal conductivity of polyethylene nanowire arrays fabricated by an improved nanoporous template wetting technique. *Polymer*, 52(8), 1711–1715. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.02.019>

23. Liu, Z., Tu, R., Liao, Q., Hu, H., Yang, J., He, Y., Bian, H., Ma, L., & Liu, W. (2018). High thermal conductivity of flake graphite reinforced polyethylene composites fabricated by the powder mixing method and the melt-extruding process. *Polymers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/polym10070693>

24. Evgin, T., Dogacan, H., Horny, N., Turgut, A., & Hakkı, I. (2016). Composites : Part A Effect of aspect ratio on thermal conductivity of high density polyethylene / multi-walled carbon nanotubes nanocomposites. *composites part a*, 82, 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.12.013>

25. Zabihi, Z., & Araghi, H. (2017). International Journal of Thermal Sciences Effective thermal conductivity of carbon nanostructure based polyethylene nanocomposite : Influence of defected , doped , and hybrid filler. *International Journal of Thermal Sciences*, 120, 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.06.010>
26. Balachander, N., Seshadri, I., Mehta, R. J., Schadler, L. S., Borca-Tasciuc, T., Koblinski, P., & Ramanath, G. (2013). Nanowire-filled polymer composites with ultrahigh thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 102(9). <https://doi.org/10.1063/1.4793419>
27. Chrissafis, K., & Bikiaris, D. (2011). Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal decomposition of addition polymers. *Thermochimica Acta*, 523(1–2), 1–24

Anexo 1

Publicación en memorias de congresos

- A. N. González-Hodges, M. E. Nicho, R.J. Romero, Cálculo de potencia térmica para un desorbedor de membrana polimérica para uso en aire acondicionado solar, Memorias del XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Evento virtual México, del 08 al 11 de septiembre de 2021.
- A. N. González-Hodges, M. E. Nicho, R.J. Romero, Estudio de la variación en el coeficiente de operación por el incremento de la temperatura de operación, Memorias del XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, del 23 al 26 de agosto de 2022.

Cuernavaca, Morelos, 10 de noviembre de 2022.

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **Diseño y evaluación teórica de ciclos termodinámicos de revalorización de energía con un polímero conductivo nanoestructurado**, que presenta la alumna **Apsahara Nohemi González Hodges**, para obtener el título de **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JESÚS CEREZO ROMÁN

DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

DRA. MARÍA ELENA NICHÓ DÍAZ

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ

Se adiciona efirma UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

GABRIELA HERNANDEZ LUNA | Fecha:2022-11-11 11:19:00 | Firmante

I+SvBCG69T5uMhu35R1D7xi2GQdKGhJOErJRJ1DNvadTM7CMM9eHwBdajYba4TDKF9fPKXXbqEnOpYloE7mvBHzGP+LXkBs2LO+BKXju4jlypBcWKdY/NNkvoUyixsOUip
ThvMPX2I3r8mwmpoaY/Z5t7pQUdxU5zrizM6vuhzZ+SAfUVjg40A3Q4lo2bdG0G7r3rBBKwUjhaDWGbh8EkjqhcNr9Mjh0qx6XeaajC8WVEjME6nVb164f9xj/RRFvUwPyJ0gSRk0
pZanYRj1johNCPyFMOMr6TcOgVxmw31k06vskJk1qveDuNNKSbEjw9T2dl0Y+PcYK/A1hZVw==

MARIA ELENA NICHU DIAZ | Fecha:2022-11-13 21:49:13 | Firmante

VhZDnMesLK0e9FH7VsO2SyN+6dDg7SH86nMXXvCAm7ABPtcS3hN6XdY7Rc7F5chczaaeQT8blxkA0q0bTyEqikUOsjeFEF3hbtSx0R1ZFVv9kxxbBC65ijHF878imEsSbD+xXKO
b7kqN39lKudMCUjnaTdrCHVJhAuQ+a2sO/czJzZadRI/k8x3r5SWlt+DXAgONGR317mNajmbViEciozP44b5kBE8/7Toum0uz3AX0kgmLjStor/JaFlj+vwbpwB77NjFWpX3uOyDvW
mTWi2/NbOorliScp7/H95wC6yq31aMU0vwqQ0elSqsYF403W7l2zeGyG6PNe+k2MsvA==

ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2022-11-15 16:23:50 | Firmante

AI08+AEfgeulA2RdYI4axvb4kQnENyfiJUu5RUTqfdImve59DvCorse+ZECjzoxn0IEGT30qcw2E8GZDKzfc5zqLMumugEaqsc49e1Kt2m0PDVj4hvTTQ4ZEMh0c56iNYZ1Tk0vUfj
w5o4yslD9BmXm05c5iGKwpsKaV06lnT51JdJ8VbsKjTe7OMkBPz7sx8yF1Um7r6kMYay3LdhDd7XV1X64Q4/w2RirmSVFAqbjguEi30p5L4guLIWBQ090y/co5e6Xm3Ft1oECcx
LXL14Da+z9lZdA/kad8XyU9Vkk5HVeTXihSe+xCWq5erekafYkUePSGqDnBU6OA/Mg==

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2022-11-21 09:01:05 | Firmante

OZ9DxXrJ8eCOVdSYI2HYy+mqDPL/jiAFVkB8fHxGy2oNauSnrnr+MU/qowisrZqeH9sWVo8BUi0hZHHxDsvf3lBWAqpV/RJfufHfHe5oWAacqpe7kH6CSvZExlGGawD64y/cSwr
VLu5jdlvLEy/LYwN5qvG2hbJUpqYnTIQFqXstf2YYV2fQggFSQxubkU35ALt9NWPIE8vOxXDCcvsNfauMOZQ/5gNgvXU43WQKahpsAdPJZU64lcpbKqm5t+PYrLYaVPRY8
nKaQn7m2czddyBMExDmXyV1YTh6wQ4lcr5ogb/lx0LyWfrdgCJURybhxNYFAjTTJ3oxuvg==

JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2022-12-01 09:01:47 | Firmante

CUUuOEz9OqOovcTmuJkH6hZXApVSjydl3LHkc/ZUjYc8FMma8z520aA1nz4lqH70jYW+AsYuvQD217/pCF5R5ahxo3GE9CiL089MXRCu9Z8QKTCJR+m1AzACrrANJ13Cagj
XcTUsnL0KzggAP8YqSbBNQfcoqApfkWls3NJdA18Qm7VPLJRwnX8hmWtdzy1QCkeqMnmKS3/AGKPJhzy/DGj7/W+Rm3dRymIGCmf4/+JyTHthv1723VaKhYdeU1ilurFH6slq
Seu9wXCetOkzZ/PoDojcdCGdsjwdKY/4orwFfthLutCiJCdu/2+dMvtclkwBFrd7VtEwEQI3w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



Fn510jCT3

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/1qd38R6l6o3pFSNqGUA3a2m2klmFznQv>

