

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

**PROPUESTA DE ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA LA
CLIMATIZACIÓN DE LOCALES CON CICLO DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Autor: Ing. César Manuel Reyes Guerra

Holguín 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

PROPUESTA DE ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA LA CLIMATIZACIÓN DE LOCALES CON CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN
EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: Ing. César Manuel Reyes Guerra

Tutor: MSc. Borges Arnaldo Díaz Suárez

Holguín 2019

PENSAMIENTO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

Climatizar mediante el uso de fuentes de energías renovables, como la energía solar, contribuye a la búsqueda de soluciones frente a los problemas energéticos y ambientales que azotan a la humanidad. En esta investigación se realiza el diseño de un equipo de aire acondicionado que utilice un ciclo de absorción calentado con energía solar para climatizar un pequeño local de oficina. En este sentido se dispone de los datos necesarios para realizar un análisis técnico, económico y medio ambiental que permita demostrar la contribución a la eficiencia energética de esta tecnología de climatización. Lo que trae consigo, que se deje de consumir 5 110 kW de energía eléctrica al año, permitiendo un ahorro monetario de 2 248 pesos, además de evitar la emisión de 1 860 kg de CO₂.

SUMMARY

Climatize through the use of renewable energy sources, such as energy solar, contributes to the search for solutions to energy problems and environmental issues that plague humanity. In this research, the design of an air conditioning system that uses an absorption cycle heated with solar energy to air-condition a small office space is carried out. In this sense, we have the necessary data to perform a technical, economic and environmental analysis that demonstrates the contribution to the energy efficiency of this air conditioning technology. What it brings, that is to stop consuming 5 110 kW of electric power per year, allowing a monetary saving of 2 248 pesos, also to avoiding 1 860 kg's emission of CO₂.

ÍNDICE

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Fundamentación teórica.....	5
1.1 Situación energética	5
1.2 Consumo energético en la climatización	12
1.3 Ciclo de refrigeración por absorción	18
CAPÍTULO II: Propuesta de diseño del sistema de aire acondicionado con el uso de energía solar térmica.....	23
2.1- Caracterización técnica del equipo propuesto.....	23
2.2- Descripción del ciclo de trabajo.....	24
2.3- Diseño mecánico.....	25
2.3.1- Cálculo del evaporador:	25
2.3.2- Diseño del condensador.....	29
2.3.3- Diseño del Generador.	32
2.3.3- Diseño del absorbedor	35
2.4- Análisis del panel fotovoltaico	37
2.5- Descripción final del equipo	37
2.6- Evaluación económica.	39
2.7- Estudio medioambiental	44
2.7.1- Cálculo de emisiones de CO ₂	44
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

INTRODUCCIÓN

Actualmente la humanidad ha alcanzado un desarrollo tecnológico sin precedentes, el cual obligatoriamente sigue aumentando con el paso de los años. Este inmenso desarrollo depende de un enorme suministro energético para ser funcional, por ende, a medida que pase el tiempo aumentará la demanda de este vital elemento. Sin embargo, la matriz energética actual proviene en gran medida de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio, cuyas reservas irán disminuyendo con el paso del tiempo hasta agotarse completamente. Por tanto, existen dos tareas urgentes a cumplir: lograr, mantener y elevar la eficiencia energética en la generación, distribución y consumo de la misma y la otra es cambiar la matriz energética a fuentes renovables que puedan suministrar energía de forma suficiente, estable, continua y oportuna.

Cuba no está fuera de la actual realidad del agotamiento previsible del petróleo, situación que ha obligado a considerar el ahorro de energía como la tarea fundamental de estos momentos y todo lo que contribuya a este fin, por eso se debe profundizar en el análisis de las causas que afectan la eficiencia energética, para eliminarlas y a su vez buscar nuevas formas y métodos que conduzcan a una disminución del consumo de energía eléctrica.

En este sentido, es recomendable el desarrollo de tecnologías avanzadas y eficientes para el aprovechamiento de la Fuentes Renovables de Energía (FRE), así como estudiar su potencial en Cuba de forma que, aunque no se logre sustituir la generación de energía a partir de los combustibles fósiles, se desplace un porcentaje importante de la actual carga de consumo hacia las mismas [Moreno, 2 013].

En el campo de la climatización y refrigeración el fuerte crecimiento en el uso de estos equipos ha contribuido notablemente a elevar el consumo de electricidad, debido a que estos son altamente consumidores de energía, y en algunos casos representan los mayores consumos. Se estima que la energía requerida para la refrigeración y climatización representa entre un 30-40% de la energía total usada previéndose su aumento en el futuro debido a los niveles de calidad de vida alcanzados [Revista de Ingeniería Energética ,2 017].

Debido a la aún fuerte dependencia de una fuente de energía eléctrica, comúnmente la mayoría de los sistemas de climatización son de compresión de vapores donde en el ciclo

existe un proceso adiabático, en el que se realiza trabajo mecánico para comprimir el vapor refrigerante aumentando su presión considerablemente. Para esto se incluye en la instalación un compresor que, para realizar ese proceso, consume energía de la red eléctrica de acuerdo al tamaño o capacidad calorífica del equipo.

El alto consumo de energía asociado a estos sistemas, unido a los problemas medioambientales causados por los mismos, han contribuido al desarrollo de investigaciones relacionadas con los sistemas de climatización que utilizan recursos renovables como fuente de energía motriz.

En las últimas décadas se ha visualizado a las tecnologías de climatización solar como una alternativa a los sistemas convencionales de compresión de vapor tan empleados en la refrigeración y acondicionamiento del aire.

En el caso específico de Cuba, dadas las restricciones energéticas que existen, motivadas por el alto costo en moneda libremente convertible, se hace necesario hacer restricciones en el consumo de energía. Es por ello que en los momentos de más demanda de clima, en muchas ocasiones, se obliga a las instalaciones de servicio que apaguen sus sistemas de aire acondicionado, ocasionando molestias en los momentos de mayor demanda.

Es importante destacar que las necesidades de enfriamiento y tratamiento del aire se incrementan en los meses de verano coincidiendo con la época del año de mayor disponibilidad de radiación solar, lo cual brinda una excelente oportunidad para el empleo de sistemas de climatización solar.

En Cuba se dispone de una radiación media anual aproximada de 5 kWh/m² al día, equivalente a la energía química acumulada en un litro de petróleo. Con el aprovechamiento tanto directo, como indirecto de la energía solar se pueden satisfacer todas las necesidades energéticas, lo que convierte en un sistema atractivo la aplicación del frío mediante el empleo de la energía solar en el país. [Federico Mayor, 1 997]

Debido a esto la utilización de energía solar aparece como una alternativa viable para lograr bajas temperaturas a partir de sistemas que utilizan el principio de absorción, posibilitando accionar estos sistemas directamente con energía solar o calores residuales, disminuyendo así, las emisiones de dióxidos de carbono y la demanda de energía eléctrica. A pesar de

ello, no se aprovecha esta posibilidad de ahorro y no se han diseñado, ni probado equipos que demuestren las ventajas de esta alternativa. Es por ello que se plantea como **Problema de Investigación:**

¿Cuál sería el aporte de un sistema de climatización que utilice un ciclo de refrigeración por adsorción para la climatización de locales?

Este problema de investigación se enmarca dentro del **Objeto de investigación:**

Eficiencia energética en la climatización doméstica.

Y más específicamente dentro del **Campo de acción:**

Ahorro energético mediante el uso de sistemas de climatización por absorción.

Para dar solución al problema de investigación se propone como **Objetivo general:**

Realizar una valoración técnico económica y medio ambiental para determinar la contribución a la eficiencia energética de los sistemas de climatización por absorción en pequeños espacios.

El cumplimiento de este objetivo se realizará a través de la **Hipótesis:**

Si se realiza el diseño de un equipo de aire acondicionado que utilice un ciclo de absorción calentado con energía solar para climatizar un pequeño local de oficina se dispondrá de los datos necesarios para realizar un análisis técnico, económico y medio ambiental que permita demostrar la contribución a la eficiencia energética de esta tecnología de climatización.

Para dar cumplimiento a este objetivo general se desarrollarán las siguientes **Tareas de Investigación:**

1. Revisión bibliográfica del tema.
2. Estudio de tecnologías utilizadas para la refrigeración por absorción aprovechando la energía solar térmica.
3. Diseño del prototipo de equipo de aire acondicionado.
4. La valoración técnico, económica y medioambiental de la solución propuesta.

Métodos de investigación:

Teóricos:

- **Análisis y síntesis:** Se utiliza en la revisión y consulta de la bibliografía especializada sobre el tema, así como, en el estudio de la información existente sobre los sistemas de absorción para dar respuestas al problema investigado.
- **Histórico lógico.** Se aplicó para establecer el estado del arte del tema de investigación, como un marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el tema, objeto de estudio, y qué leyes o aspectos generales se abordan en el estudio.

Prácticos

- **Diseño:** Mediante el software Solid Works se realiza el diseño del prototipo.

La tesis está estructurada en dos capítulos en el primero se muestran los resultados de la búsqueda bibliográfica referente al objeto de estudio y en el segundo se dan a conocer los resultados del diseño propuesto, así como el análisis técnico-económico y medio ambiental.

Capítulo I. Fundamentación teórica

1.1 Situación energética

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano, desempeñando un papel decisivo en nuestra sociedad. Esta es un insumo fundamental para el desarrollo social y el crecimiento económico. No sólo se utiliza para satisfacer las necesidades básicas de la vida cotidiana y prestar los servicios básicos (calefacción, refrigeración, cocción de alimentos, alumbrado, transporte, etc.) si no, que también es un factor de la producción de primordial importancia en casi todos los sectores de la industria.

En esta sociedad, los países más pobres muestran los consumos más bajos, mientras que los países más ricos utilizan grandes cantidades de la misma. Sin embargo, este escenario está cambiando de forma drástica, cambio que se acentuará en los próximos años, donde serán precisamente los países en vías de desarrollo quienes experimenten con mayor rapidez un aumento en su consumo de energía debido al incremento que tendrán tanto en sus poblaciones como en sus economías.

Hoy, la especie humana se encuentra ante la idea de seguir por la senda del “desarrollo” a través de la explotación de los recursos energéticos fósiles finitos que posee. Parte de la energía primaria que hoy se produce se emplea en el llamado “sistema eléctrico” (generación de energía eléctrica) y la otra va para el “sistema de combustibles”(para uso no eléctricos, como transporte, calefacción, etcétera). La fracción de energía primaria destinada a la generación de electricidad, correspondía a escala global a un 36 %, aunque en Japón y en otros países económicamente desarrollados esta cifra es superior al 40 %. Según los pronósticos de algunos expertos, para la década del 2 010 al 2 020, la proporción de la energía primaria usada para generar electricidad crecerá hasta alrededor de 44 % como promedio a escala mundial y ya a mediados del siglo 21 la cifra llegará a un 50 %.[Revista: “Consumer. Economía doméstica”, 2 010]

A pesar de que el consumo de energía alcanza cifras astronómicas a escala mundial y que los pronósticos prevén su aumento con un crecimiento medio anual de 3,3% (ver Figura 1), existe una marcada e irracional desigualdad con que este aparece distribuido entre los

diferentes países y regiones geográficas (ver Figura 2), el cual se ha duplicado en los últimos 25 años. Esto se relaciona directamente con un aumento en las necesidades económicas y sociales de la población mundial, así como el uso cotidiano de cada vez más aparatos eléctricos que aumentan la demanda energética.



