

## Estudio teórico de un aire acondicionado solar

### Theoretical study of a solar air conditioning

Elías Martínez Sánchez, César Mauricio Saavedra Rodríguez, Emmanuel Pimentel Cerrillos, Julio Daniel Flores Navarro, Daniela Natalia Luna Casillas, Claudia Patricia Rivero Salazar, Amanda L. Fuentes Silva, Guillermo Martínez Rodríguez.

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Noria Alta s/n, 36050 Guanajuato, México.

\*guimarod@ugto.mx

## Resumen

La tendencia del incremento de la temperatura global tiene efectos nocivos en la salud. Debido a las altas temperaturas actuales, es necesario la implementación de sistemas de aire acondicionado para garantizar el bienestar y confort de las personas. No obstante, los sistemas vigentes emplean energía eléctrica para su funcionamiento siendo dependientes de combustibles fósiles. De ahí la importancia de realizar un estudio teórico de sistemas de aire acondicionado alimentados con energía termosolar que garanticen el suministro de toneladas de refrigeración (TR) para una casa-habitación, que sean rentables y sostenibles. Se desarrolló el modelo analítico de un sistema de aire acondicionado para determinar las variables y los parámetros de mayor impacto en el desempeño del sistema. También se realizó un análisis de las mediciones de la temperatura ambiental para la ciudad de Guanajuato (México) durante los meses de marzo, abril, mayo y junio del 2024, estos datos fueron registrados por la estación meteorológica del Laboratorio de Pruebas Solares de la Universidad de Guanajuato. En conjunto, se realizó una encuesta dirigida al público en general sobre aspectos de salud, económicos y ambientales relacionados al uso del aire acondicionado. El sistema de aire acondicionado propuesto con la adición de un rectificador demostró que es posible disminuir el valor del Potencial de Daño a la Capa de Ozono (ODP) hasta en un 6.25 %. Por lo que el desarrollo tecnológico teórico permite garantizar el suministro energético disminuyendo los daños al ambiente. Finalmente, de la encuesta realizada se sabe que el 89.3 % de la población no cuenta con algún sistema de aire acondicionado y al 67.5 % se preocupa por los daños ambientales que se ocasionan por su uso.

**Palabras clave:** Aire acondicionado solar, Incremento de la temperatura ambiental, Rectificador, Refrigerante.

## Introducción

La tendencia del incremento de la temperatura en el hemisferio norte del planeta Tierra, no muestra similitud alguna con la tendencia (modelada) desde el siglo XI hasta los años 1950s (IPCC, 2001). La intensa explotación de los recursos por la actividad humana ha generado una elevada concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, siendo de los más dañinos el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>), cuyo origen está asociado con la quema de combustibles fósiles (gasolina, diesel, petróleo, gas natural, gas butano, entre otros), la ganadería y agricultura intensiva, y la deforestación. Estos gases provocan que el calor no pueda dispersarse con facilidad, y por ende, este se absorbe por el suelo, glaciares y los océanos. Entre los años 2011 a 2020, la humanidad ha sido testigo del mayor calentamiento del planeta (IPCC, 2001).

La refrigeración y el acondicionamiento o climatización de espacios se han presentado como alternativas efectivas para hacer frente al aumento de la temperatura ambiental que presenta niveles cada vez mayores. Actualmente puede decirse que contar con estos sistemas no es un lujo, sino una necesidad. De acuerdo con Whitman y Johnson (2000), la refrigeración es un proceso mediante el cual el calor indeseable presente en un sitio se traslada a otro. Mientras que, el sistema de acondicionamiento de aire regula la temperatura y la humedad del aire dentro de espacios, ya sea a nivel doméstico o industrial, para mejorar la calidad del aire, además de filtrar las impurezas que pueda llegar a contener, lo que garantiza la estabilidad del ambiente en los recintos, la comodidad de las personas y la conservación de alimentos (Robelo et al., 2024). Incluso es posible regular la presión como ocurre en las aeronaves.

Para hacer posible el proceso de refrigeración y el acondicionamiento del aire se emplean fluidos refrigerantes, los cuales poseen propiedades físicas que les permiten cambiar su estado de agregación

fácilmente, pasando de líquido a gas y viceversa, bajo ciertas condiciones de temperaturas y presión (Trott y Welch, 2000; Fenton et al., 2019). Dentro del ciclo, estos fluidos absorben el calor del ambiente durante la etapa de evaporación, generando un efecto de enfriamiento en sus alrededores al remover este calor (Dincer y Kanoglu, 2010).

