

FACULTAD  
DE INGENIERÍA

DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

Propuesta de prototipo de aire acondicionado con  
el uso de energía solar térmica.

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN  
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Yoennis Ramón Lores Torres  
Tutor: MSc. Borges Arnaldo Díaz Suárez

## PENSAMIENTO

*“Lo que embellece al desierto es que en alguna parte esconde un pozo de agua”.*

Antoine de Saint-Exupéry

## **DEDICATORIA**

*A mis padres María y Mauricio, por su entera dedicación y comprensión hacia mi persona.*

*Ma, gracias a ti se ha hecho realidad este sueño, eres el sustento de mi vida .A mi padre  
que en pocas palabras ha sabido demostrarme todo su cariño y apoyo.*

*A mi familia, por creer siempre en mí.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios y la Virgen por haberme permitido culminar esta etapa tan importante de mi vida.*

*A mis padres y mi hermana, por el ánimo y la actitud que siempre me han transmitido hacia la vida, y, brindarme todo su talento humano para hacer posible este trabajo.*

*A mi novia por apoyarme y confiar sin duda en mí.*

*A mi tutor, por su talentosa asesoría y su calidad humana.*

*A mis compañeros y amigos por apoyarme, por compartir los momentos más increíbles que he tenido, en fin por estar siempre.*

*A los que de una forma u otra me han alentado en este camino.*

*A todos, GRACIAS*

## RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de la investigación realizada para proponer un prototipo de aire acondicionado que trabaja según el ciclo de refrigeración por absorción, donde la fuente energética es la radiación solar.

En este documento encontrará una amplia revisión bibliográfica del tema, del estado actual de la refrigeración por absorción y la propuesta y diseño de un equipo que garantiza 3,5 kW utilizando un concentrador solar para el calentamiento de la solución amoníaco agua.

También se realiza un análisis técnico económico y medio ambiental que demuestran la factibilidad de proyectos como los aquí propuesto.

## **SUMMARY**

The present work shows the results of the research carried out to propose a prototype of air conditioning that works according to the absorption refrigeration cycle, where the energy source is solar radiation.

In this document, you will find an extensive literature review of the subject, the current state of absorption refrigeration and the proposal and design of a device that guarantees 3.5 kW using a solar concentrator for heating the ammonia water solution.

There is also a technical economic and environmental analysis that demonstrates the feasibility of projects such as those proposed here.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Capítulo I. Fundamentación teórica</b> .....	5
<b>1.1. Necesidad de la climatización. Su impacto energético y medio ambiental.</b> .....	5
<b>1.3. Programa de ahorro de energía en Cuba</b> .....	8
<b>1.4. Impacto medio ambiental</b> .....	10
<b>1.5. La climatización de locales</b> .....	12
<b>1.6. Las Fuentes Renovables de Energía en la climatización</b> .....	16
<b>1.6.1. Energía solar fotovoltaica.</b> .....	19
<b>1.6.2. Energía solar térmica</b> .....	20
<b>1.7. Colectores solares</b> .....	21
<b>1.8. Compresión de vapores</b> .....	24
<b>1.8.1. Efecto Peltier</b> .....	25
<b>1.8.2. Refrigeración por adsorción</b> .....	27
<b>1.8.3. Ciclo de refrigeración por absorción</b> .....	27
<b>1.9 Tecnología de refrigeración por absorción.</b> .....	28
<b>1.9.1 Sistema elegido:</b> .....	30
<b>1.10. Selección del refrigerante</b> .....	31
<b>CAPÍTULO II: Diseño del sistema de aire acondicionado.</b> .....	34
<b>2.1 Cálculo del evaporador:</b> .....	34
<b>2.2 Diseño del condensador.</b> .....	40
<b>2.4 Diseño del Generador.</b> .....	44
<b>2.5 Propuesta del prototipo:</b> .....	50
<b>2.6 Análisis económico, y medioambiental.</b> .....	51
<b>Conclusiones:</b> .....	54
<b>Recomendaciones:</b> .....	55
<b>Referencia Bibliográfica:</b> .....	56
<b>Anexos:</b> .....	58

## INTRODUCCIÓN

La energía no constituye un sector económico, aunque su tratamiento exige estudiar su costo, de una forma u otra la producción de bienes y servicios demandan energía para su funcionamiento, pero también la población demanda energía para satisfacer sus necesidades básicas de confort, entre otras. Por eso la energía se debe visualizar como un trascendental aspecto para el desarrollo sostenible de las actividades humanas. (Turrini, 2006).

La creciente presión de la demanda de energía, el cambio climático como resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI,) así como el aumento de los precios de los combustibles son los principales impulsores de los esfuerzos para incrementar el uso eficiente de la energía y la introducción cada vez más frecuente de diversas fuentes de energía renovable.

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.

Por otra parte, desde los tiempos remotos el hombre ha tenido necesidad de conservar alimentos, materias primas, medicamentos, etc. Además de su necesidad de proporcionarse un clima más confortable así mismo. Es entonces cuando aparece la refrigeración y la climatización.