Figura 1. Perspectiva de la demanda mundial de energía eléctrica [Afinidad Eléctrica, 2 014]

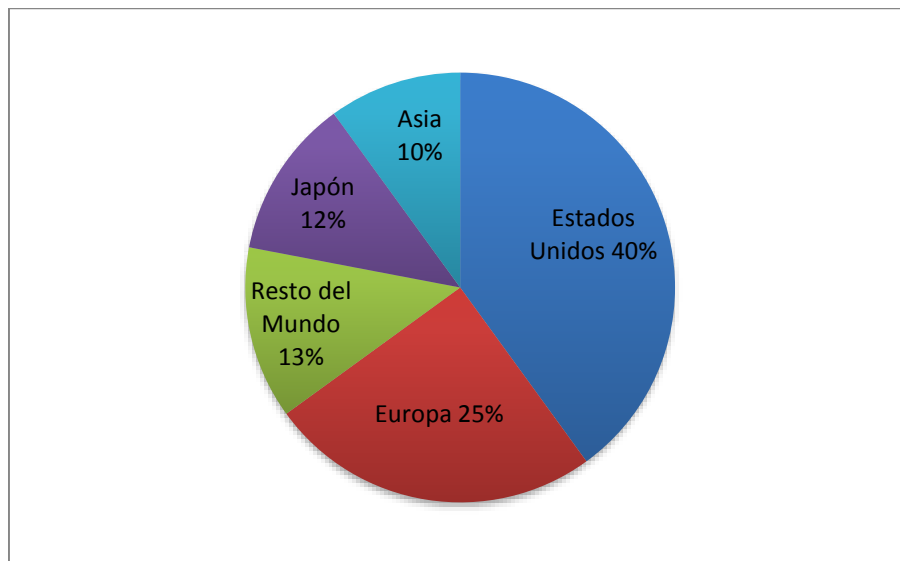


Figura 2. Distribución del consumo de energía mundial. [María de los Ángeles. "Crisis energética mundial", 2 006]

Esto permite observar cómo se reparte el consumo mundial de energía. Claramente, se observa que Europa y EEUU representan más de la mitad del consumo de energía (65%), debido a que en ellos se localizan los países más desarrollados.

Datos de la dirección general de energía y transportes de la comisión europea señala que en Europa las personas pasan el 90% del tiempo dentro de los edificios y la energía que se consume en ellos representa el 40% del consumo global de la unión europea, más que la industria y el transporte. Sin embargo, utilizando medidas simples en conjunto con nuevas tecnologías, se puede economizar hasta un 20% de la energía del conjunto de la Unión Europea y así mejorar al mismo tiempo el confort de los edificios. Con este fin la comunidad europea ha creado una nueva directiva en materia de rendimiento energético que vigila e incentiva a todos los miembros a regirse por las normas establecidas para reducir el consumo de energías no renovables y tener menos emisiones de gases invernadero. [Energy Information Administration (EIA), Organization for Economic Cooperation and Development, OECD, 2 008]

Por otra parte, las proyecciones de la Organización de la Naciones Unidas indican que la población actual pasará de los actuales casi 7 mil millones a 7,4 mil millones en el 2 020; y el porcentaje de población de los países en vías de desarrollo sobre el total mundial pasará del 77% actual al 81%. Así mismo, un tercio de la población del mundo no tiene acceso a la energía eléctrica, porcentaje que se ha mantenido constante en los últimos 30 años. [Energy Information Administration (EIA), Organization for Economic Cooperation and Development, OECD, 2 008]

La producción de todas las fuentes energéticas tendrá un aumento significativo; el consumo mundial de energía pasará de los 6 000 MTEP (millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo) anuales de consumo actual a más de 10 000 MTEP para el año 2 025, como se muestra en la Figura 3. La proporción demandada de energía global correspondiente al mundo en desarrollo será cada vez mayor, y menor la de los países desarrollados.

El uso de electricidad crecerá en América Latina entre 3,7% y 4,1%, hasta el 2 020, pasando de 638 TWh de consumo a 1 500 TWh. Las energías renovables por su parte tendrán también un crecimiento importante, como se ve en la Figura 4. Latinoamérica está en estas proyecciones, entre los de menor crecimiento esperado en el uso de energías alternativas.

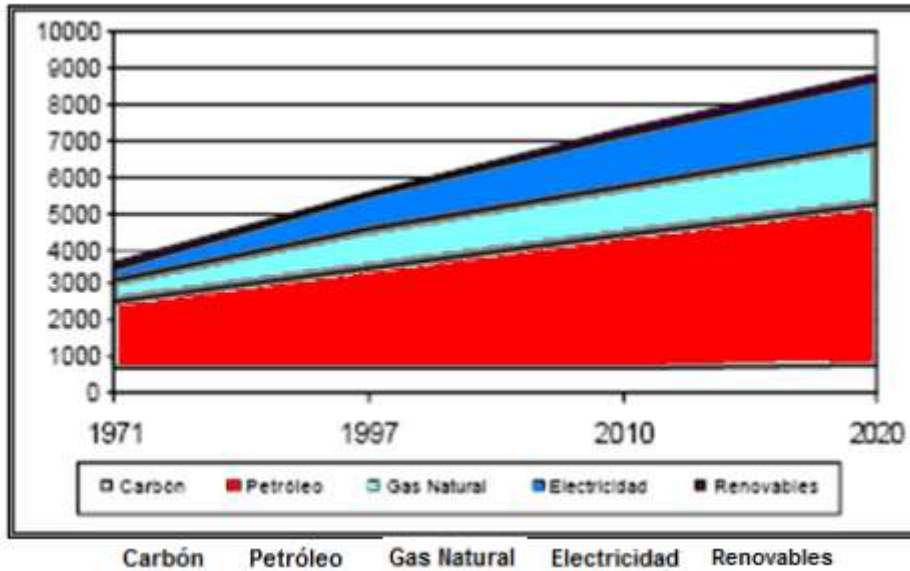


Figura 3. Crecimiento del consumo mundial de energía entre 1 970 y 2 020 en MTEP [Energy Information Administration, 2 008].

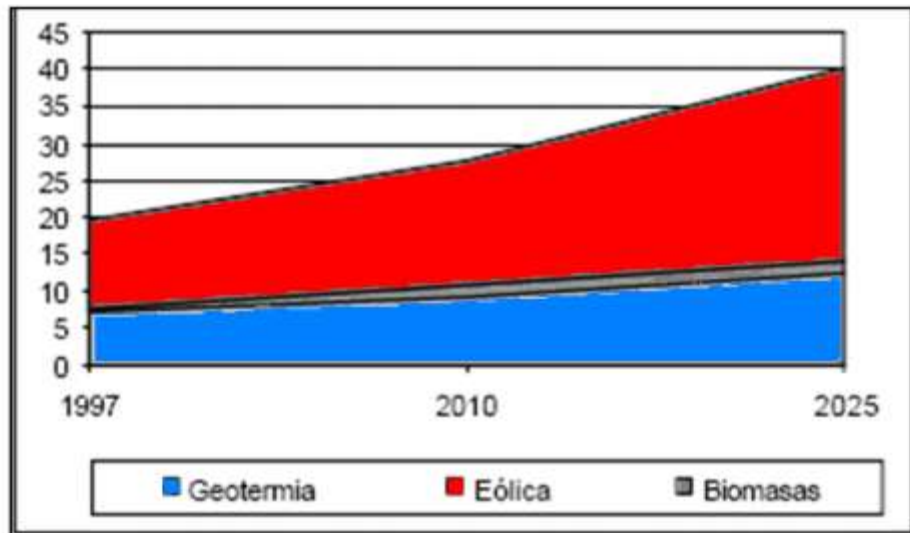


Figura 4. Generación de electricidad a partir de energías renovables en América Latina entre 1 997 y 2 025 en TWh [Energy Information Administration, 2008]

El consumo mundial de energía se estima que aumentará 57% de 2 004 a 2 030. Entre 1 980 y 2 004, los líquidos del petróleo, el carbón y el gas natural fueron los portadores energéticos dominantes.

De acuerdo a las proyecciones en 2 007 del System for the Analysis of Global Energy Markets (SAGEM) de la Energy Information Administration de los Estados Unidos, los mismos energéticos seguirán dominando hasta 2 030 cuando su uso se habrá casi duplicado con una tasa de crecimiento del 2,6% anual. Sin embargo, su contribución total al consumo mundial de energía pasaría del 38% en 2 004 al 34% en 2 030 [Energy Information Administration, 2 008].

En la Figura 5 se muestra el consumo energético mundial para el año 2 016, donde el consumo de petróleo contribuyó con el 33,3%, la utilización de gas natural con el 24,1%, el uso del carbón con el 28,1%, la utilización de energía nuclear representó un 4,5%, el uso de la hidroelectricidad 6,9% y el uso de Fuentes Renovables de Energía el 3,2%.

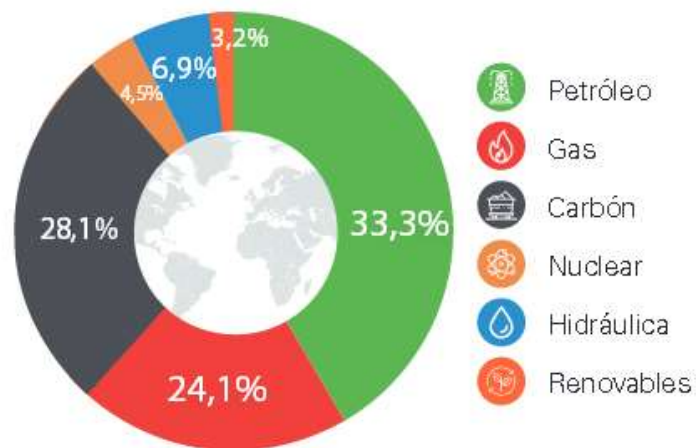


Figura 5. Consumo energético mundial en 2 016

En cuanto a la evolución esperada del precio del petróleo, el International Energy Outlook 2 010 de la U.S. Energy Information Administration (EIA) establece tres proyecciones para 2 035, aunque reconoce un alto margen de incertidumbre en las proyecciones. (Figura 6)

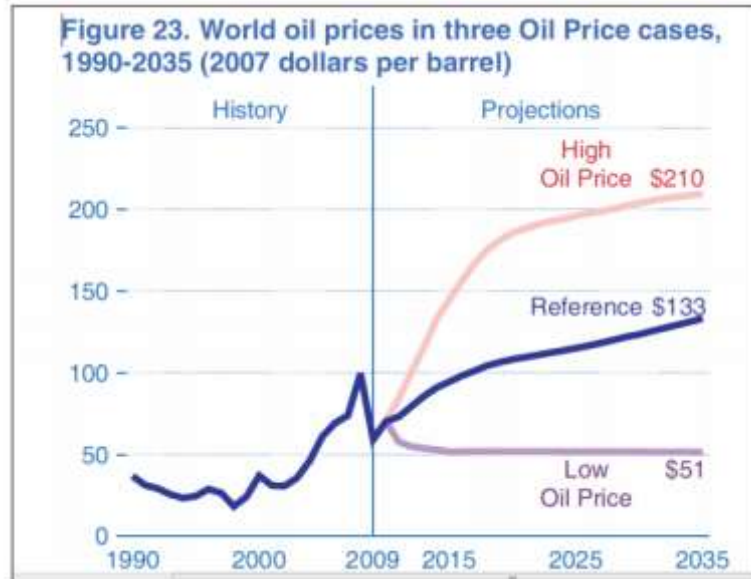


Figura 6. Evolución probable de los precios de petróleo [International Energy Outlook 2 010 de la U.S. Energy Information Administration (EIA)]

Pero la demanda se muestra muy inelástica: aunque las diferencias entre las distintas hipótesis de precios mundiales del petróleo son considerables, las proyecciones para el consumo mundial de energía hasta 2 035 no varían sustancialmente. (Figura 7)

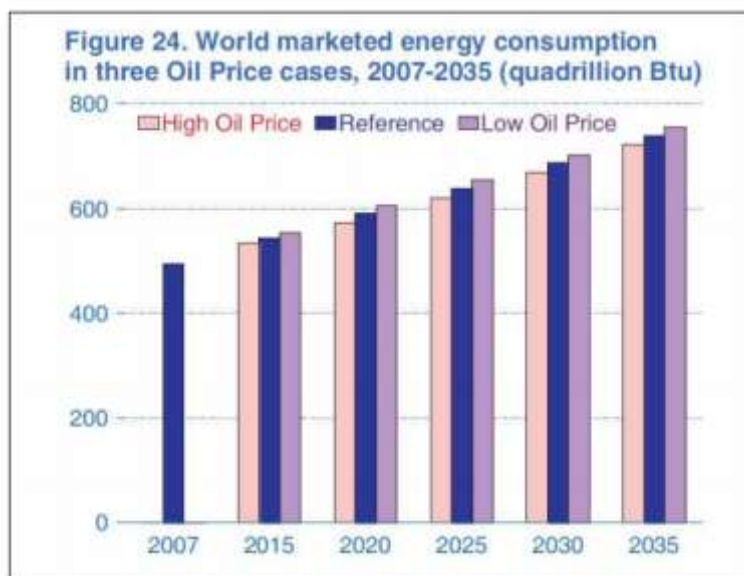


Figura. 7 Consumo mundial de energía con distintos precios probables de petróleo. [International Energy Outlook 2010 de la U.S. Energy Information Administration (EIA)]

Sin embargo, en los países desarrollados se evidencia una marcada acción para elevar la eficiencia energética a partir del alza de los precios provocada por la primera crisis del petróleo de inicios de los años 70, acción que se refuerza con el nuevo incremento de precios que se produjo a inicios de los 80. Estas acciones pasaron a formar parte de la política energética en estos países, logrando desacoplar los ritmos de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB), del consumo de energía. Entre los elementos fundamentales de esa política están: el incremento máximo de la eficiencia en el uso de todas las formas de energía, la búsqueda de fuentes alternativas al petróleo, el desarrollo de tecnologías y equipos de uso final de una alta eficiencia y el desplazamiento hacia industrias menos energointensivas, como consecuencia del propio proceso de desarrollo y maduración de la industria.