Entre los tipos refrigerantes más conocidos se encuentran los clorofluorocarbonos (CFC), siendo estos los más usados. Algunos ejemplos son el R-11, R-12, R-22, R-113, y R-114. Actualmente, su uso ha sido restringido debido a que dañan y agotan la capa de ozono, contribuyendo al calentamiento del planeta (Hundy et al., 2016). Por otra parte, se tienen los hidrocarburos que son compuestos principalmente de carbono e hidrógeno, altamente inflamables pero su costo es bajo, no tienen potencial de agotamiento de capa de ozono, el potencial de calentamiento global es muy bajo y prácticamente no son tóxicos. Este grupo se subdivide en varias familias como hidrobromofluorocarbonos, hidroclorofluorocarbonos (HCFC), hidrofluorocarbonos, bromuro de metilo y metil cloroformo. Un tercer grupo son ciertos compuestos inorgánicos ampliamente usados como refrigerantes (como el amoníaco, dióxido de carbono, aire y dióxido de azufre). Entre estos el amoníaco presenta bajo punto de ebullición a presión atmosférica, es más ligero que el aire, tiene alta capacidad térmica y no daña la capa de ozono; aunque es tóxico e inflamable, si las condiciones del sistema de refrigeración son adecuadas, se pueden evitar todos los riesgos. Un cuarto grupo son las mezclas azeotrópicas que consta de dos sustancias con propiedades diferentes; las dos sustancias no se pueden separar por destilación. Un ejemplo es la mezcla R-502 (8.8 % de R-22, 51.2 % de R-115). Un quinto grupo de refrigerantes son las mezclas no azeotrópicas que constan de múltiples componentes con diferentes volatilidades; cuando se utilizan en ciclos de refrigeración, cambia la composición durante la evaporación o la condensación. Generalmente se emplean con bombas de calor. Ejemplos de este tipo de mezclas son: R-11 + R-12, R-12 + R-22, R-12 + R-114, R-13B1 + R-152a (p. 64-67).

El potencial de agotamiento de ozono (ODP por sus siglas en inglés) es una medida utilizada para comparar la capacidad de destrucción y toxicidad que tienen las diferentes sustancias químicas en la capa de ozono. Esta comparación se realiza con respecto al impacto que provoca el triclorofluorometano (CFC-11, R-11 o también conocido como freón 11) en la capa de ozono estratosférica, el cual tiene asignado un valor de ODP igual a 1.0 (Ray y Halder 2020). Cuanto más bajo sea este valor, se dice entonces que el refrigerante es menos destructivo y se reduce el riesgo ambiental. El ODP de una especie  $i$  puede calcularse con la ecuación (1).

$$ODP_i = \frac{\Delta O_{3\text{especie } i}}{\Delta O_{3\text{CFC-11}}} \quad (1)$$

Donde  $\Delta O_3$  es la degradación del ozono.

Por otra parte, el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) es una métrica utilizada para comparar la capacidad que tienen diferentes gases de efecto invernadero (GEI) para captar radiación infrarroja de la atmósfera y su contribución al calentamiento global durante un periodo de tiempo específico (generalmente 100 años) (Sarbu y Bancea, 2009). Este parámetro considera la velocidad de descomposición de cada especie en comparación con la del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ya que este posee un tiempo de vida atmosférica de 200,000 años, por lo tanto, se considera un GWP de 1.0 para el  $\text{CO}_2$  en un periodo de 100 años (Ray y Halder 2020). Al igual que el ODP, entre menor sea el GWP de la especie evaluada con respecto al del  $\text{CO}_2$ , menos daño y riesgo ambiental se tiene a largo plazo.

La tecnología convencional de aire acondicionado consume mucha energía para operar, casi siempre proveniente de fuentes de combustibles fósiles, y utiliza refrigerantes hidrofluorocarbonados (HFC) que son potentes GEI y tienen elevados índices de ODP. El Protocolo de Montreal demandó la retirada progresiva de los HF con la Enmienda de Kigali en 2019 (<https://ozono.mma.gob.cl/enmienda-de-kigali/>), pues se prevé que, de continuar utilizándolos, para el año 2030 las emisiones de la refrigeración y el aire acondicionado se duplicarán, mientras que serán triplicadas en 2050, rebasando en un 7% las emisiones mundiales de GEI actuales. Un ciclo ideal de refrigeración mecánica o por compresión de vapor se compone de cuatro procesos (Cengel y Boles, 2015): 1-2 Compresión isentrópica en un compresor, 1-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador, 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión, y 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador (p. 618). En la Figura 1(a) se representa este sistema. El compresor eleva la presión del refrigerante hasta presión de condensación, por lo que el gas se recalienta alcanzando en la descarga del compresor la máxima temperatura del ciclo (Fernández y Mardomingo, 2019). Los