Estos sistemas energéticos están muy ligados a la vida diaria. La refrigeración está presente en todos los sectores de la económica y la sociedad, desde el sector residencial donde los sistemas de refrigeración doméstica son comunes en la mayoría de los hogares. En el sector comercial, la refrigeración asegura la conservación y congelación de los alimentos. Estos sistemas forman parte del proceso de exhibición y venta en los grandes, medianos y pequeños centros comerciales, en la transportación y distribución de alimentos, tanto terrestre, marítimo como el aéreo, la refrigeración garantiza la congelación y conservación durante la travesía. El almacenamiento de los alimentos se realiza en cámaras refrigeradas, tanto para su congelación, como para la conservación de los mismos.

En la industria de la alta tecnología, como la biotecnología, la farmacéutica, la genética, la electrónica, la informática (hard y software), fabricación de medicamentos, la refrigeración es muy propia del proceso y la climatización asegura la calidad del ambiente interior de los locales. En el Sector de Salud, los hospitales, clínicas y laboratorios no funcionarían sin la climatización. Sin ella no es procedente realizar operaciones en los salones de cirugía, no funcionarían las salas de cuidados intensivos y los departamentos de diagnóstico clínico. En el sector turístico es primordial para garantizar la calidad del servicio hotelero. En los edificios de administración y oficinas, etc.

Pero toda instalación frigorífica o de climatización es altamente consumidora de energía, y en algunos casos representan los mayores consumos, tal como sucede en algunas industrias alimentarias, frigoríficos, edificios de oficinas y hoteles turísticos. 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 ,2017].

El alto costo de la energía por concepto de refrigeración y climatización unido al incremento de las restricciones ambientales y de los gastos en la generación de la energía eléctrica ha contribuido al desarrollo de investigaciones relacionadas con los sistemas de refrigeración que utilizan recursos renovables como fuente de energía motriz.

En las últimas décadas se ha visualizado a las tecnologías de refrigeración solar como una alternativa a los sistemas convencionales de compresión de vapor tan empleados en la refrigeración y acondicionamiento del aire. Esto se debe fundamentalmente al alto consumo de energía asociado a estos sistemas y a los problemas medioambientales causados por los mismos.

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 refrigeración solar.

En Cuba se dispone de una radiación media anual aproximada de 5 kWh/m<sup>2</sup> 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 en el país. [Arrastía, 2002]

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. Sin embargo, en este horario por lo regular es cuando más radiación solar está incidiendo.

Es por ello que la utilización de la energía solar aparece como una alternativa viable para producir frío a partir de sistemas que utilizan el principio de absorción. 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:**

¿Cómo diseñar un sistema de refrigeración por absorción para la climatización de pequeños locales utilizando energía solar térmica?

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

Sistemas de climatización por absorción.

Específicamente dentro del **Campo de acción:**

Equipos de aire acondicionado doméstico con ciclo de refrigeración por absorción.

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

Diseñar un equipo de aire acondicionado utilizando el ciclo de refrigeración por absorción que utilice energía solar térmica.

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 se dispondrá de los datos técnicos necesarios para la construcción de un prototipo que sirva para continuar las investigaciones sobre este tema.

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 económica, energética 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. Necesidad de la climatización. Su impacto energético y medio ambiental.

La climatización es el proceso por el que se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja con el fin, por ejemplo, de enfriar alimentos, conservar determinadas sustancias o conseguir un ambiente agradable. El almacenamiento refrigerado de alimentos perecederos, pieles, productos farmacéuticos y otros se conoce como almacenamiento en frío. La refrigeración evita el crecimiento de bacterias e impide algunas reacciones químicas no deseadas que pueden tener lugar a temperatura ambiente. La refrigeración implica transferir la energía del cuerpo que pretendemos enfriar a otro, aprovechando sus propiedades termodinámicas. [Fernández, 201].

Hoy en día, las necesidades de confort térmico en edificaciones generan un fuerte incremento en el consumo de electricidad, así como el impacto ambiental directo e indirecto que acarrearán los sistemas de acondicionamiento de aire. El crecimiento de la demanda es atribuible al aumento de la temperatura ambiente, mayores expectativas de confort, la percepción que el enfriamiento contribuye a una mayor productividad, y el aumento de las cargas internas de los equipos electrónicos.

Con la continua elevación del nivel de vida en el mundo industrializado, la climatización de edificios se ha convertido en una necesidad, en gran parte de los casos para lograr que sus condiciones de habitabilidad cumplan las exigencias de confort de sus ocupantes y en otros casos, como equipamiento fundamental del edificio para satisfacer la función intrínseca del mismo: fábricas de componentes electrónicos, imprentas, industria química, etc.

En cualquier caso, las instalaciones de climatización constituyen hoy día uno de los equipamientos más importantes de un local por varios motivos:

- En el aspecto de la inversión, por el elevado importe económico de la misma que puede constituir entre un 10 y un 20 % del importe del edificio en instalaciones centralizadas en edificios de nueva construcción.
- En el aspecto de la explotación, por el importe de su consumo energético que probablemente constituya el más importante de los gastos de energía del edificio, mayor que el gasto energético en iluminación y otros consumos eléctricos del edificio.