En este sentido la ingeniería explora nuevas alternativas para la generación de energía eléctrica que no dependen directamente de los precios y/o productividad de la industria petroquímica. Estas nuevas formas de generar energía eléctrica son denominadas energías limpias (pues no requieren de la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad) y han presentado ventajas ecológicas aunque no precisamente a un bajo costo.

Este tipo de energías también llamadas alternativas, han cobrado mayor relevancia industrial, pues en la actualidad la implementación de estas nuevas fuentes de energía renovable, así como la promoción de proyectos de reaprovechamiento energético (cogeneración y trigeneración) permiten garantizar una mejor utilización de la energía almacenada en los combustibles. Esto supone un correcto empleo de la energía primaria, que se traduciría en ahorro económico y en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente. Este último tópico es muy importante a nivel mundial pues así como es esencial la relación entre el petróleo y la energía eléctrica, de la misma manera la generación de energía eléctrica lleva una gran vinculación con contaminación ambiental, pues la quema de combustibles es considerada actualmente como una de las principales causas del deterioro ambiental.

Como subproducto de las actividades de producción y uso de energía se generan contaminantes que afectan a la atmósfera, la hidrosfera, el suelo y los seres vivos. Por ejemplo, la utilización de combustibles fósiles y leña contamina el aire con gases de efecto

invernadero, partículas y óxidos de azufre y nitrógeno. La energía hidroeléctrica a menudo provoca graves daños ambientales debido a la inmersión de extensas superficies de tierra. Los cambios climáticos mundiales vinculados a la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se ha convertido en un problema de envergadura a nivel mundial. El agotamiento de recursos naturales, la acumulación de desechos, incluidos los desechos radiactivos, la deforestación, la contaminación del agua y la perturbación de la tierra constituyen algunos otros ejemplos de problemas ambientales relacionados con la energía.

Estas emisiones contaminantes tienen una doble naturaleza. Por un lado existe una contaminación inherente a la operación normal de los sistemas de producción y por otro una contaminación producida, en situaciones catastróficas de carácter accidental. Ambas deben ser valoradas y reducidas hasta niveles asumibles en términos medioambientales y socioeconómicos.

En esencia, se trata de implementar tecnologías que permitan reducir la contaminación en origen, estudiar su impacto sobre el medio y la capacidad de éste para diluir, transferir y asimilar esta contaminación, determinando los límites por encima de los cuales los efectos pueden llegar a hacerse irreversibles.

1.2 Consumo energético en la climatización

Actualmente existe una gran dependencia de los sistemas termodinámicos de generación de frío para muchas aplicaciones tales como la conservación de alimentos, medicamentos, equipos y para el acondicionamiento de ambientes. No solo consiste en generar frío, sino también como lo indica la palabra “acondicionar” un ambiente, trabajar sobre la temperatura, la calidad del aire y las condiciones de humedad.

Es importante mencionar que el constante avance de los países desarrollados hacia mejores niveles de vida, junto con el también cada vez mayor porcentaje de tiempo pasado por las personas en el interior de locales (estimado en aproximadamente un 90% en la actualidad), genera la necesidad de asegurar unas ciertas condiciones ambientales en los espacios interiores, consideradas como aceptables. Estos requisitos esperados constituyen, por lo

tanto, una necesidad relativamente actual, que además irá evolucionando en el futuro a la par del desarrollo de los conocimientos sobre las repercusiones asociadas, así como del propio nivel de vida de las personas que los ocupan.

Sin embargo, la búsqueda de unas condiciones ambientales óptimas que aseguren tanto el confort como la salud y productividad de sus ocupantes, no debe suponer en ningún caso una ruptura con la eficiencia del comportamiento energético del edificio. La evaluación de la calidad de los espacios interiores debe orientarse, por lo tanto, a compatibilizar estos requisitos con los de eficiencia energética establecidos por las distintas normativas. De esta forma, un edificio y sus instalaciones deberán proporcionar un adecuado ambiente para las personas, teniendo asignada a la vez una categoría aceptable en la escala de Certificación Energética establecida.

El propósito de un sistema de acondicionamiento de aire es tratar el aire para lograr controlar condiciones de humedad, temperatura, pureza y ventilación, con el fin de proporcionar ambiente confortable a las personas y adecuado a máquinas y materiales cuyas condiciones de operación y conservación así lo exijan. Estos objetivos deben lograrse haciendo un uso eficiente de la energía y preservando el medioambiente.

El cumplimiento de este objetivo se lleva a cabo por los procesos de ventilación, calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación, filtrado y refrigeración. Cada uno de los cuales cumple una función específica y diseñada para operar correctamente dentro de rangos establecidos.

Actualmente los equipos de refrigeración aplicados al aire acondicionado son en su mayor parte de compresión mecánica de vapor accionados mediante motores eléctricos. Además de los problemas globales originados por las emisiones asociadas a la generación de la energía eléctrica consumida por los equipos de aire acondicionado, se producen otros problemas locales como pueden ser la sobrecarga de las redes de distribución de energía eléctrica originada por una gran simultaneidad en la demanda, en una elevada concentración en una temporada del año y en algunas horas del día. Solucionar este problema implicaría un sobredimensionamiento de la red con una capacidad de distribución que estaría ociosa durante una buena parte del tiempo.

Se calcula que la demanda mundial de energía de los acondicionadores de aire se triplique para 2 050, lo que requerirá una capacidad eléctrica adicional equivalente a la suma actual de la potencia estadounidense, europea y Japón. El stock global de aparatos de aire acondicionado en edificios crecerá a 5 600 millones de unidades, frente a los 1 600 millones existentes hoy en día, lo que equivale a 10 nuevas unidades de aire acondicionado vendidos por segundo durante los próximos 30 años, esperándose que esta sea la segunda fuente más grande de crecimiento de la demanda eléctrica a nivel mundial después de la industria y el primero en los edificios. [Revista: “Consumer. Economía doméstica”, 2 010]

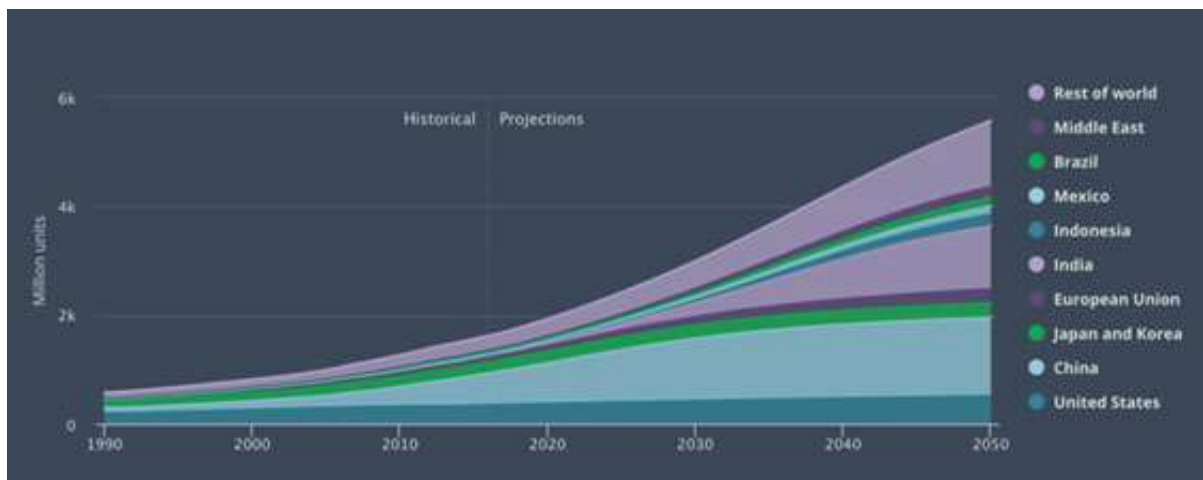


Figura 8. Cantidad de equipos de aire acondicionado a nivel mundial. [Revista: “Consumer. Economía doméstica”, 2 010]

El uso de aire acondicionado y ventiladores eléctricos para mantenerse fresco representa ya, aproximadamente, una quinta parte de la electricidad consumida por los edificios en todo el mundo, o el 10 % de todo el consumo mundial de electricidad en la actualidad. Pero a medida que los ingresos y el nivel de vida mejoran en muchos países en desarrollo, el crecimiento de la demanda de aparatos de aire acondicionado en las regiones más calurosas se disparará.

El problema es particularmente delicado en las naciones de más rápido crecimiento, en países cálidos como India, donde la participación del aire acondicionado en la carga máxima de electricidad podría alcanzar el 45% en 2 050, frente al 10% actual sin tomar ninguna medida. Esto requerirá grandes inversiones en nuevas plantas de generación para

satisfacer la demanda pico de energía por la noche, cuando no se puede contar con la tecnología solar fotovoltaica.

Establecer estándares de eficiencia más altos para la refrigeración es uno de los pasos más fáciles que pueden tomar los gobiernos para reducir la necesidad de nuevas centrales eléctricas, y permitirles al mismo tiempo reducir las emisiones y reducir costos.

Las mejoras en la eficiencia reducirían a la mitad el crecimiento de la demanda de energía de equipos de climatización a través de los estándares obligatorios de rendimiento energético. Esto genera múltiples beneficios, haciéndola más asequible, más segura y más sostenible, logrando ahorros de hasta 2 456 millones de Euros en inversiones, combustibles y costos operativos.

Otra de las alternativas que en determinadas circunstancias puede resolver o paliar parte de los problemas asociados a la producción de frío para aire acondicionado es la utilización de máquinas de refrigeración con activación térmica. En primer lugar, no utilizan fluidos depesores de la capa de ozono y pueden accionarse mediante calor residual de procesos u obtenido mediante colectores solares térmicos. También pueden accionarse mediante la combustión de gas natural aprovechando la red de distribución de gas que está en su mayor parte ociosa durante el verano.

Debido al aumento de los costos de la energía eléctrica y las prácticas de sostenibilidad que actualmente se llevan a cabo en varias partes del mundo, los especialistas insisten en que es de suma importancia la investigación y desarrollo de sistemas que nos permitan superar los obstáculos actuales; iniciando también políticas de ahorro energético; reciclaje y el mejoramiento de sistemas actuales, por otra parte se debe aprovechar las bondades de las energías renovables, que son baratas luego de haber instalado el sistema de aprovechamiento, reduciendo así la dependencia actual del petróleo y asegurando el futuro de las generaciones venideras, así la humanidad estará mejor preparada para enfrentar el cambio climático, y la inminente desaparición del petróleo.