compresores más utilizados en el acondicionamiento de aire y refrigeración domésticos y comerciales son el compresor alternativo que utiliza un pistón en un cilindro para comprimir el refrigerante, el compresor giratorio que utiliza un pistón giratorio de tipo tambor que comprime el vapor refrigerante hacia el orificio de descarga y el compresor en espiral que tiene una parte fija que parece un muelle en espiral y una parte móvil que encaja y se engrana con la parte estacionaria (Whitman y Johnson, 2000, p.32). En el condensador tiene lugar el enfriamiento y condensación del vapor refrigerante a alta presión. Para ello, requiere de un sistema de refrigeración o foco caliente donde se disipará el calor absorbido durante las etapas de evaporación y compresión. A la salida del condensador el refrigerante se encuentra como líquido saturado, incluso subenfriado. La válvula de expansión se encarga de reducir la presión del líquido refrigerante y alimentar al evaporador con el refrigerante necesario. Finalmente, en el evaporador el refrigerante se evapora al extraer el calor del medio a enfriar (foco frío). Este es el último objetivo de la instalación: eliminar calor de este medio. A la salida del evaporador, el refrigerante está en fase gaseosa e, incluso, ligeramente recalentado con una baja presión (p.21). Un ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión mecánica simple se representa en un diagrama log(p)-h o presión contra entalpía, Figura 1(b), en el cual se tienen: isobaras (líneas horizontales), isentálpicas (líneas verticales), isotermas (líneas en forma de "silla") e isentrópicas (líneas curvas convexas crecientes). La curva de saturación divide el diagrama en tres regiones: líquido subenfriado (izquierda), vapor sobrecalentado (derecha) y vapor húmedo (mezcla bifásica).

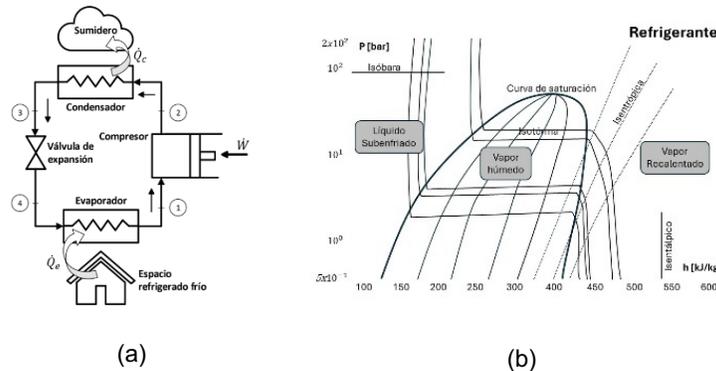


Figura 1. A) Esquema de un ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión mecánica simple, B) Diagrama log(p)-h o presión contra entalpía de un ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión mecánica simple.

El rendimiento de un refrigerador se describe mediante el coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) denotado como  $COP_R$ . El propósito del refrigerador es extraer calor ( $Q_L$ ) del espacio que se desea refrigerar y para lograr esto, se requiere de una entrada de trabajo neta,  $W_{net,entrada}$  (Cengel, 2012). Por lo tanto, el COP de un refrigerador se expresa con la ecuación (2).

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto,entrada}} \quad (2)$$

El  $COP_R$  puede ser mayor a la unidad, lo que significa que la cantidad de calor eliminada del espacio refrigerado puede ser mayor que la cantidad de trabajo suministrado. Una regla empírica es que el COP mejora entre 2 y 4 por ciento por cada °C que eleva la temperatura de evaporación o que disminuye la temperatura de condensación.

La investigación ha sido la clave para diseñar sistemas de enfriamiento y de aire acondicionado que minimizan los efectos dañinos mencionados. El sistema de enfriamiento térmico con absorción se ha propuesto como alternativa para eliminar el uso de refrigerantes que dañan la capa de ozono. Los componentes de un ciclo de absorción básico son: el generador, el condensador, la válvula de expansión, el evaporador, el absorbedor, la bomba y un intercambiador de calor de solución. Desde el generador, el vapor de amoníaco a alta presión se condensa en amoníaco líquido a alta presión en el condensador (Aman et al., 2014), posteriormente pasa al evaporador a través de una válvula de expansión que reduce la presión del refrigerante a la baja presión existente en el evaporador. El refrigerante líquido se vaporiza en el evaporador absorbiendo calor del material que se está enfriando y el vapor resultante a baja presión pasa al absorbedor, donde es absorbido por la solución fuerte proveniente del generador a través de una válvula de expansión y forma la solución débil.

Para mantener la resistencia del absorbente, se bombea continuamente la solución débil a alta presión al generador, donde se calienta, lo que hace que el refrigerante salga de la solución, secando así el absorbente (Aprhornratana y Eames, 1995), el cual regresa al absorbedor y, así, completa el ciclo (Sun, 1998). Se puede agregar un intercambiador de calor para precalentar la solución que sale del absorbedor y la bomba usando la solución caliente que regresa del generador. De este modo se mejora el COP del sistema (Aprhornratana y Eames, 1995). Se denomina disolución a la mezcla homogénea de dos o más sustancias (diámetro de las partículas dispersas inferior a  $102 \text{ \AA}$ ).