- En el aspecto del mantenimiento y conservación, por la dedicación que exigen el coste de sus componentes y las necesidades de personal especializado en estas labores.
- En el aspecto funcional, por la elevada incidencia que en la actividad del edificio y de sus usuarios supone la falta de este servicio en un momento dado.

La problemática actual de los sistemas de refrigeración y climatización se desenvuelve en un escenario caracterizado por el previsible incremento de las tasas de ventilación, la repercusión económica del consumo energético y el control de los efectos medioambientales.

La climatización de naves industriales se plantea más como necesidad que como alternativa a unas condiciones óptimas de bienestar de los empleados y de conservación de materias primas y productos.

## **1.2. Impacto energético**

La climatización tiene una repercusión económica en el consumo energético muy elevada, tanto en su instalación como en la explotación, siendo en este último caso el más importante de los gastos energéticos de todo edificio, tanto por el sistema de climatización en sí como por los sistemas que se instalan para mejorar la calidad del aire.

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.

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.

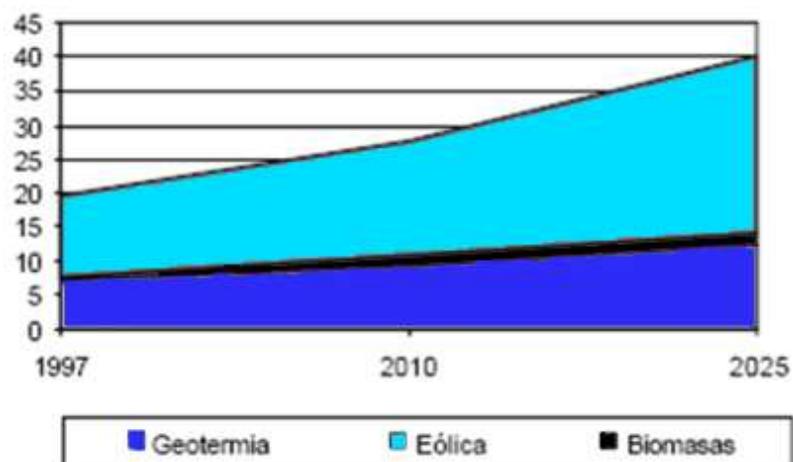
Por otra parte, las proyecciones de la Organización de la Naciones Unidas indican que el porcentaje de población de los países en vías de desarrollo sobre el total mundial pasará del 77% actual al 81%.

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.

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 2025. 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 2020, pasando de 638 TWh de consumo a 1,500 TWh [Vásquez Sánchez. L. J, 2012].

. Las energías renovables por su parte tendrán también un crecimiento importante, como se ve en la Figura 1. Latinoamérica está en estas proyecciones, entre los de menor crecimiento esperado en el uso de energías alternativas.

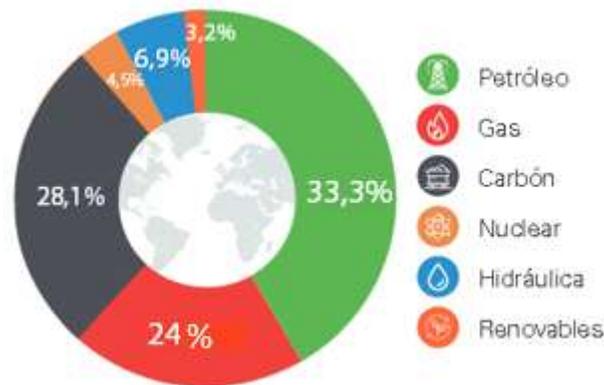


*Figura 1. Generación de electricidad a partir de energías renovables en América Latina entre 1997 y 2025 en TWh (TeraWatts-hora).*

El consumo mundial de energía se estima que aumentará 57% de 2004 a 2030. Entre 1980 y 2004, los líquidos del petróleo, el carbón y el gas natural fueron los energéticos dominantes.

De acuerdo a las proyecciones en 2007 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 2030 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 2004 al 34% en 2030 [Energy Information Administration, 2008].

En la Figura 1.2 se muestra el consumo energético mundial para el año 2016, donde el consumo de petróleo contribuyó con el 33.3%, la utilización de gas natural con el 24%, 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.1.2. Consumo energético mundial en 2016*

### **1.3. Programa de ahorro de energía en Cuba.**

El crecimiento de eficiencia en nuestro país es un objetivo permanente a perseguir en el uso de todas las formas de energía, tanto en su producción como consumo, y es particularmente importante en la utilización de los combustibles importados derivados del petróleo que seguirán estando presente en el balance energético del país y por tanto en nuestras erogaciones de divisas. La compleja situación internacional y el bloqueo que mantiene los

Estados Unidos contra Cuba dificultan el acceso a las fuentes de financiamiento, suministro y tecnología indispensable para lograr una alta eficiencia energética. El país cuenta con una sólida base de conocimientos y experiencias acumulados en el uso racional de la energía, nivel cultural y concientización de la población superior al de otras naciones y una organización social que facilita la educación y la divulgación hacia la práctica de consumo eficiente.