Entre las tecnologías más utilizadas y de mejores resultados alcanzados para la climatización se encuentran los equipos que trabajan bajo el ciclo de absorción, considerándose una buena alternativa a la refrigeración por compresión.

Las máquinas de absorción no tienen compresor; el evaporador y el condensador realizan la misma función que en las enfriadoras convencionales, pero la compresión mecánica es reemplazada por una compresión térmica. Esta es realizada por un absorbente químico y un generador térmico, por lo que al prescindir del compresor, el consumo eléctrico desciende considerablemente.

Comparados con los sistemas por compresión de vapor, los sistemas de refrigeración por absorción presentan diversas diferencias, con ventajas e inconvenientes para cada uno.

Tabla 1. Comparación entre los ciclos de absorción y de compresión mecánica

Absorción	Compresión mecánica
2 tanques y una pequeña bomba, por lo tanto : <ul style="list-style-type: none"> • Generalmente más costoso • Silencioso y sin vibraciones • El conjunto absorbedor/hervidor ocupa mucho más volumen que el moto compresor • Prácticamente sin mantenimiento 	1 gran compresor (equipos con estrechas tolerancias), por tanto : <ul style="list-style-type: none"> • Normalmente menor inversión • Suele requerir aislamiento acústico/vibratorio • Menor volumen • Mantenimiento especializado
Energía barata, a menudo residual, de bajo nivel térmico	Energía relativamente cara
Hay que enfriar absorbedor y condensador y eventualmente deflegmador y rectificador	Solo se enfría el condensador
El límite de temperatura está hacia los -40 C ⁰	Es posible bajar de -100C ⁰

Baja eficiencia (0,4 a 0,7)	Eficiencia elevada (1,5 a 4 aprox)
-----------------------------	------------------------------------

La refrigeración útil se logra de la misma manera en ambos sistemas. Esto es por la evaporación de un líquido en un evaporador, utilizando el calor latente de vaporización para obtener un efecto de enfriamiento. Ambos sistemas utilizan, así mismo, un condensador para remover calor del vapor refrigerante a una alta presión, y regresarlo a su estado líquido original, además de utilizar un dispositivo de control de flujo o de expansión.

Los sistemas difieren, además, en cuanto a los medios utilizados para recuperar el refrigerante evaporado y aumentar su presión. En primer lugar, las formas de energía utilizadas para operar el sistema, son diferentes. En el sistema de compresión de vapor se utiliza la energía mecánica para accionar el compresor. La operación del compresor mantiene la baja presión del evaporador y eleva, así mismo, la presión en el condensador.

En el sistema de absorción se utiliza la energía calorífica, para elevar la presión del refrigerante. La baja presión del evaporador se mantiene, mediante el uso de otra sustancia llamada absorbente. La mezcla es llevada a la zona de alta presión, y la separación absorbente-refrigerante se produce mediante la aportación de calor. Dos componentes, el absorbedor y el generador, crean una función semejante a la del compresor.

Además de las ventajas económicas asociadas a la relación del consumo eléctrico, esta tecnología también presenta ventajas medioambientales ya que es accionado por energía térmica en lugar de eléctrica, pudiendo aprovechar por tanto, calor residual de otros procesos e incluso energía solar.

Si el calor que acciona la máquina de absorción proviene de la conversión térmica de la energía solar, entonces la emisión de dióxido de carbono se reduce notablemente ya que la energía solar nos ahorraría la emisión del CO₂ que genera la combustión.

Esta solución por tanto, es óptima desde el punto de vista ambiental, ya que se evita la destrucción del ozono y se reduce el efecto invernadero así como desde el punto de vista económico, por la reducción de consumo eléctrico.

1.3 Ciclo de refrigeración por absorción

La refrigeración es el proceso por el cual se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja con el fin de enfriar alimentos, conservar determinadas sustancias o conseguir un ambiente agradable. La refrigeración implica transferir la energía del cuerpo que pretendemos enfriar a otro, aprovechando sus propiedades termodinámicas. La temperatura es el reflejo de la cantidad o nivel de energía que posee el cuerpo, ya que el frío propiamente dicho no existe, los cuerpos solo tienen más o menos energía térmica.

La característica sobresaliente de un sistema de refrigeración que opera bajo el ciclo de absorción, es que la energía necesaria para mantener el proceso de enfriamiento se suministra principalmente en forma de calor.

Dicho sistema es llamado así porque es un ciclo en el cual se realizan procesos físicos y químicos resultado de la afinidad que tienen algunos líquidos para absorber ciertos gases. En este proceso de absorción, se genera una mezcla binaria que está compuesta por un refrigerante y un absorbente, en donde el absorbente transporta el fluido refrigerante en estado líquido desde una zona de baja presión hasta una de alta, lográndose una compresión térmica en la zona de alta presión una vez que el refrigerante cambia de fase a vapor esto mediante el aporte de energía térmica.

Estos sistemas tienen un gran atractivo económico cuando se tiene una fuente de energía térmica barata a una temperatura de 100 a 200 °C. Algunos ejemplos de fuentes de energía térmica barata incluyen la energía geotérmica, la solar, el calor residual de centrales de cogeneración o de vapor de proceso, e incluso el gas natural cuando está disponible a un precio relativamente bajo.

Los dispositivos que utilizan los ciclos de climatización por absorción consisten en un conjunto formado por varios equipos, de los cuales tienen mayor importancia el captador solar y la máquina de absorción. La función del captador solar es suministrar un fluido, a una temperatura determinada para que el sistema comience a operar; y la máquina de absorción realice el acondicionamiento de aire para los parámetros de temperatura y humedad de confort.

Para comprender los principios básicos que implica la refrigeración por absorción, se examina el sistema que se muestra en la Figura 9.

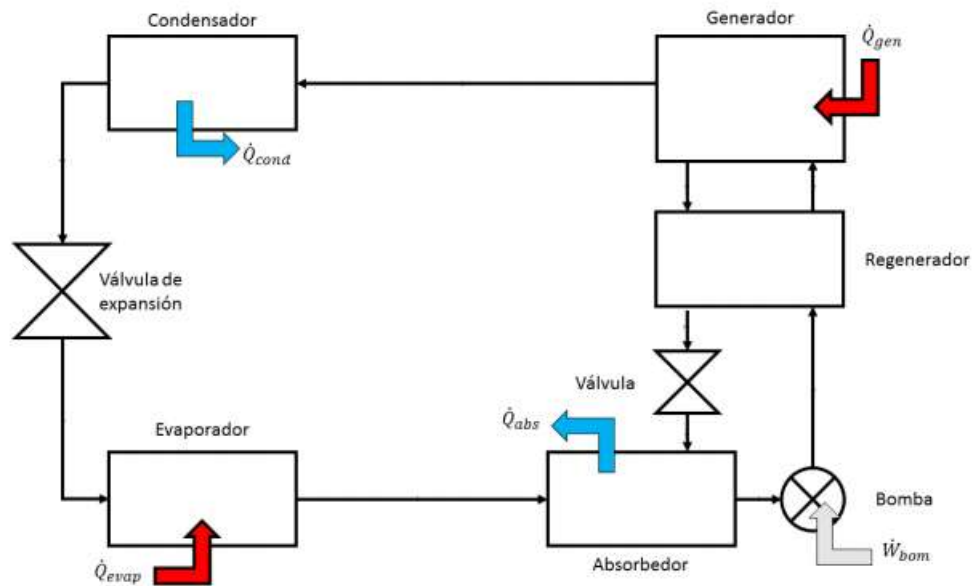


Figura 9. Diagrama esquemático del ciclo de absorción

Se puede observar inmediatamente de la Figura 9 que este sistema es muy similar al sistema por compresión de vapor, excepto que el compresor se ha sustituido por un complicado mecanismo de absorción compuesto por un absorbedor, una bomba, un generador, un intercambiador de calor y una válvula de expansión.

En este sistema, partiendo del generador o hervidor, sale el refrigerante idealmente puro como vapor saturado a alta presión y temperatura; este en el condensador, cede el calor Q_{Cond} al ambiente, pasando al estado aproximado de líquido saturado a alta temperatura; sufre una estrangulación en la válvula de expansión, pasando al estado de vapor húmedo de título pequeño a baja presión y temperatura; el refrigerante entra entonces al evaporador, del que sale tras recibir el calor Q_{Evap} , en el estado de vapor saturado o ligeramente sobrecalentado, siempre a baja presión y temperatura; este vapor saturado es aspirado por el absorbente en el absorbedor, del que se evacúa al ambiente el calor Q_{Abs} ; la llamada solución rica, o sea la mezcla binaria así formada con alta concentración de refrigerante, aún a baja presión, es bombeada al generador; pero antes de llegar al generador, la solución pasa por un intercambiador de calor donde entra en contacto (indirecto) con la solución

concentrada que proviene del generador y se dirige al absorbedor, disminuyendo la temperatura de ésta, y aumentado la suya; con esto se consigue disminuir las necesidades de refrigeración del absorbedor y también disminuye el aporte energético necesario Q_{Gen} aportado en el generador.

Como puede verse existen dos circuitos de fluidos:

- Uno exterior, recorrido solamente por el refrigerante (idealmente), que no se diferencia del circuito análogo de un ciclo de compresión mecánica de vapor.
- Otro interno, por el que circula la mezcla binaria con dos concentraciones distintas, y que está constituido por el conjunto absorbedor-bomba-intercambiador de calor-hervidor-válvula-absorbedor; de éste no conviene que salga el absorbente.

Entre los equipos de climatización basados en ciclos de absorción más utilizados se encuentran aquellos que la mezcla de trabajo es amoníaco-agua, donde el amoníaco (NH_3) sirve como el refrigerante y el agua (H_2O) es el medio de transporte. Otros sistemas de refrigeración por absorción son los de agua-bromuro de litio y el de agua-cloruro de litio, en los que el agua sirve como refrigerante. Los últimos dos sistemas están limitados a aplicaciones como el acondicionamiento de aire, en las que la temperatura mínima queda por arriba del punto de congelación del agua.

En la Tabla 2 se resumen las principales características requeridas para considerar adecuado un fluido de trabajo para equipos de refrigeración por absorción. Otras consideraciones que se debe tener en cuenta son: los fluidos deben ser física y químicamente compatibles, tener un bajo coste y una alta disponibilidad, no deben ser perjudiciales para el ser humano y el medioambiente y deben disponer de propiedades termodinámicas para intervalos concretos dependiendo del tipo de ciclo que se estudie.

Tabla 2. Requerimientos de los componentes de un fluido de trabajo para equipos de refrigeración por absorción

Refrigerante	Absorbente	Solución
Alto calor de vaporización y calor latente	Baja viscosidad	Bajo calor específico y viscosidad

Baja viscosidad	Alta solubilidad con el refrigerante	Alta conductividad térmica
Estabilidad química y térmica		Gran diferencia en el punto de ebullición entre ambos
Seguro con el medioambiente		
No toxico ni inflamable		

Los rendimientos habituales de estos sistemas son del orden de 0,7 que puede incrementarse al 1,35 si el sistema presenta alguna modificación para elevar su eficiencia.

Existen diversas modificaciones que representan cambios para mejorar algunos de los inconvenientes del sistema básico de absorción, así se tienen:

- **Sistema multiefecto** (doble o triple). La única limitación radica en que la fuente necesaria para hacer funcionar el sistema debe ser superior a 120° C.
- **Ciclo absorción por difusión:** denominado también sistema Electro–lux. Su principal modificación radica en la incorporación de un gas inerte (como puede ser el hidrógeno) de forma que mantenga la presión constante en todo el circuito. Así las zonas que en el sistema siempre eran de alta y baja presión, se mantienen constantes en este sistema.
- **Generador termoquímico o Triple estado.** El sistema funciona en condiciones de vacío con un par LiBr/H₂O. Este dispone de dos sistemas paralelos que operan intermitentemente entre etapas de carga y descarga. A diferencia de otros sistemas, en la desorción el sistema se acerca a la saturación y llegando a la formación de cristales sólidos que hacen que el sistema almacene energía a través del proceso. A diferencia de la mayoría de los sistemas, que evitan la cristalización, el sistema TCA (generador termoquímico) lo utiliza. Este sistema presenta, de esta forma, una mayor densidad energética, así como una mayor transferencia de calor y masa en los procesos.
- **Ciclo de absorción abierto:** la mayor diferencia de este sistema radica en que no hay un condensador. La solución débil se reconcentra en un proceso de evaporación en un captador solar. La solución concentrada se calienta hasta evaporar el agua, entonces la presión de vapor del refrigerante y la concentración del absorbente

aumenta. Un inconveniente es que el refrigerante del sistema debe poder liberarse al medioambiente, dado que al evaporarse se libera al aire.