Se define como solución fuerte a aquella que tiene poca capacidad de absorber refrigerante, es decir, está cerca de la saturación (Ashrae, 1994). Desde el punto de vista energético el proceso de disolución implica un cambio entálpico ( $\Delta H$ ), ya que es necesario romper las uniones soluto-soluto y disolvente-disolvente para formar unas nuevas soluto-disolvente. Si el valor de  $\Delta H$  de la tercera etapa es mayor que la suma de los  $\Delta H$  de las otras dos etapas del ciclo, se dice que este es exotérmico. Cuando ocurre lo contrario, este es endotérmico. En ambos casos estaremos hablando de disoluciones no ideales. En el caso hipotético de que  $\Delta H$  sea igual a cero se tendrá una disolución ideal (Iriondo y Martínez, 2013).

Una mezcla de compuestos inorgánicos ampliamente utilizada en los sistemas de refrigeración por absorción es Amoniaco-Agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ) debido a que impulsa térmicamente la refrigeración por debajo de los  $0^\circ\text{C}$  (Pearson, 2008). No obstante, estudios muestran que el sistema  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  exhibe un COP relativamente bajo (Wang y Xia, 2014; Aasen et al., 2024). Se están realizando esfuerzos para buscar mejores pares de refrigerante-absorbente que puedan mejorar el rendimiento del sistema (Sun, 1998). Por otra parte, Vanderzee y King (1972) encontraron que la entalpía estándar de la solución de amoníaco gaseoso en agua, para formar el soluto no ionizado es de  $-8448 \pm 15 \text{ cal}_{\text{th}}\text{mol}^{-1}$ .

Comúnmente, los sistemas de refrigeración y de acondicionamiento de aire son energizados con electricidad, proveniente a su vez de combustibles fósiles. Para mitigar la cantidad de emisiones debidas a estos sistemas, se han propuesto sistemas energizados con calor que podrían aprovechar fuentes económicas de calor residual, solar o geotermia, cuyo costo de suministro es insignificante en muchos casos. Esto hace que la refrigeración térmica sea una opción viable y económica. Tal es el caso Ouadha y El-Gotni (2013), quienes llevaron a cabo un análisis termodinámico para estudiar viabilidad de utilizar el calor residual de los motores de diesel marinos para impulsar sistemas de refrigeración amoníaco-agua. Los resultados mostraron que se obtiene un mayor rendimiento del sistema a altas temperaturas del generador y del evaporador, así como a bajas temperaturas del condensador y absorbedor. Sheng et al. (2015) investigó el potencial de ahorro de energía de un acoplamiento de bomba de calor de alta temperatura a un sistema de aire acondicionado con rueda desecante. Los resultados mostraron que la tasa de ahorro del sistema propuesto fue del 45.6 % en comparación con los sistemas convencionales por compresión de vapor (VCS). Liang et al. (2022) propusieron una investigación del rendimiento de un sistema híbrido de enfriamiento desecante que integra una bomba de calor y energía geotérmica superficial. Su análisis de ahorro de energía mostró que el dispositivo puede ahorrar entre un 7.7 % y un 31.7 % del consumo de energía durante la estación de verano en comparación con los sistemas convencionales.

No ha habido una innovación importante en los últimos años que realmente evite que se continúen utilizando refrigerantes con un ODP elevado ni que evite se continúen emitiendo GEI debido al uso de energías provenientes de combustibles fósiles. Una alternativa que resulta evidente es utilizar la refrigeración por absorción en la que ocurre una compresión química en donde se usa un generador que funciona con energía termosolar. En este artículo se propone como caso de estudio una casa-habitación en donde se acondiciona aire mediante refrigeración por absorción que garantiza el suministro de la totalidad de toneladas de refrigeración (TR) requeridas y que recibe la energía necesaria a partir de tecnología termosolar. El sistema cuenta con un rectificador que eleva el valor de ODP en un 6.25 % comparado si no lo tuviera.

## Metodología

### Factores sociales y económicos que definen la compra de un aire acondicionado

Las altas temperaturas que se perciben cada año han ido en aumento, al comparar las temperaturas de años recientes con los promedios del siglo pasado, es posible notar que la temperatura se ha incrementado a nivel global. Con base en los datos de 2019 obtenidos de BBC (BBC, 2018) se observa una tendencia en la que

cada vez es mayor el incremento de la temperatura comparado con el promedio del siglo XX, teniendo picos en que la temperatura supera los 1.2 °C por encima del promedio del siglo.

Para el caso de estudio, casa – habitación, es considerada la temperatura de la ciudad de Guanajuato, México; cuyos datos son tomados de la estación meteorológica del Laboratorio de Pruebas Solares de la Universidad de Guanajuato. El valor promedio de la temperatura de los meses de marzo, abril, mayo y junio del año 2024 se graficó en la Figura 2.