Entre los años 1990 y 1993, como consecuencia del derrumbe del campo socialista y de la crisis económica que comenzó a sufrir el país, se produjo un decrecimiento significativo en la disponibilidad de generación de energía eléctrica, provocando grandes déficit y en consecuencia prolongados apagones, en este período el consumo de energía decreció en un 6 % promedio anual.

A partir de 1993 y hasta 1996 se produce una recuperación en la generación de electricidad la cual registra una tasa de crecimiento promedio anual de 6,6 %, producto de la revitalización de la economía nacional y del aumento del consumo del sector residencial. Se incrementa la disponibilidad de generación con la puesta en marcha de diferentes unidades en plantas termoeléctricas, que se encontraban fuera de servicio con lo cual disminuyen los apagones pero aumenta el consumo de combustible en un 6,2 % promedio anual, lo que significó que en 1996 se consumieron alrededor de 550 000 t (60 usd) más de combustible que en 1993.

Las variaciones de la demanda de electricidad que se producen en las diferentes horas del día, siendo entre las 6 y las 10 de la noche el horario en que se alcanzan los valores de máxima demanda, causado fundamentalmente por el consumo del sector residencial que es en estas horas del día cuando elevan su consumo; la demanda del sector industrial que trabaja en 2 o 3 turnos con su equipamiento productivo y la iluminación necesaria para realizar sus labores; el sector turístico que aumenta su consumo en este horario por la iluminación y la climatización fundamentalmente; las cargas de hospitales, centros de enseñanza, red de servicios en las que predomina la iluminación; el alumbrado público y de protección y las pérdidas en las redes que alcanzan su mayor valor en este horario; conjuntamente con el déficit de disponibilidad de generación en el horario pico, que implicaba un incremento de los apagones sino se ponen en funcionamiento nuevas capacidades generadoras o se reducen los valores pronosticados de la máxima demanda,

así como el incremento en los consumos de combustibles, llevan a la necesidad de implementar una estrategia para cubrir la demanda y eliminar los apagones a lo largo de todo el país.

Dentro de la estrategia elaborada se trazaron tres pautas fundamentales:

- Modernizar las capacidades de generación instaladas.
- Instalar nuevas capacidades de generación.
- Desarrollar un Programa de Ahorro de Energía.

Con el objetivo de:

- Reducir la máxima demanda del sistema y la tasa de crecimiento anual del consumo según los planes que se establezcan.
- Lograr desarrollar hábitos y costumbres en el Uso Racional de la Energía y protección del Medio Ambiente en las nuevas generaciones.
- Desarrollar una base normativa y una política de precios que garanticen una buena eficiencia energética de todos los nuevos equipos eléctricos que se instalen en el país.

#### **1.4. Impacto medio ambiental**

Los impactos ambientales más importantes, producidos por los sistemas frigoríficos utilizados en climatización, son la destrucción del ozono atmosférico y el incremento del efecto invernadero. La capacidad destructora de ozono de un refrigerante se evalúa a través de un parámetro adimensional relativo característico de cada refrigerante, denominado Potencial Destructor del Ozono (PDO), [McLinden, et. al, 2014]. También el Potencial de Efecto Invernadero Directo (PEID) generado por un sistema frigorífico durante la vida del sistema es una característica propia del refrigerante.

Los sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire tienen incidencia directa en los efectos medio ambientales, marcado en dos direcciones principales:

- Como consumidores de energía, fundamentalmente eléctrica generada en grandes centrales industriales a partir de procesos de combustión, contribuyendo al efecto invernadero y al previsible cambio climático global.
- Utilizando refrigerantes clorofluorcarbonados, destructores de la capa de ozono.

El efecto invernadero ocurre de manera natural y consiste en la absorción por determinados gases de la radiación infrarroja que emite la tierra. Esto garantiza las temperaturas necesarias para el desarrollo de la vida, pues sin ellos la temperatura media de la Tierra sería de  $-18^{\circ}\text{C}$  en lugar de  $15^{\circ}\text{C}$ . [ Obra Literaria de Fernández Pizat José Félix]

La acción negativa de la humanidad, ha provocado una ruptura de este equilibrio natural, provocando el incremento de estos gases, que aumentan la absorción con el consecuente incremento de la temperatura media que está teniendo lugar en el planeta.

Los sistemas de absorción de  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  y  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  no producen efecto invernadero directo siendo estos más ecológicos.

Para minimizar el impacto que sobre el efecto invernadero causa la climatización, se propone la aplicación de las siguientes medidas:

- Optimizar la eficiencia en el tratamiento de la energía: Sólo una mejor eficiencia, un mantenimiento regular y unas condiciones óptimas de instalación y uso pueden contribuir de forma perceptible a reducir el efecto invernadero.
- Mejorar la recuperación de fluidos: El efecto directo es muy pequeño, aproximadamente entre el 1 y el 10 % del efecto invernadero total. La industria de productos de refrigeración, con el fin de disminuir el riesgo de emisión de refrigerantes a la atmósfera, se ha comprometido a utilizar equipos de recuperación eficientes manejados por técnicos cualificados.
- Mejorar la estanqueidad de los equipos: Las nuevas tecnologías juntas teóricas, sensores electrónicos, soldaduras, etc. permiten eliminar las conexiones roscadas y las juntas capilares, que son las causas más comunes de fugas. Otro de los principales factores de reducción de riesgos es el ensamblaje de los equipos en la fábrica en lugar de en la obra.