- **Ciclos intermitentes.** El principio de estos ciclos radica en los tradicionales de absorción, aunque en estos el captador solar se utiliza como generador y no hay bomba. Hay dos procesos principales, el de generación y el de refrigeración.

Estas variantes afectarían positivamente el desempeño del ciclo, sin embargo la implementación de estas variantes estará condicionada a la obtención de una fuente de energía térmica gratuita y a la inversión económica inicial, pues dichos sistemas requerirán de dispositivos de reaprovechamiento más complejos y consecuentemente más costosos.

Como se mencionó anteriormente, los equipos de absorción son preferibles cuando se dispone de calor de cogeneración, residual o una fuente de combustible económica, por esta razón el sistema de absorción obedecerá su aplicación siempre y cuando se disponga de una fuente de calor gratis, de bajo costo o donde el precio de la energía eléctrica genere altos costos de producción. Es por ello que no es factible que la refrigeración por absorción desplace a gran escala a los sistemas de refrigeración convencionales, si no bien se manejen como sistemas de refrigeración híbridos o alternativos, los cuales funcionen en aplicaciones en las que sean considerados como una mejor opción desde el punto de vista medioambiental y económico.

CAPÍTULO II: Propuesta de diseño del sistema de aire acondicionado con el uso de energía solar térmica.

Los sistemas de climatización se diseñan para mantener el ambiente interior de un local a una temperatura adecuada e inferior a la temperatura ambiente. Los parámetros de diseño del acondicionamiento de aire para el local donde se desea instalar el equipo son:

- Temperatura en el interior del local de 24 °C
- Humedad relativa de 55%

Para mantener dichos parámetros de diseño se hace necesaria la extracción de calor generado por las diferentes fuentes térmicas mediante el suministro o recirculación de un caudal de aire. El aire es previamente tratado bajo condiciones específicas, de tal forma, que absorba las ganancias de calor sensible y latente del espacio climatizado.

2.1- Caracterización técnica del equipo propuesto.

Para la selección del sistema de climatización escogido se ha basado en dos aspectos fundamentales: la facilidad de construcción de un prototipo con las posibilidades actuales; y la relación costo rendimiento de los diferentes ciclos haciendo uso de la energía solar.

El equipo presenta una capacidad frigorífica nominal de 3,5 kW, este opera según el ciclo de refrigeración por absorción debido a las posibilidades de trabajo con las que se cuenta, tanto en la producción del dispositivo como las condiciones de operación del mismo, siendo esta una forma sencilla de producir un vapor a alta presión a partir de un vapor saturado a baja presión sin emplear un compresor mecánico (con lo cual obviamente se evitan los problemas del alto consumo energético de trabajo mecánico y electricidad).

El fluido que se propone para el ciclo de refrigeración por absorción, es una solución de agua y amoníaco (NH_3), siendo el amoníaco el refrigerante y el agua el absorbente. El ciclo aprovecha la gran afinidad del amoníaco con el agua, utilizado aquel como agente frigorífico dado que es fácilmente absorbido por esta. Se utilizó una carga total de 27 litros, siendo el 40% de amoníaco y el 60% agua.

Se optó por el amoníaco como refrigerante debido a sus propiedades y disponibilidad en la región. Por sus propiedades físicas posee una transferencia de calor superior a la de los refrigerantes fluorados más utilizados. Su capacidad de refrigeración es de cuatro a cinco veces mayor que la del R12 y el R22, cuyas capacidades de transferencia de calor se ven afectadas en la práctica al mezclarse con el aceite o alguna otra sustancia. Además, las tuberías utilizadas en el diseño de este equipo son de acero al carbono, siendo menos costosas ya que este refrigerante tiene una viscosidad inferior a la del R12 y R22, lo que implica un menor flujo másico.

Se supone que el ciclo de absorción opera únicamente en dos niveles de presión, el lado de alta presión está formado por el generador y el condensador, mientras que el lado de baja presión está formado por el absorbedor y el evaporador. El nivel de alta presión corresponde a la presión de líquido saturado a la temperatura de operación del condensador, mientras que el nivel de baja presión corresponde al valor de la presión de vapor saturado a la temperatura de operación del evaporador.

2.2- Descripción del ciclo de trabajo

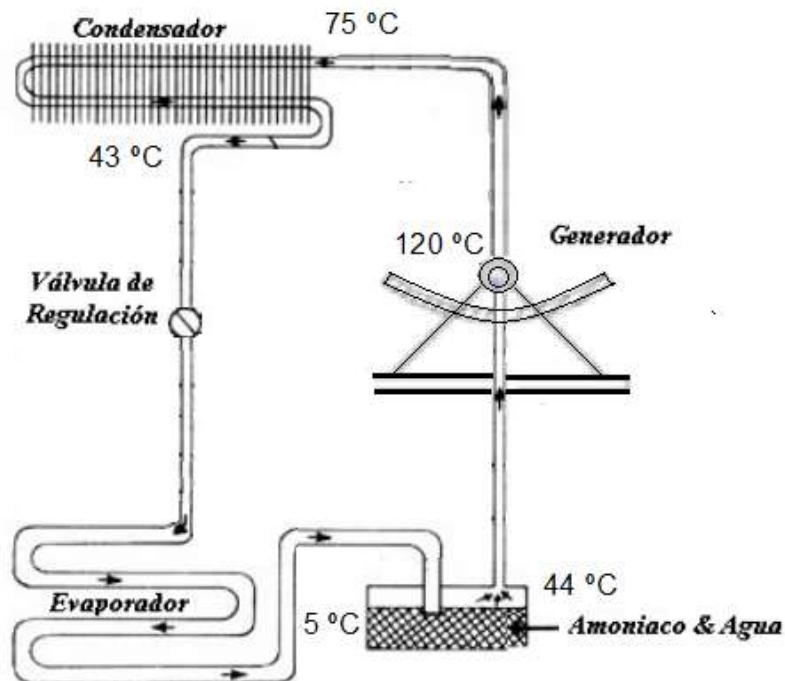


Figura 10. Sistema de absorción.

Empezando el análisis del ciclo en el generador (colector cilindro parabólico), en él la solución de agua y amoníaco se calienta en su interior por la aportación de calor en el colector solar, hasta alcanzar una temperatura del orden de 120 °C a la que por ebullición se separa, por un lado, vapor con una elevada concentración de amoníaco (denominada solución concentrada o fuerte) y por otra una solución líquida con baja concentración de amoníaco, llamada solución diluida o pobre.

El vapor de amoníaco, entra en el condensador como vapor saturado a una presión de unos 19 bar. El condensador lo forma una batería de tubos aleteados por cuyo interior circula el amoníaco y por su cara externa el aire de la atmósfera exterior. El flujo de aire enfría el amoníaco hasta condensarlo. A continuación, la presión del amoníaco líquido es reducida a unos 4 bar por la válvula de expansión, luego entra en el evaporador debido a la diferencia de presión, en este se evapora a 5°C obteniendo el calor latente de vaporización del ambiente que se desea climatizar.

A la salida del evaporador, el vapor de amoníaco entra en el absorbedor al que llega también la solución acuosa (diluida o pobre) procedente del generador. A lo largo del recorrido por el interior del absorbedor, el amoníaco es íntegramente absorbido por el agua a una temperatura de 44 °C, para luego volver finalmente al generador donde el ciclo empieza nuevamente.

2.3- Diseño mecánico

2.3.1- Cálculo del evaporador:

El evaporador es el elemento productor de frío de la instalación frigorífica. Los evaporadores son intercambiadores térmicos que aseguran la transmisión del calor del medio que se enfría hacia el fluido refrigerante; este flujo calorífico tiene por finalidad la evaporación del fluido refrigerante líquido contenido en el interior del evaporador. La configuración del mismo se considerará de tipo tubos y aletas, construido de acero al carbono ASTM A-106, con las siguientes especificaciones:

- Diámetro exterior ($d_e=10,287$ mm)

- Diámetro interior ($d_i=6,83$ mm)
- Aletas: acero al carbono
- Separación de aletas: 2 a 10 mm
- Espesor de aletas: aproximadamente 0,2 mm.

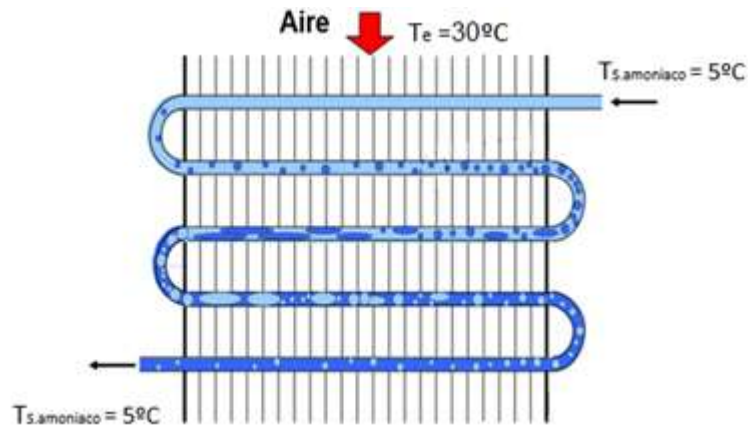


Figura 11. Esquema del evaporador.

Cálculo de la temperatura media logarítmica: Es la diferencia de temperaturas promedio entre dos fluidos en un intercambiador de calor en ambos extremos (entrada y salida) como se muestra en la figura 12.

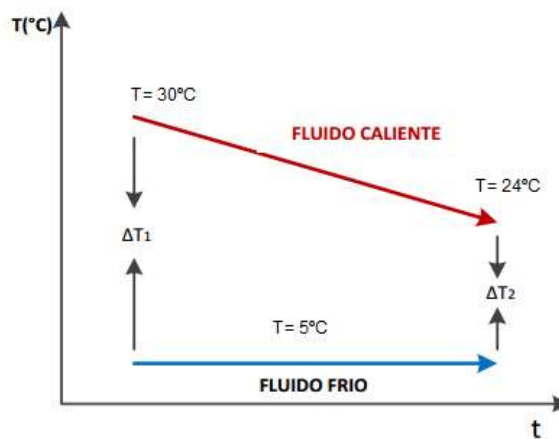


Figura 12. Diferencia de temperatura entre el flujo frío y caliente en el evaporador

De la figura 12 se deduce la siguiente ecuación.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Donde:

- ΔT_m : Temperatura media logarítmica
- ΔT_1 : Variación de la temperatura del flujo caliente
- ΔT_2 : Variación de la temperatura del flujo frío

Reemplazando datos se tiene:

$$\Delta T_m = 15,95^\circ\text{C}$$

Para determinar las propiedades del fluido con la variación de temperatura, las propiedades se evalúan a la temperatura de película, definida como el promedio de la temperatura de la superficie en contacto y la temperatura del flujo libre. La temperatura del flujo libre es de 30°C (temperatura ambiente) y la temperatura de la superficie en contacto es de 7°C , estos valores de temperatura se establecen tomando como referencia la temperatura ambiente y tomando en cuenta que después del contacto con la cámara existe una variación de temperatura en el medio, con estos datos y utilizando la ecuación que se plantea seguidamente se tiene que la temperatura de película es:

$$\Delta T = \frac{T_{amb} + \Delta T_{superficie}}{2}$$

$$\Delta T = 18,5^\circ\text{C}$$

Donde:

- T_{amb} : Temperatura ambiente
- $T_{superficie}$: Temperatura de la superficie en contacto

Posteriormente se realizó los cálculos pertinentes para al diseño del evaporador utilizando las ecuaciones necesarias a partir de las propiedades de los fluidos que circulan en él.