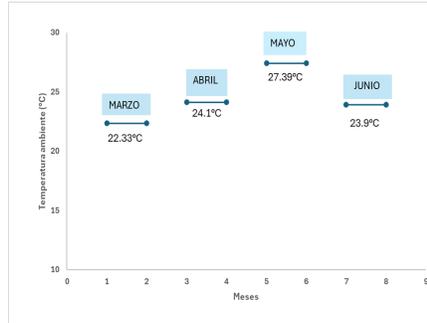


Figura 2. Temperaturas promedio de los meses marzo, abril, mayo y junio del 2024. Ciudad de Guanajuato, Gto., México.

A partir de una serie de preguntas cuidadosamente generadas se determinó la percepción de la población sobre la necesidad de contar con algún sistema de aire acondicionado en su hogar. El conjunto de preguntas se diseñó de manera digital con el fin de tener un mayor alcance, obteniendo 206 respuestas.

### Estimación del coeficiente de desempeño (COP)

El desempeño de un sistema de refrigeración puede ser evaluado a través del COP, donde se considera la carga de refrigeración, la carga suministrada en generador y el trabajo aplicado en la bomba del sistema. El coeficiente de desempeño para un sistema de aire acondicionado por absorción es descrito por la ecuación (2) de la página 3.

### Planteamiento del problema de refrigeración con rectificador

En este trabajo se desarrolló un sistema de absorción basado en la investigación de Aman et al. (2014) pero con la adición de un rectificador posterior al generador como se muestra en la Figura 3. En los sistemas reportados tanto el rectificador como el generador forman parte de un mismo equipo. La estrategia de separar el rectificador del generador se realiza para comparar el COP del sistema con y sin rectificador.

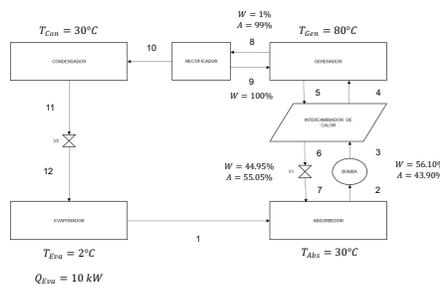


Figura 3. Esquema de un ciclo de refrigeración por absorción con rectificador.

Los valores, las condiciones y el sistema general de Aman et al. (2014) son replicados en este trabajo, pero con la diferencia que el rectificador es contiguo al generador. La mezcla empleada es amoniaco-agua, fungiendo como refrigerante y absorbente, respectivamente. Las temperaturas de los equipos característicos del sistema de refrigeración por absorción son conocidas, el evaporador presenta una temperatura de 2 °C, 30 °C para el absorbedor, 80 °C para el generador y 30 °C para el condensador. La capacidad de refrigeración del sistema es de 10 kW. La corriente desde el absorbedor hasta el generador contiene una concentración

másica de amoníaco al 43.90 % en agua, mientras que la corriente del generador hacia el absorbedor contiene una concentración del 55.05 % amoníaco en agua. Finalmente, es considerada una mezcla de 99 % amoníaco en agua para la corriente de alimentación del rectificador. Es importante mencionar que la composición en la alimentación en el rectificador, sistema propuesto, es una consideración propia de este estudio.

La estrategia de análisis de cada unidad del sistema consiste en determinar los valores de las variables de entrada y salida para cada uno de los componentes involucrados en el ciclo de refrigeración. El ciclo de refrigeración es considerado en estado estacionario ya que no presenta acumulación en ninguna de las unidades que comprenden el ciclo, por lo que la materia que entra a cada unidad es igual a la materia que deja la unidad correspondiente. De manera simultánea son planteados los balances de energía para cada una de las unidades, si bien pueden existir pérdidas de energía dentro del sistema por fricción o intercambio de calor hacia el ambiente, estas pérdidas no son consideradas dentro del modelo.

Los balances de materia deben de cumplir con la ley de conservación de materia:

$$\sum m_{entrada} - \sum m_{salida} = 0$$

Los balances de energía están sujetos a la ley de conservación de energía:

$$\sum Q = \sum m_{salida}h_{salida} - \sum m_{entrada}h_{entrada} + W$$

#### Balance de materia y energía para el evaporador

Las líneas que conectan el evaporador con el resto del sistema son la alimentación proveniente de la válvula de expansión y la línea de salida que conduce al absorbedor, Figura 3. El evaporador al contener una corriente de entrada y una salida, el flujo másico en cada una de estas corrientes será igual.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_1$$

La energía disponible en el evaporador es la diferencia entre la energía que deja al evaporador y la energía que entra a este equipo, de manera ideal, son ignoradas todas aquellas ganancias o pérdidas de energía del equipo.

$$\dot{Q}_{Eva} = \Delta \dot{H}$$

#### Balance de materia y energía para el absorbedor

La unidad siguiente al evaporador es el absorbedor (Figura 3), unidad con dos líneas de alimentación y una de salida, esta línea contendrá la solución débil del sistema de refrigeración. Por el lado de alimentación se encuentra formado por la línea proveniente del evaporador y la línea de solución fuerte.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_7 = \dot{m}_2$$

El balance de energía para el absorbedor dicta que la diferencia entre la corriente de salida y las corrientes de entrada, proporcionan la cantidad de energía en esta unidad.

$$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_2h_2 - \dot{m}_1h_1 - \dot{m}_7h_7$$

#### Balance de materia y energía para el Generador

Entre el absorbedor y el generador se encuentran tres equipos adicionales (intercambiador de calor, válvula de expansión y bomba) que serán analizados posteriormente. Determinar el balance de materia en el absorbedor y generador, satisface instintivamente el balance de materia para estos equipos, pero no el balance de energía.