Por otra parte, los refrigerantes CFC y HCFC provocan un daño considerable en la capa de ozono, que constituye un filtro natural a las radiaciones ultravioletas (UV) que llegan a la Tierra procedentes del Sol.

La exposición a radiación ultravioleta UVB provoca inmunosupresión en las personas independientemente del color de la piel, cataratas, además provoca cambios en la composición química de varias especies de plantas, cuyo resultado se traduce en una

disminución de las cosechas y perjuicios a los bosques, altera la composición del plancton en los océanos.

En 1987, los gobiernos de todos los países del mundo acordaron tomar las medidas necesarias para solucionar este grave problema firmando el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Actualmente ya no se comercializa los refrigerantes CFC y está previsto sacar del mercado el HCFC para el 2020.

Los científicos han desarrollado refrigerantes alternativos que no dañan la capa de ozono, aunque sí mantienen su influencia negativa en el efecto invernadero. Aún no se ha encontrado el refrigerante ideal, o sea el que tenga excelentes propiedades termodinámicas sin dañar el medio ambiente y aún continúan las investigaciones en este sentido.

De lo anterior se deduce la importancia que reviste seleccionar adecuadamente el equipamiento de climatización a instalar y explotar, de manera que su impacto tanto en el medio ambiente (directa e indirectamente) como a nivel social, sea el menos dañino posible.

Este debe ser un requisito a aplicar en Cuba, donde en los últimos años se ha experimentado un aumento en el uso de los equipos de climatización, tanto para uso industrial como comercial y doméstico, contrastando por un lado con la incipiente cultura en cuanto a selección, uso y explotación de climatización se refiere, y por otro que la mayoría de las construcciones que existen en Cuba no fueron diseñadas pensando en la climatización artificial.

### **1.5. La climatización de locales**

Desde tiempos remotos el ser humano se ha dedicado a transformar su medio ambiente, con objetivos que se fueron ampliando y profundizando con el transcurrir de los siglos. En primer lugar solo se trataba de prosperar en las condiciones adversas de la naturaleza, posteriormente el objetivo fue efectuar sus actividades con mayor productividad y, por último, desarrollar su vida en general (ocio, trabajo, descanso) en las mejores condiciones de comodidad posibles.

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.

Unas adecuadas condiciones ambientales en un determinado local no son, sin embargo, necesarias exclusivamente en términos de confort de sus ocupantes. Son además especialmente relevantes las repercusiones que la presencia de ciertos contaminantes en el aire respirado, un excesivo ruido, iluminación insuficiente o niveles extremos de humedad relativa, a modo de ejemplo, pueden tener sobre la salud de las personas.

Los avances tecnológicos del último siglo han posibilitado el acceso de gran parte de la población a niveles crecientes de confort y la competitividad de las distintas actividades económicas requiere que los recursos humanos desarrollen sus actividades con productividad elevada.

Así mismo, existe un interés adicional en el mantenimiento de unos niveles satisfactorios de la calidad del ambiente interior: la productividad de las personas en sus lugares de trabajo o estudio. Se ha comprobado que este efecto, el cual comienza a ser tenido en cuenta más recientemente, puede llegar a tener un peso relevante en los costes asociados al personal, ya que no sólo su bienestar puede suponer un aumento de un 1% en su productividad, sino que también se reducen los costes debidos a afecciones de su salud o a daños y averías en los equipos manipulados por ellos [Corgnati & Gameiro, 2011].

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, la cual se determina abarcando sus consumos energéticos destinados a la climatización de espacios, aprovisionamiento de agua caliente e iluminación.

En este sentido el acondicionamiento de aire es un proceso necesario tanto como para la optimización de algunos procesos industriales, como para el bienestar de las personas que se encuentran dentro de un recinto.

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, des humidificación, filtrado y refrigeración. Cada uno de los cuales cumple una función específica y diseñada para operar correctamente dentro de rangos establecidos.

El consumo de energía primaria en el mundo se había incrementado continuamente hasta el año 2004, después de sufrir una interrupción en su crecimiento en ese año debido a la crisis económica, el mercado global de los equipos de aire acondicionado ha mostrado un cierto incremento. El crecimiento del mercado en los próximos años vendrá impulsado por la adopción de equipos energéticamente eficientes, en particular con tecnología *inverter*, y por la necesidad de remplazar equipos.

La importancia para un país de la calefacción y la refrigeración en edificios varía dependiendo de las condiciones climáticas y del desarrollo económico. En países muy cálidos, con poca o ninguna demanda para calefacción, la refrigeración tiene un potencial de crecimiento muy grande debido a su poca o nula implantación. La fuerte demanda de los mercados en desarrollo, particularmente del área del Asia-Pacífico, augura un buen futuro para el sector del aire acondicionado. En esta área, China y Japón son los mercados más importantes. Solo en China la venta de equipos de aire acondicionado de ventana en 2009 fue de unos 27 millones de unidades, un 35% superior a la del 2005. Las condiciones de mercado en Oriente Medio, África y subcontinente Indio son también favorables. A parte de las ventas, Asia representa el mayor productor de equipos de aire acondicionado, alrededor del 70% de los sistemas producidos en todo el mundo se fabricaron en China en 2011 (BSRIA, 2012).