El coeficiente Global de transferencia de calor se calcula según la ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}\right)}$$

Donde h_1 está dada por:

$$h_1 = 0,22R_e^{0,6} \cdot \frac{k}{d_i}$$

$$h_1 = 278,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

h_2 es obtenido utilizando la gráfica que aparece representada en el Anexo A-1.

$$h_2 = 12500 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Por tanto, el coeficiente Global de transferencia de calor al sustituir en su ecuación es:

$$U = 272,3 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Para el cálculo de la superficie de intercambio de calor se utiliza la fórmula:

$$A_{total} = \frac{Q}{U\Delta T_m}$$

Partiendo del cálculo del área total se puede determinar posteriormente el número total de tubos:

$$A_t = n_t \frac{\pi d_i^2}{4}$$

La longitud para cada tubo del evaporador, considerando 1 paso por tubo se calcula por la fórmula:

$$l = \frac{A_{total}}{P_p n_t \pi d_e}$$

Finalmente, en la Tabla 3 se detallan las características del evaporador en base a los cálculos realizados.

Tabla 3. Resumen de las principales características mecánicas del evaporador

Evaporador	
Diámetro nominal de los tubos	10,287 mm
Área total	2,51 m ²
Longitud total del serpentín	7 900 mm
N _t	24
Configuración	Tubos y aletas
Material de los tubos	Ac al carbono ASTM A-106

2.3.2- Diseño del condensador.

El condensador es el encargado de enfriar el vapor de amoníaco que sale del generador utilizando el medio ambiente para rechazar calor y cambiar de estado de fase al amoníaco (vapor a líquido). El diseño del condensador será de tubos y aletas utilizando una tubería de acero al carbono ASTM A-106, este presenta además las características siguientes:

- Diámetro exterior ($d_e=10,287$ mm)
- Diámetro interior ($d_i=6,83$ mm)
- Aletas: acero al carbono
- Separación de aletas: 2 a 10 mm
- Espesor de aletas: aproximadamente 0,2 mm.

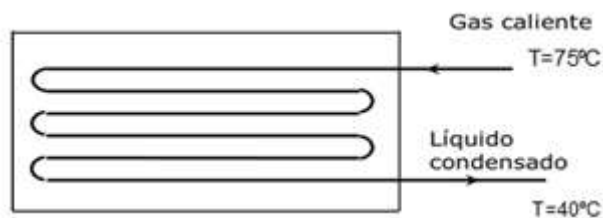


Figura 13. Esquema del condensador

Cálculo de la temperatura media logarítmica: Es la diferencia de temperaturas promedio entre dos fluidos en un intercambiador de calor en ambos extremos (entrada y salida), como se muestra en figura 14.

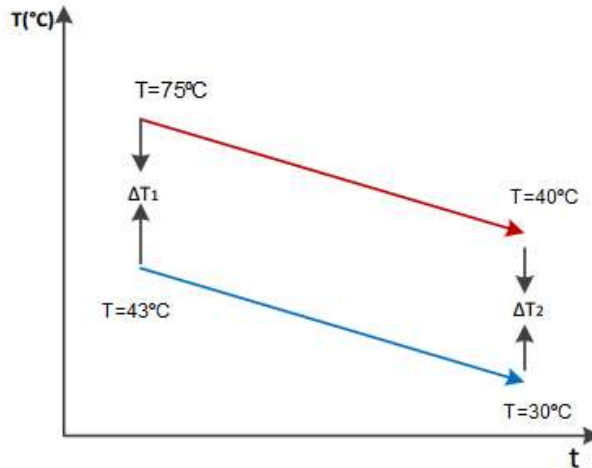


Figura 14. Diagrama de temperatura para el flujo a contra corriente del condensador

De la figura 14 se deduce la siguiente ecuación.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Reemplazando datos se tiene:

$$\Delta T_m = 45,96^\circ\text{C}$$

Luego se determina la temperatura de película, la cual sirve para determinar las propiedades del fluido con la variación de temperatura, tomando como referencia la temperatura ambiente se tiene que la temperatura del flujo libre es de 30°C (temperatura ambiente) y la temperatura de la superficie en contacto es de 35°C, como resultado se tiene que la temperatura de película es:

$$\Delta T = \frac{T_{amb} + \Delta T_{superficie}}{2}$$

$$\Delta T = 32,5^{\circ}\text{C}$$

Posteriormente se determinaron las propiedades de los fluidos que interactúan en el condensador a partir de sus temperaturas, posibilitando la realización de los cálculos necesarios para el diseño del mismo.

Las ecuaciones presentadas son recomendadas para la condensación en tubos horizontales, siendo el método de la temperatura media logarítmica empleado para determinar el área de transferencia de calor de los tubos, mientras que los factores de conductividad térmica y demás se obtuvieron de tablas [López Toscano y C. Meza Salcedo, 1 997].

El coeficiente Global de transferencia de calor se calcula según la ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}\right)}$$

Donde h_1 se calcula por:

$$h_1 = \frac{k}{d_i} C (G_r P_r)_f \left(\frac{P_{r_f}}{P_{r_c}}\right)^{0,25}$$

Para tubos horizontales:

$$C=0,50$$

$$n=0,25$$

$$h_1 = 2249 \cdot 10^6 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

h_2 es calculado por la expresión:

$$h_2 = 0,725 \cdot \left[\frac{\rho^2 g h_{f_h} k_f^3}{\mu d N (T_{sat} - T_e)} \right]^{1/4}$$

$$h_2 = 29581,14 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Sustituyendo en la ecuación para determinar el coeficiente Global de transferencia de calor se obtiene como resultado:

$$U = 2958,13 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Para el cálculo de la superficie de intercambio de calor, longitud total y número de tubos en el condensador se utiliza la misma metodología de cálculo anteriormente propuesto en el diseño del evaporador.

En la Tabla 4 se detalla las características del condensador en base a los cálculos realizados.

Tabla 4. Resumen de las principales características del condensador

Condensador	
Diámetro nominal de los tubos	10,287 mm
Área total	1,5 m ²
Longitud total del serpentín	4700 mm
N _t	12
Configuración	Tubos y aletas
Material de los tubos	Ac al carbono ASTM A-106

2.3.3- Diseño del Generador.

El generador es el elemento del sistema donde la solución concentrada que proviene del absorbedor será calentada para que al hervir libere el refrigerante en forma de vapor que alimenta al condensador. Para esto se toma un colector solar del tipo cilíndrico parabólico con el fin de aportar energía en forma de calor al par refrigerante.

Para el diseño del canal parabólico, se cuenta con una plancha de aluminio cuyas dimensiones son de 2 x 1,2 metros. Se toma el lado de 1,20 m como lado curvo de parábola puesto que estructuralmente es más sencillo un soporte para una abertura menor. Para poder saber el tamaño del lado recto, se procede a realizar una serie de cálculos en función de diferentes distancias focales.

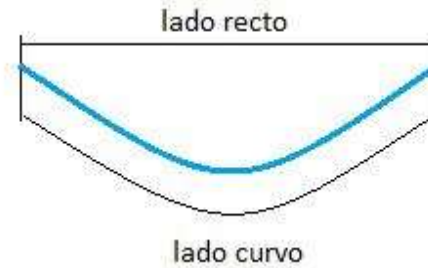


Figura 15. Perfil de la superficie captadora

Para calcular la abertura, es decir, el lado recto “Lr”, se utiliza la fórmula del arco de una curva, por la cual se puede conocer la longitud de ésta.

$$s = \int_b^a \sqrt{1 + f'(x)} dx$$

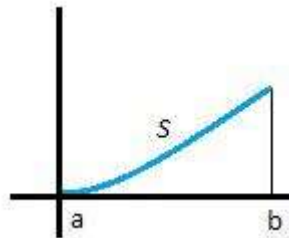


Figura 16. Gráfica de la longitud de la curva

La longitud de la curva es conocida y es igual a $S=0,60$ metros. $f'(x)$ es la derivada primera de la ecuación de la parábola. El límite $a=0$ y el límite b es desconocido. Por tanto, operando, sustituyendo y despejando b se obtiene el valor de la semiabertura, o de lo que es lo mismo, de X_{max} .

Este valor depende del foco F que se escoja, pues $f(X)=y=\frac{x^2}{4 \cdot F}$

A partir de los cálculos realizados se determinó que la parábola definitiva tiene las dimensiones siguientes: Foco= 0,30 m, lado curvo=1,2 m y lado recto= 0,78 m.

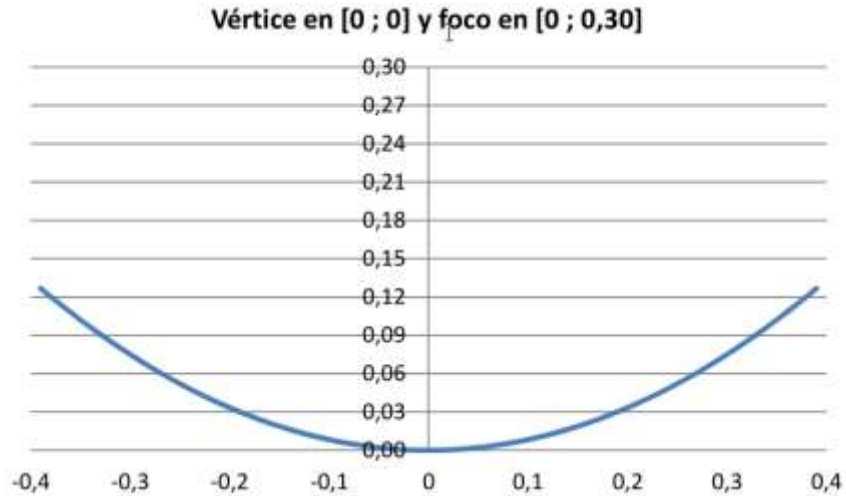


Figura 17. Gráfica del Perfil del canal parabólico.

El receptor está compuesto por un tubo de acero AISI 347. El valor del diámetro mínimo que tiene que tener el tubo receptor depende principalmente de la distancia focal a través del valor de ρ (siendo $\rho = 0,425$ m), así para un foco situado a 30 cm sobre el vértice del colector,

utilizando la ecuación
$$\phi_{\min} = \frac{2 \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} 16'}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$
 siendo $\alpha = 113^\circ$ el diámetro mínimo obtenido va a ser

$$\phi_{\min} = 13,8 \text{ cm} .$$

La longitud del tubo receptor se calcula por la ecuación $Q = \varepsilon_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot \pi \cdot d \cdot l$, teniendo la emisividad un valor de 0,8 se obtiene como resultado $l = 1,8 \text{ m}$.

A forma de aislante, se recubre al tubo por la parte superior de una capa de fibra de vidrio, cuya conductividad térmica es de $k_{f.\text{vidrio}} = 0,036$ W/mK. A su vez la parte inferior se deja el tubo descubierto para proporcionar la entrada de luz solar.

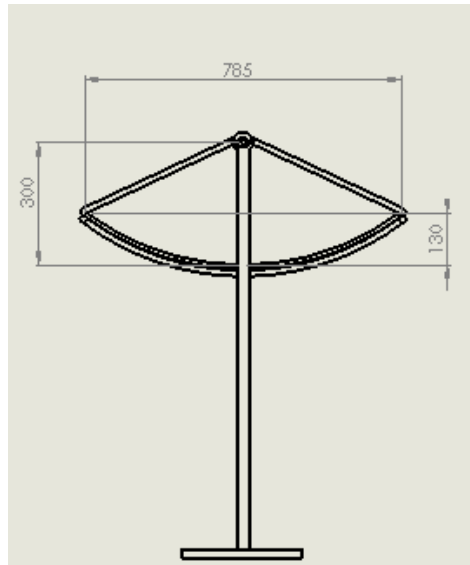


Figura 18. Vista de las dimensiones laterales del cilindro parabólico.