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_9 = \dot{m}_5 + \dot{m}_8$$

#### Balance de energía para el generador

$$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_8h_8 - \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_9h_9$$

#### Balance de materia y energía para el Condensador

El condensador posee una entrada y una salida, por lo que el flujo másico en cualquier punto es el mismo. El balance energético está determinado por:

$$\dot{Q}_{Con} = \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{10}h_{10}$$

Los balances de materia y energía para el resto de los equipos (Intercambio de calor, rectificador, bomba, válvula de expansión 1 y válvula de expansión 2) se realizan de manera similar. Estos se presentan en la Tabla 1.

Asimismo, se realizó la simulación del sistema de aire acondicionado sin rectificador con las mismas condiciones y variables de entrada reportadas por Aman et al. (2014), con los resultados obtenidos de la propuesta de este proyecto de verano y los obtenidos del caso de Aman se hizo la comparación correspondiente entre ambos sistemas.

**Tabla 1.** Resumen de balances de materia y energía de los equipos indicados.

Equipo	Balance de materia	Balance de energía
Intercambiador de calor	$\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$	$\dot{Q}_{HE} = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_3h_3 - \dot{m}_5h_5$
Rectificador	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}$	$\dot{Q}_{Rec} = \dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_8h_8$
Bomba	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{W}_{Bom} = \dot{m}_3h_3 - \dot{m}_2h_2$
Válvula de Expansión 1	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_7h_7 = \dot{m}_6h_6$
Válvula de Expansión 2	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$	$\dot{m}_{12}h_{12} = \dot{m}_{11}h_{11}$

En la Tabla 2 se muestran los balances de materia y energía del sistema sin rectificador, por lo que las corrientes entre el generador y el rectificador no son consideradas en este modelo, al igual que equipo rectificador.

**Tabla 2.** Resumen de balances de materia y energía para el sistema sin rectificador

Equipo	Balance de materia	Balance de energía desglosado
Evaporador	$\dot{m}_4 = \dot{m}_3$	$\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_3h_3$
Absorbedor	$\dot{m}_4 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_5$	$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_4h_4$
Generador	$\dot{m}_7 = \dot{m}_1 + \dot{m}_8$	$\dot{Q}_{Gen} = \dot{m}_1h_1 + \dot{m}_8h_8 - \dot{m}_7h_7$
Condensador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{Q}_{Con} = \dot{m}_2h_2 - \dot{m}_1h_1$
Intercambiador de calor	$\dot{m}_6 + \dot{m}_8 = \dot{m}_7 + \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{HE} = \dot{m}_7h_7 + \dot{m}_9h_9 - \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_8h_8$
Bomba	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$\dot{W}_{Bom} = \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_5h_5$
Válvula de Expansión 1	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9h_9 = \dot{m}_{10}h_{10}$
Válvula de Expansión 2	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{m}_2h_2 = \dot{m}_3h_3$

Con los datos obtenidos se calculan los coeficientes de desempeño (COP) de ambos sistemas para compararlos.

## Resultados y Discusión

Percepción social sobre el uso de aire acondicionado

Con base en el estudio social, en la Figura 4 se muestra que un gran número de las personas encuestadas ha sentido afectaciones hacia su salud, confort y rendimiento en sus áreas de trabajo o estudio o actividades cotidianas. De los síntomas que han sido percibidos por la población son dolores de cabeza, deshidratación, afectaciones del sueño y en los peores casos, golpes de calor. Se destaca que el incremento de temperatura tiene repercusiones tanto en la salud, productividad y confort de las personas. Esto sitúa al aire acondicionado como algo necesario para las personas.

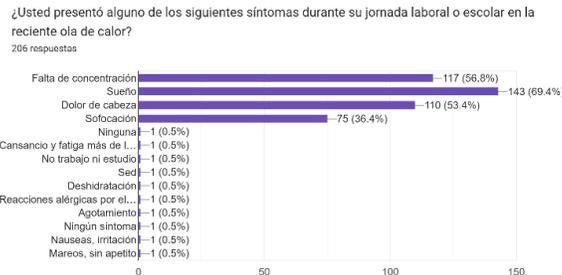


Figura 4. Principales afectaciones al bienestar de las personas debido al incremento de temperatura ambiental.