La gran difusión del acondicionamiento de aire implicó un impacto importante en el consumo de energía, emisión de gases que destruyen la capa de ozono y emisiones de gases de efecto invernadero asociados con el consumo de energía. Según estudios efectuados por la Agencia Internacional de la Energía el consumo de energía eléctrica asociado al acondicionamiento de aire durante el año 2000 en sus 22 países miembros representa el 6.4% del consumo total de energía eléctrica en el ámbito residencial. En 1990 el aire acondicionado consumió  $480 \times 10^3$  TJ de electricidad en los hogares de los 22 países miembros de la IEA, pero este aumentó en un 12.9%, hasta alcanzar  $540 \times 10^3$  TJ en 2000. (OECD/IEA, 2003).

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 y 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.

Las máquinas de refrigeración con activación térmica representan una alternativa que en determinadas circunstancias pueden resolver o paliar parte de los problemas asociados a la producción de frío para aire acondicionado. 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.

Si bien la cantidad de equipos de aire acondicionado es bastante menor en comparación con otros electrodomésticos que prácticamente llegan a una penetración superior al 90% de los hogares, como es el caso de refrigeradores o televisores, las condiciones climáticas y económicas de nuestro país son razones para incluir los aires acondicionados entre los artefactos prioritarios para establecer un estándar mínimo de eficiencia energética, ya que

sin duda las altas temperaturas que se han presentado durante los últimos años incidirán en el aumento del uso de estos artefactos.

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 se deben implementar nuevos métodos para aumentar la eficiencia y ahorro de energía en este sector.

Existen tres razones importantes que justifican la importancia de la reducción del consumo de energía eléctrica.

1. El elevado coste económico de la energía.
2. Perspectivas de escasez energética en las próximas décadas.
3. El elevado impacto medioambiental que el consumo energético origina en el planeta, debido al efecto invernadero a que actualmente está regulado por protocolos internacionales.

### **1.6. Las Fuentes Renovables de Energía en la climatización**

Con preocupación se está observando y debemos aceptar que las fuentes tradicionales de energía de que dispone la tierra no son inagotables. Efectivamente los combustibles como el petróleo, el gas y el carbón, de los que, hasta el momento, dependemos en gran escala, se están consumiendo a ritmos muy acelerados y en un tiempo bastante cercano se agotarán por completo.

La energía solar como recurso energético está constituida básicamente por la parte de radiación que emite el Sol y es interceptada por la Tierra. Este es un recurso con el cual podemos disponer para una infinidad de necesidades siendo la energía más abundante de la Tierra: renovable, disponible, gratuita y en cantidad muy superior a las necesidades energéticas de la población mundial. Sin embargo, su aprovechamiento presenta problemas técnicos y económicos que hacen difícil utilizarla en la práctica. Hoy en día utilizamos solo una pequeña parte de la enorme cantidad de energía que nos llega del sol, por lo que el camino a recorrer es todavía largo para poder aprovechar la energía solar a gran escala.

Entre las necesidades reales y potenciales de la energía solar se encuentran:

- **Calefacción de agua doméstica:** La mayoría de las aplicaciones de la energía solar, particularmente las que proporcionan un servicio que se requiere en forma continua,

es decir, no sólo cuando hay insolación, requieren al menos dos elementos: un colector, en donde se transforme la luz solar en el efecto deseado, y un almacén, en donde se pueda tener una reserva del efecto deseado, para cuando no hay insolación. Los calentadores solares, entonces, requieren por lo general de estos dos elementos,

- **Potabilización del agua:** Otra de las aplicaciones prácticas de la energía solar es la potabilización de agua. Mediante las diversas variantes de esta técnica es posible producir agua potable a partir de agua contaminada. Como esto puede lograrse mediante tecnología relativamente simple, esta aplicación resulta especialmente útil para regiones alejadas de las comodidades de la civilización, como islas y regiones costeras poco comunicadas. Pero también pueden encontrarse aplicaciones técnica y económicamente factibles en otros lugares.
- **Secado solar:** Muchos productos agrícolas requieren un secado post-cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción. El secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y es aún uno de los procesos agrícolas más utilizados en nuestro país y en muchos países del mundo. Este procedimiento es de muy bajo costo pero puede producir fuertes mermas ocasionadas por las lluvias durante el proceso de secado y el ataque de insectos y animales. Por otro lado, la calidad del producto se ve afectada por la contaminación de polvos e insectos. En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permiten solucionar los problemas mencionados en relación con el secado al aire libre.
- **Refrigeración solar:** Uno de los métodos más antiguos de refrigeración y que en algunos lugares aún se sigue utilizando, es el que se basa en la fusión de hielo o nieve, que a la presión de 1 atm, tiene lugar a una temperatura de 0°C.