2.3.3- Diseño del absorbedor

El absorbedor es el lugar donde el vapor generado en el evaporador es absorbido por el absorbente (agua) y parte que retorna del generador en solución acuosa. Para realizar el diseño se considera el absorbedor como un tanque tipo cilindro, el mismo que debe tener la capacidad de almacenar toda la solución del sistema.

Para determinar el volumen que se encuentra en los componentes del sistema, se utilizan los diámetros interiores y las longitudes de cada tubería utilizadas en el sistema de refrigeración.

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

Los volúmenes parciales se muestran a continuación:

- Volumen del evaporador ($V_{\text{evp}}=0,000289\text{m}^3$)
- Volumen del condensador ($V_{\text{con}}=0,000172\text{m}^3$)
- Volumen del generador ($V_{\text{gen}}=0,0269\text{m}^3$)

Realizando la sumatoria de los volúmenes parciales obtenidos se obtiene el volumen total del sistema.

$$V_T = V_{evp} + V_{con} + V_{gen}$$

$$V_T = 0,027m^3$$

La solución agua – amoniaco debe ocupar el 50% del volumen total en el absorbedor (Vera, 2 005), para garantizar que el vapor de amoniaco que sale del evaporador y la solución débil que sale del generador sean absorbidos por la solución agua – amoniaco que se encuentra en el absorbedor, obteniendo finalmente el volumen que se requiere para determinar las dimensiones del tanque absorbedor.

$$V_{Tab} = 0,054m^3$$

Con el volumen total en el absorbedor se calcula la longitud del tanque, asumiendo que se utilizara una tubería de acero al carbono ASTM A-106 con diámetro exterior de 300 mm y diámetro interior de 296 mm, para que exista el área suficiente para que pueda realizar la absorción del vapor de amoniaco y de la solución débil (Kajano & Lucas, 2 012). Con estos datos se determina la longitud del tanque tipo cilindro que se requiere para el absorbedor (ver figura 19). En la Tabla 5 se muestra las características del absorbedor en base a los cálculos realizados.

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

$$L = 0,78m$$

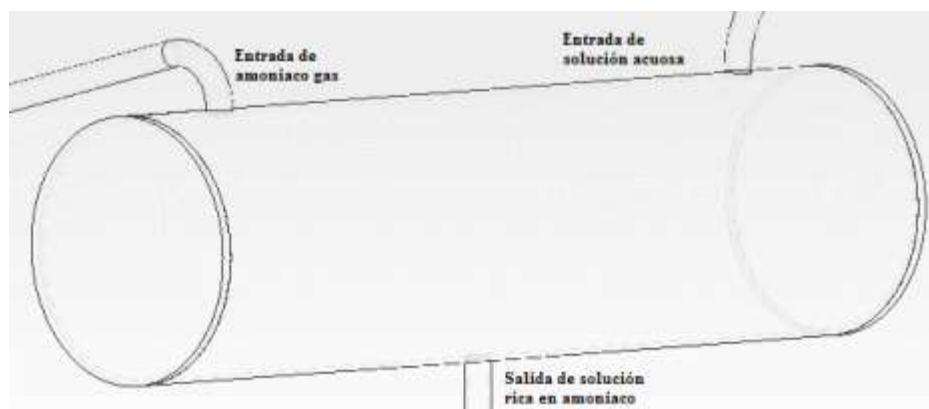


Figura 19: Esquema del absorbedor

Tabla 5. Características de absorbedor

Absorbedor	
Longitud	0,78m
Diámetro interior	296mm
Diámetro exterior	300 mm
Material	Ac al carbono ASTM A-106

2.4- Análisis del panel fotovoltaico

Teniendo en cuenta que la radiación media anual en Cuba tiene un valor promedio de 5 kWh/m² se procede a calcular su Energía real utilizando la eficiencia del panel fotovoltaico y el área respectiva.

- Radiación solar promedio 5 kWh/m²
- Área del panel 0.598 m²
- Eficiencia de conversión de energía del panel η :15%

$$E_{real} = \eta * A_{panel} * G$$

$$E_{real} = 0,44 kWh$$

Con este resultado se establece que el panel fotovoltaico sirve como fuente de energía al ventilador del evaporador ya que este necesita 0,072 kWh para su funcionamiento.

2.5- Descripción final del equipo

Basados en los cálculos de diseño utilizados, se propone la construcción del equipo de climatización que opera según un ciclo simple de absorción condensado por aire. Este aprovecha la energía solar para reducir así los consumos de energía primaria. Para ello se han instalado un colector solar del tipo cilíndrico parabólico cuyas dimensiones alcanzan los 2,16 m², este es situado en la parte superior del local donde va a ser instalado el equipo con el fin de alcanzar la temperatura de generación adecuada para la separación del absorbente

Capítulo II: Alternativa energética de la climatización por absorción

y el refrigerante. La temperatura generada por el colector de acuerdo a su relación de concentración fue establecida entre 90°C y 120°C.

En esta superficie donde está situado el colector solar se encuentra además el panel fotovoltaico encargado de alimentar el ventilador del evaporador para circular aire forzado a través de él. Este tiene un área 0.598 m² logrando suministrar 0,44 kWh de energía.

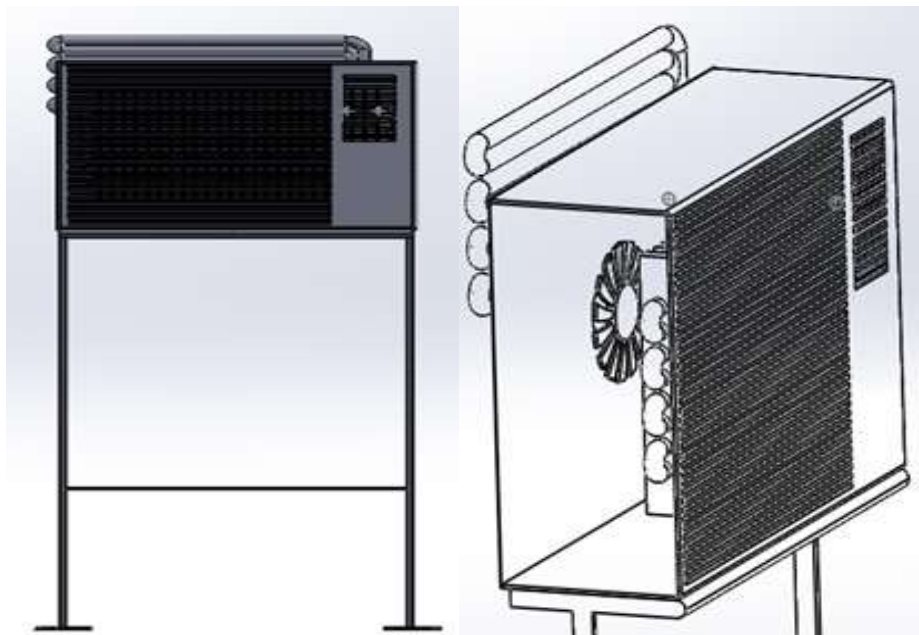


Figura 20. Prototipo de climatización

2.6- Evaluación económica.

Se empleó el método del Valor Presente Neto (V.P.N.) para evaluar la inversión que representa la fabricación del equipo de climatización solar por absorción.

El desarrollo del método se presenta a continuación:

I. Datos iniciales.

Ingresos (I).

Es el valor financiero del ahorro energético logrado con la propuesta.

$I = \text{kW.h ahorrados} * \text{precio del kW.h.}$

Como la inversión se pagará con el presupuesto de la entidad, se utiliza el precio que paga la misma por un kW.h.

$I = 5\ 110 * 0,44.$

$I = 2\ 248$ pesos/año.

Gastos.

La determinación del costo del sistema de refrigeración está comprendida por los gastos de materiales, el salario de los operarios y el consumo de energía eléctrica de los equipos empleadas en el proceso de fabricación.

Tabla 6. Costos de materiales a utilizar para la fabricación de los diferentes elementos.

Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Bridas de sujeción			
Lamina de acero ASTM A-36 de 2.44x1.22mx15.88mm esp.	1	382,35	382,35
Lamina para carcasas			
Lamina de acero ASTM A-36 de 2x1mx4.8mm esp.	1	89,56	89,56
Lamina para tubos entrada/salida de refrigerante			

Capítulo II: Alternativa energética de la climatización por absorción

Lamina de acero ASTM A-36 de 2x1mx0.6mm esp.	1	12,36	12,36
Tuberías de acero			
Metros de tubería de acero al carbono ASTM A-106 de Ø1/4''x 1m de longitud	7	9,71	67,97
Metros de tubería de acero al carbono ASTM A-106 de Ø1/8''x 1m de longitud.	1	8	8
Metros de tubería de acero al carbono ASTM A-106 de Ø1/8''x 2m de longitud	10	16	160
Metros de tubería de acero al carbono ASTM A-106 Ø1/8''x 3m de longitud.	19	24	456
Metros de tubería de acero al carbono ASTM A-106 Ø1/8''x 5m de longitud	1	40	40
Pernos de sujeción			
Pernos M10x35mm	44	0,73	32,18
Pernos M18x50mm	32	3	96
Pernos M22x50mm	12	6	72
Accesorios			
Codos a 90 de acero al carbono de ¼''	15	11,49	172,35
Manómetros de acero inoxidable de 150psi	2	18	36
Termómetros	5	12	60
Cabezal de manómetros	2	50	100
Válvulas de expansión tipo TEA 20-1, 3.5kw	2	225	450
Válvulas de servicio	2	375	750
Refrigerante amoniaco(gaseoso)	50 kg	49,2	49,2
Electrodos E70s-3	8 lbs	0,87	6,96
Empaque para bridas Fibra de aramid/aglutinante de neopreno (3300 1/16''X60''X60'')	1 Lámina	178,64	178,64
Material aislante para tuberías(Rubatex)	3(0.93m)	0,97	2,91
Material aislante para carcasas(Fibra de vidrio)	1.82m ²	3,2	6,4

Capítulo II: Alternativa energética de la climatización por absorción

Visor de refrigerante	1	200,83	200,83
Panel fotovoltaico	1	10 000,00	10 000,00
Sub-Total			3 429,71
Otros (5 % Imprevistos)			171,48
Total			8 601,19

Tabla 7. Gasto de salario en la operación de fabricación.

Concepto	Gastos.			
	Calificación	Tarifa horaria [peso/h]	Tiempo [horas trabajadas]	Costo [peso]
Salario	Jefe de obra	3,23	160	516,80
	Soldador	2,56	120	307,20
	Mecánico	2,63	160	420,80
	Electricista	2,56	120	307,20
	Ayudante	2,46	100	246,00
	Total			1 798,60

Tabla 8. Gasto por concepto de consumo de energía eléctrica.

Concepto	Gastos				
	Consumo [kW.h]	Tiempo [horas]	Consumo [kW.h]	Costo [pesos/kW.h]	Costo [peso]
Equipos					
Torno	14,7	10	147	0,44	64,68
Taladro	5,88	10	58,8	0,44	25,87
Equipo de soldadura	19,2	10	192	0,44	84,48
Sierra	4	10	40	0,44	17,60

Capítulo II: Alternativa energética de la climatización por absorción

Pulidora	3,67	10	36,7	0,44	16,15
Total					208,78

Tabla 9. Resumen de gastos en la fabricación del equipo.

Actividad	Gastos [pesos año]			
	Salario	Energía eléctrica	Materiales	Total general
Fabricación	1 798,60	208,78	8 601,19	10 608,57

La Tasa de descuento (r), Inflación (f), Impuestos sobre las ganancias (t) y el Margen de riesgo se obtuvieron de las regulaciones contenidas en el Sistema Nacional de Finanzas y Precio de Cuba.

En la Tabla 10 se resumen los valores de los datos iniciales obtenidos.

Tabla 10. Valores iniciales para la evaluación del VPN

1	Ingresos (I) [pesos]	2 248
3	Costo inversión (Ko) [pesos]	10 608,57
4	Tasa de descuento (r) %	12
5	Tasa de inflación (f) [%]	5
6	Margen de riesgo [%]	2
7	Tasa de impuesto (t) [%]	0
8	Vida útil estimada [años]	10

II. Calculo del V.P.N.

Depreciación.