La tendencia del incremento en la temperatura ambiente aumenta progresivamente, por lo que los sistemas de aire acondicionado están siendo considerados por la población como una necesidad, sin embargo, el estudio muestra que el principal impedimento para contar con un sistema de aire acondicionado es su elevado costo, como puede visualizarse en la Figura 5(a), por otro lado, el 67.4 % de los encuestados indicaron que el alto costo es un factor relevante para considerar adquirir un aire acondicionado, y solamente el 10.7 % de los encuestados posee uno de estos equipos, Figura 5(b).

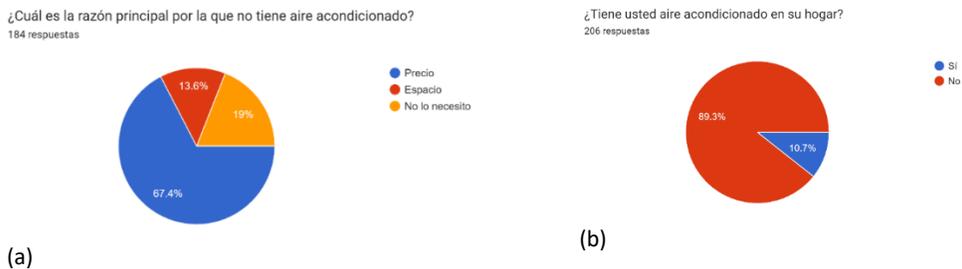


Figura 5. Porcentaje de los encuestados que respondieron: (a) Los principales motivos por los que no tienen aire acondicionado en su hogar; (b) Si cuentan con aire acondicionado en su hogar.

Conforme a los datos recabados, se observa en la Figura 6 que los temas relacionados al medio ambiente han formado parte de la cultura de las personas, preocupándose cada vez más por el daño al ecosistema. Siendo que el 67.5 % de la población encuestada tiene conocimiento que los sistemas de aire acondicionado tradicionales repercuten de manera negativa en el entorno, por lo que las propuestas de aire acondicionado amigables con el medio ambiente son importantes para un gran porcentaje de la población.

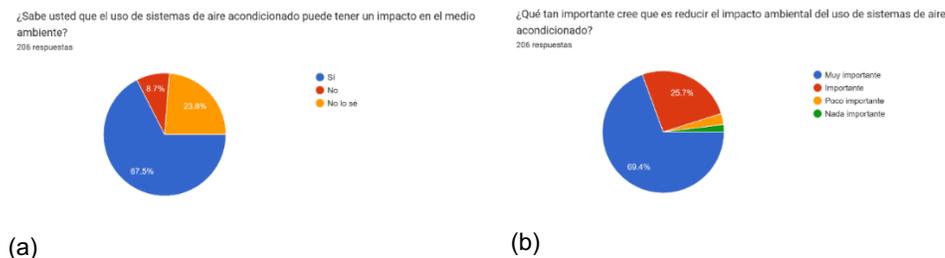


Figura 6. Conciencia social acerca del impacto al ambiente por el uso de aire acondicionado.

## Comparación del coeficiente de desempeño de los sistemas analizados

El sistema de ecuaciones resultantes de los balances de materia y energía fue resuelto con las condiciones planteadas y suposiciones del sistema. La estimación de las propiedades termodinámicas es obtenida del compendio de Ashrae (1997). En la Tabla 3 se muestran los valores del COP de la propuesta de aire acondicionado con rectificador y sin rectificador. Puede observarse que el COP del sistema con rectificador presenta un valor de 0.64, siendo 0.04 mayor que el modelo presentado en el trabajo de Aman y 0.05 superior al modelo simulado sin rectificador. En otras palabras, el sistema propuesto presenta una mejora significativa en comparación a los sistemas sin rectificador.

**Tabla 3.** Comparación de resultados de los diversos sistemas

Equipo	Sistema Aman et al. (2014) (sin rectificador)	Sistema Simulado (sin rectificador)	Sistema Simulado (con rectificador)
Bomba	0.89 mW	0.039 kW	0.476 kW
Generador	16.77 kW	16.75 kW	15.14 kW
Evaporador	10 kW	10 kW	10 kW
COP	0.60	0.59	0.64

## Conclusiones

Durante el año 2024 se registraron incrementos significativos en la temperatura ambiente, con valores de hasta 5.06 °C para la ciudad de Guanajuato, lo cual hace evidente la necesidad de que las personas cuenten con un sistema de aire acondicionado para mantener la productividad, el confort y la salud.

No obstante, de acuerdo con una encuesta realizada a la población en general, el 89.3 % no cuenta con algún sistema de aire acondicionado, puesto que uno de los principales impedimentos para la adquisición de estos equipos es el alto costo.

El incremento del COP utilizando un rectificador en un sistema de aire acondicionado por absorción fue de 6.25 % por lo que parte importante del estudio debe de enfocarse en mejorar la eficiencia de estos sistemas.