El hielo o nieve se colocan en el espacio o sobre los objetos que se quieren refrigerar o enfriar y que tienen una temperatura superior a los 0°C. Según la segunda ley de la termodinámica, el calor fluirá espontáneamente de la región de mayor temperatura o sea el espacio u objetos a refrigerar hacia la región de menor temperatura que es el hielo o nieve, de manera que el espacio u objetos son enfriados. Esto ocurre también debido a que el hielo o nieve en esas condiciones de temperatura y presión ambiente, debe pasar al estado líquido y para hacer ese cambio de fase se requiere de una determinada cantidad de calor que es suministrada por los alrededores.

Otras prácticas muy comunes para obtener refrigeración eran también mediante el uso del bióxido de carbono que es el hielo seco o agua fría, operando bajo principios semejantes a los mencionados para el hielo o nieve. Los sistemas de refrigeración que actualmente más se utilizan son el sistema de refrigeración por compresión y el sistema de refrigeración por absorción. Estos sistemas se basan en la evaporación o gasificación de un líquido a baja presión. Al igual que un sólido absorbe calor para pasar al estado líquido, un líquido también debe de absorber calor para vaporizarse o pasar al estado gaseoso. En los últimos años se ha venido trabajando en sistemas de refrigeración que utilizan la radiación solar para producir el efecto de enfriamiento. Dentro de las aplicaciones de la energía solar, esta es una de las más importantes e interesantes debido por un lado, al reto tecnológico que implica desarrollar sistemas de este tipo, y por el otro, al hecho de que en esta aplicación coincide la disponibilidad con la necesidad, esto es: entre más flujo de energía radiante llega a un determinado lugar, más altas son las temperaturas ambientales y por lo tanto más se requiere de la refrigeración o enfriamiento.

Según la forma en que aprovechemos la energía solar podemos clasificarlas en tres tipos diferentes:

- I. **Directa:** Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.
- II. **Térmica:** Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

III. **Fotovoltaica:** Se llama "fotovoltaica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

Estas dos últimas formas de aprovechamiento determinan los dos tipos de energía solar: Energía Solar Térmica y Energía Solar fotovoltaica.

Captando de forma adecuada la radiación solar, se puede obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados paneles fotovoltaicos.

Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características y particularidades, tanto de equipos que posibilitan dichas transformaciones, como los rendimientos de las mismas.

Asimismo debe considerarse que cada tecnología tiene sus costes, aunque el factor común es que el recurso solar es gratuito y no varía en el tiempo.

En el esquema siguiente se puede observar las diferentes tecnologías que pueden trabajar con energía solar, así como los rangos de temperatura alcanzados por cada una de estas.

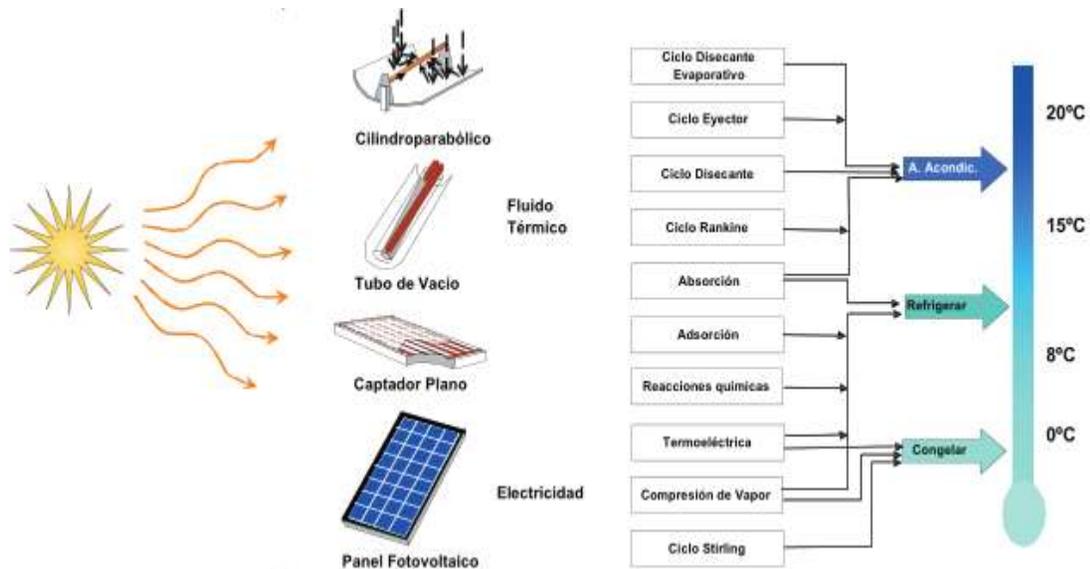


Figura 1.3. Esquema de las diferentes tecnologías que pueden trabajar con energía solar