$Dep. = \frac{Ko}{Vu}$. Se consideraron diez años de vida útil

$Dep. = 1\ 060,857$ Pesos.

Flujo de caja.

$$F_c = (\text{ingresos} - \text{Dep.}) * (1 - \frac{t}{100}) + \text{Dep.}$$

$$F_c = 2\,248 \text{ Pesos}$$

Tasa de descuento real.

$$R = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)}{\left(1 + \frac{f}{100}\right)} - 1$$

$$R = 0,06.$$

Tasa de descuento real con margen.

$$D = R + \frac{\text{Margen_de_Riesgo}}{100}$$

$$D = 0,08$$

Factor de descuento.

$$F.D = \frac{1}{(1 + D)^{\text{AÑO}}}$$

$$F.D = 0,92$$

Flujo de caja descontado.

$$F_d = F_c * \text{FactorDescuento}$$

$$F_d = 2\,068,16$$

Flujo descontado acumulado.

$$F_{da} = \text{VPN} = F_d + (-\text{CostoInversión}).$$

Factibilidad económica de la inversión.

Aplicando métodos iterativos de cálculo se obtiene el momento, dentro del período de vida útil en que el Valor Presente Neto de la inversión pasa de signo negativo a positivo y representa la fecha en que la inversión se recupera económicamente.

Los resultados se muestran en la tabla del anexo A-4. Como se aprecia en los mismos, la inversión se recuperará a los 6 años de vida útil del equipo.

2.7- Estudio medioambiental

Este tipo de estudio se centra en el ahorro de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que supondría llevar a cabo el presente proyecto. Aunque el análisis económico tiene gran trascendencia en la sociedad actual, siendo casi el 100% del objeto de interés de un proyecto, esta investigación está orientada a concienciar sobre la importancia de volcar más interés en este estudio. El ahorro de emisiones de CO₂ no es tan palpable como el factor económico, pero, es obvio que tiene una trascendencia más importante que la que se le da hoy en día.

2.7.1- Cálculo de emisiones de CO₂

El ahorro de emisiones que supone la instalación se basa en el ahorro en el consumo eléctrico, ya que, por la forma de generarla y transportarla, se produce la creación de esta sustancia y su posterior exposición a la atmósfera. Por ello, este estudio, se ayudará de los datos utilizados en el análisis económico tales como el consumo eléctrico que conllevaría la utilización de un equipo de climatización convencional de esta misma capacidad frigorífica alimentado por la red eléctrica.

Para establecer la cantidad de CO₂ que esta instalación está dejando de verter a la atmósfera es necesario conocer cuánto dióxido de carbono supone la utilización de la red eléctrica como fuente de energía. Se tomó como norma que por cada kWh consumido se emite a la atmósfera 0,364 kg de CO₂ [Landa García, J. (2 003)]. Por tanto para un ahorro de 5 110 kWh de energía eléctrica, cada año se evita la emisión de 1 860 kg de CO₂ a la atmósfera.

CONCLUSIONES

1. La refrigeración por absorción constituye una alternativa para resolver los problemas energéticos en la climatización de locales.
2. La construcción del equipo de climatización por absorción va a tener un costo total de 10 608,57 pesos recuperándose esta inversión a los 6 años de vida útil del equipo.
3. Con la implementación de este dispositivo se ahorran 5 110 kWh de energía eléctrica, evitando así que sea emitido 1 860 kg de CO₂ cada año.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la construcción del equipo y realizar pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

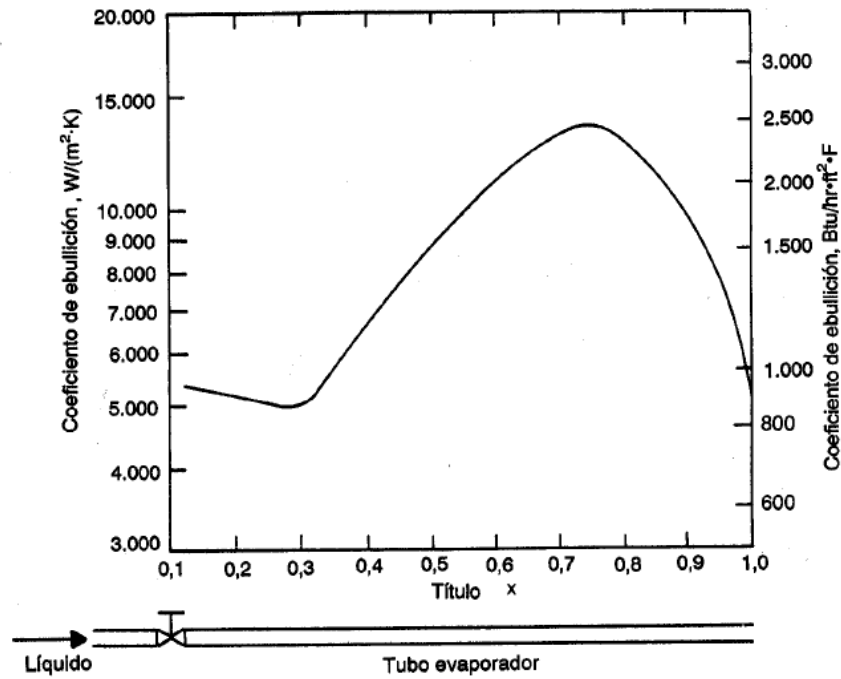
1. García, J.R., Diseño Bioclimático, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1 996.
2. Esquerra P., Climatización de Confort Industrial, Boixareu Editores, España, 1 992.
3. Energy Information Administration (EIA), Organization for Economic Cooperation and Development, OECD, 2 008.
4. Rodríguez M., Introducción a la Arquitectura Bioclimática, Editorial Limusa, México, 2 001.
5. Corgnati, S.P.; Gameiro da Silva, M.C.; Ansaldi, R.; Asadi, E.; Costa, J.J.; Filippi, M.; Kaczmarczyk, J.; Melikov, A.K.; Olesen, B.W.; Popiolek, Z.; Wargocki, P.; "Indoor Climate Quality Assessment", REHVA Guidebook No.14. Finlandia, 2 011.
6. FLAVIN C, LENSSEN N. Nuevas orientaciones de la industria eléctrica. Informe de World Wacth Institute. Cáp. 4. 1 994.
7. Bases para un futuro sostenible. editorial política, 2 010
8. Revista:"Consumer. Economía doméstica", 2 010
9. Colectivo de autores. El estado del mundo. Anuario económico y geo –político mundial. Ministerio de industria básica.
10. Borroto Bermúdez, Aníbal, J. Planificación Energética en Asentamientos rurales. Editorial Guadalajara ,México.1 997
11. Federico Mayor:" Energía para todos". Febrero de 1 997
12. Margarita, Lapidó "Bozal al despilfarro." accesible a juventudrebelde.cu/ 2 006
13. María de los Ángeles "Crisis energética mundial". 2 006
14. Afinidad Eléctrica. 2 007. www.afinidadelectrica.com.ar. Energía y desarrollo económico en América Latina. 2 007
15. BSRIA. Global air conditioning sales, 2 008.
16. OECD/IEA, (2 003)-COOL APPLIANCES Policy Strategies for Energy-Efficient Homes. pag. 44.
17. Antenas.PDF. Antenas con reflectores parabólicos. Español. 05-04 2 004.

18. Barbieri, A., Sodré, U. La Función Cuadrática (parábola). Primera ed. Brasil. Encino Fundamental: Projet Matweb. s.f. pp 25 – 30.
19. PRADO, C. 2 008. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada. Tesis Bachiller en Ing. Elec. San José. Univ de Costa Rica, Fac. Ing. 111 p.
20. MORIS ARROES. 2 011. Instalaciones y proyectos de paneles solares. Asturias. España.
21. Moreno Coronado, Tanya. (2 013) Entre crisis y acciones. Recomendaciones al sector energético cubano. Hugo Ventura, Víctor y Fariñas Wong, Ernesto. Energía y tú No. 63, 2 013.
22. KALOGIROU, S., Solar thermal collectors and applications, Progress in energy and combustion science, Vol. 30, pp. 231-295, 2 004.
23. UPME. (2 007). Caracterización energética de los sectores residencial, comercial y terciario.
24. Guzmán China, Jesús M. (2 007) Control de la combustión y determinación de la eficiencia de la caldera por método práctico. Universidad de Cienfuegos.
25. Massipe Hernández. Juan R. (2 007) Métodos de ensayos del comportamiento térmico del colector solar integral "COMPACSOL" DespaigneWillson, Husseyn y Torres Ten. Revista Tecnología Química No. 1, 2 007
26. "Transferencia de calor" Autor: J.P Holman Editorial McGraw Hill, octava edición, 1 999
27. "Procesos de transferencia de calor" Autor: Donald Q. Kern Editorial Continental, trigésima primera reimpresión, 1 999
28. "Properties of gases and liquids" Autores: Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell Editorial McGraw Hill, quinta edición 2 004
29. El amoniaco como refrigerante Autor: Instituto Internacional del frio Editorial Mundi prensa libre, primera edición 2 000
30. "Principios y sistemas de refrigeración" Autor: Edwar Pita Editorial Limusa, primera edición 1 992.
31. "Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería" Autor: Jorge A. Rodríguez

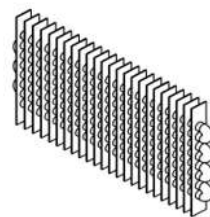
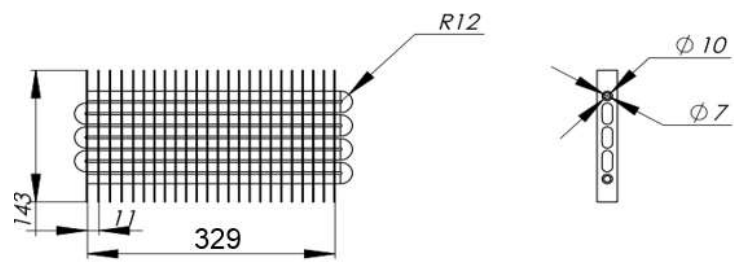
32. Manual de aire acondicionado (Handbook of air conditioning system desing) Autor: Carrier Air Conditioning Company
33. Mecánica de los Fluidos Autor: Víctor L. Streeter McGraw-HILL
34. Manual de refrigeración y aire acondicionado Autor: Miguel Chávez Paz
35. Principios de termodinámica para ingenieros John R. Howell Richard O Buckius McGraw-HILL
36. Principios de refrigeración Roy J. Dossat
37. López Toscano y C. Meza Salcedo, 1 997
38. Landa García, J. (2 003). "Evaluación de un sistema de trasiego de miel de afinación de una refinería de caña de azúcar". Revista Avanzada Científica Vol. 6 No. 2 CIGET Matanzas, 2 003.
39. Kajano, J., & Lucas, D. (2 012). *PART DESCRIPTION*. CANADA: WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.
40. Vera, S. (2 005). Selección del evaporador. En Diseño de un Acondicionador de aire de bajo costo de operación para zonas remotas utilizando al sol como Fuente de Energía. Tesis Ingeniería. Escuela Politecnica del Litoral (pág. 109). Ecuador.

ANEXO

A-1. Coeficiente de transferencia de calor a lo largo de un tubo de un evaporador de expansión directa.



A-2. Vistas del evaporador



A-3. Vistas del colector solar cilíndrico parabólico.



A-4. Resultados de la evaluación económica por el método del Valor Presente Neto

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F.c.		2248	2248	2248	2248	2248	2248	2248	2248	2248	2248
R		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
D		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
FD		0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Inversión	10608,6										
F.d. [\$]		2068,16	2068,2	2068,2	2068,2	2068,2	2068,2	2068,2	2068,16	2068,16	2068,16
VPN	-10608,6	-8540,4	-6472,3	-4404,1	-2335,9	-267,77	1800,4	3868,6	5936,71	8004,87	10073