## Agradecimientos

Al alumno Sergio Yovani Rodríguez Rojo por su apoyo en el acompañamiento a los alumnos de verano orientándolos para un mejor trabajo grupal.

## Referencias

- Aman, J., Ting, D. S.-K., & Henshaw, P. (2014). Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia-water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 424–432. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.10.006
- American Society of Heating, R. a. A. C. E. (. & American Society of Heating, R. a. A. C. E. (. (1997). *ASHRAE handbook: Heating, ventilating, and air-conditioning applications* (SI edition.). Atlanta, Ga.: ASHRAE.
- Aosen, A., Jervell, V.G., Hammer, M., Strom, B.A., Skarsvag, H.L., Wilhelmsen, O., 2024. *Bulk and interfacial thermodynamics of ammonia, water and their mixtures*. *Fluid Phase Equilibria* 584 (2024) 114125. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114125>.
- Aphornratana, S., & Eames, I. W., 1995. *Thermodynamic analysis of absorption refrigeration cycles using the second law of thermodynamics method*. *International Journal of Refrigeration*, 18(4), 244–252. doi:10.1016/0140-7007(95)00007-x.
- BBC Mundo. (2018, 3 de diciembre). *Cambio climático: los 6 gráficos que muestran el estado actual*. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46426822>

- Çengel, Y. A., 2012. *Termodinámica*. McGraw-Hill Educación, (7.a ed.).
- Dincer, I. and Kanoglu, M. (2010). *Refrigeration Systems and Applications*. Wiley.
- Fernández, J. A. y Mardomingo, A., 2019. *Fundamentos de Tecnología Frigorífica*. Dextra.
- Fenton, D. L., Callahan, C. W., & Elansari, A. M., 2019. Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities. Refrigeration. Chapter 7. Pg. 209–270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00007-9>.
- Hundy, G. F., Trott, A. R., & Welch, T. C., 2016. *Refrigerants. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps*, pg. 41–58. doi:10.1016/b978-0-08-100647-4.00003-6
- IPCC, 2001. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/spanish/pdf/wg1sum.pdf>
- Iriondo, M. C., & Martínez, 2013. *Química en biociencias*. OpenCourseWare (Universidad del País Vasco). <https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=232>.
- Liang, J.D., Kao, C.L., Tsai, L.K., Chiang, Y.C., Tsai, H.C., Chen, S.L., 2022. *Performance investigation of a hybrid ground-assisted desiccant cooling system*. Energy Conversion and Management 265 (2022) 115765.
- Ouahda, A., and El-Gotni, Y., 2013. *Integration of an Ammonia-water Absorption Refrigeration System with a Marine Diesel Engine: A Thermodynamic Study*. Procedia Computer Science 19 (2013) 754-761. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.099>.
- Pearson A., 2008. *Refrigeration with ammonia*. International Journal of Refrigeration 31-4 (2008) 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.11.011>.
- Ray, Z., and Halder, G., 2020. *Replacement of halogenated refrigerants towards sustainable cooling system: A review*. Chemical Engineering Journal Advances 3 (2020) 100027. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100027>.
- Robelo, F.W.D., Ismail, K.A.R., Lino, F.A.M., Sousa, G.A., 2024. Experimental investigation of a photovoltaic solar air conditioning system and comparison with conventional unit in the context of the state of Piauí, Brazil. Solar Energy, 272 (2024) 112492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112492>.
- Sarbu, I., and Bancea, O., 2009. *Environment global protection to the polluting action of refrigerants*, WSEAS Trans. Environ. Dev. 5 (6) (2009) 425–434.
- Sheng, Y., Zhang, Y., Zhang, G., 2015. *Simulation and energy saving analysis of high temperature heat pump coupling to desiccant wheel air conditioning system*. Energy 83 (2015) 583-596. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.068>.
- Sun, D.W., 1998. *Comparison of the performances of NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub>-NaSCN absorption refrigeration systems*. Energy Conversion and Management, 39(5-6), 357–368. doi:10.1016/s0196-8904(97)00027-7.
- Trott, A. R., and Welch, T. 2000. *Refrigeration and Air Conditioning*, Refrigerants. Chapter 7. Pg. 28–35. doi:10.1016/b978-0-75064219-4/50003-0
- Vanderzee, C. E., and King, D. L. 1972). *The enthalpies of solution and formation of ammonia*. The Journal of Chemical Thermodynamics, 4(5), 675–683. doi:10.1016/0021-9614(72)90039-0
- Wang, S.D., and Xia, Z.Z., 2014. *Optimal ammonia water absorption refrigeration cycle with maximum internal heat recovery derived from pinch technology*. Energy 68 (2014) 862-869. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.065>.
- Whitman, W. and Johnson, W. (2000). *Tecnología de Refrigeración y Aire Acondicionado I*. Fundamentos. Thomson Parafino.