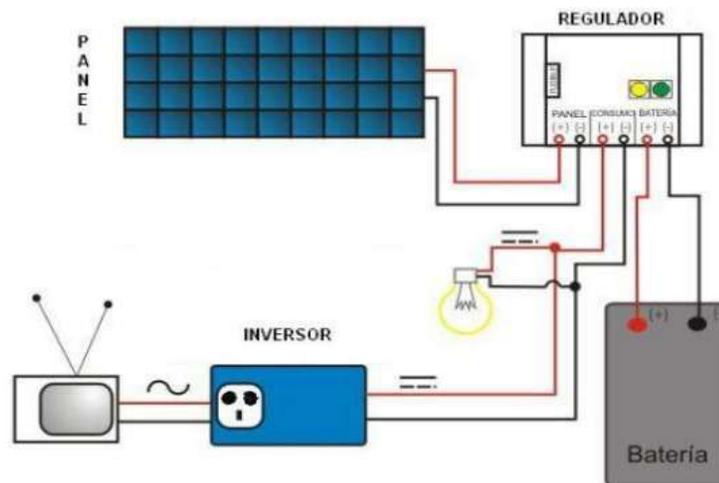
### 1.6.1. Energía solar fotovoltaica.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada, en el proceso emplea unos dispositivos denominados celdas

fotovoltaicas, los cuales son semiconductores sensibles a la luz solar; de manera que cuando se expone a esta, se produce en la celda una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras. (Carlos Prado, 2008)

Consta principalmente de los siguientes elementos:

- El Panel Fotovoltaico, el primer componente del sistema Regulador de Carga
- Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
- Reguladores de voltaje y otros controles, típicamente un controlador de carga de batería, un Inversor de corriente cd/ca o un rectificador ca/cd.
- Cables e interruptores.
- Red eléctrica circundante.
- Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas.



*Figura 1.4. Sistema Típico Fotovoltaico interconectado a la red*

Un sistema fotovoltaico no siempre consta de la totalidad de los elementos arriba mencionados. Puede prescindir de uno o más de éstos, dependiendo del tipo y tamaño de las cargas a alimentar, el tiempo, hora y época de operación y la naturaleza de los recursos energéticos disponibles en el lugar de instalación.

### 1.6.2. Energía solar térmica

Esta tecnología que parece nueva, no lo es, se remonta a muchos años atrás. El por qué no ha sido explotada y desarrollada hasta este momento, quizás haya sido un gran error basado en cuestiones puramente económicas, ya que por aquél entonces y hasta hace poco tiempo, los hidrocarburos se presentaban como una fuente inagotable de recursos y

generadora de riqueza. Sea cual sea la causa, lo fundamental es que nuestro presente y futuro está en esta tecnología descubierta hace ya mucho tiempo y que nos permitirá obtener una energía limpia, inagotable y fundamentalmente respetuosa con nuestro medio ambiente.

Este tipo de energía constituye una forma de energía solar activa, es decir, no se basa en recibir pasivamente la acción de la luz y el calor solar, sino que hace uso del efecto del calentamiento producido, para captarlos y transferirlos a otra serie de dispositivos.

En función de la temperatura que se alcance en la superficie de captación solar, se distinguen tres tipos de técnicas: de baja temperatura, media temperatura y alta temperatura. Se alcanzará cada nivel de temperatura en función de cómo se concentre la energía solar recibida en el captador solar:

- La tecnología de baja temperatura se utiliza para calentar el fluido hasta unos 70° C. Esta tecnología se emplea en el campo de la climatización, por lo que se trata de la técnica que se va a estudiar en nuestro proyecto.
- La tecnología de media temperatura se destina a aquellas aplicaciones en las que se requiere una temperatura del fluido superior a los 100° C. Este tipo de sistemas se puede usar para la producción de vapor o para calentar otro fluido. Se pueden alcanzar hasta 300° C usando dicha tecnología.
- La tecnología de alta temperatura va encaminada a aplicaciones que requieren temperaturas del fluido superiores a los 300° C, fundamentalmente en el campo de la producción de energía eléctrica.

### **1.7. Colectores solares**

El principal componente de cualquier sistema de energía solar es el colector o captador solar. Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía captada de la radiación solar en energía interna y dicha energía la transfieren a un medio de transporte (por lo general agua, aceite o aire) que fluye a través del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5  $\mu\text{m}$ ) y es por naturaleza variable con la hora del día.

Existen diversos métodos adecuados a la aplicación que quiera dársele al fluido que se calienta a través de un captador solar, entre los cuales se encuentran:

- **Captador de placa plana:** Por lo general un colector de placa plana actúa como un receptor que recoge la energía procedente del Sol y calienta una placa, (ver anexo 1). La energía almacenada en la placa es transferida al fluido.

Usualmente, estos colectores poseen una cubierta transparente de vidrio o plástico que aprovecha el efecto invernadero, formado por una serie de tubos de cobre, los cuales expuestos al sol absorben la radiación solar y se la transmiten al fluido que atraviesa su interior. Su aplicación es la producción de agua caliente sanitaria, climatización de piscinas y calefacción.

Estos colectores se caracterizan por no poseer métodos de concentración, ser más económicos y resultar eficientes para obtener agua caliente sanitaria. Además, nos ofrecen la ventaja de usar una orientación fija y de aprovechar tanto la radiación directa como la difusa. (MORIS ARROES. 2011).

- **Captador de tubo de vacío:**

Cuando el colector de placa plana reporte dificultades para lograr las temperaturas del agua requeridas, se recomienda el empleo de este tipo de captador solar para disponer de agua caliente sanitaria y calefacción solar (ver Anexo 2).

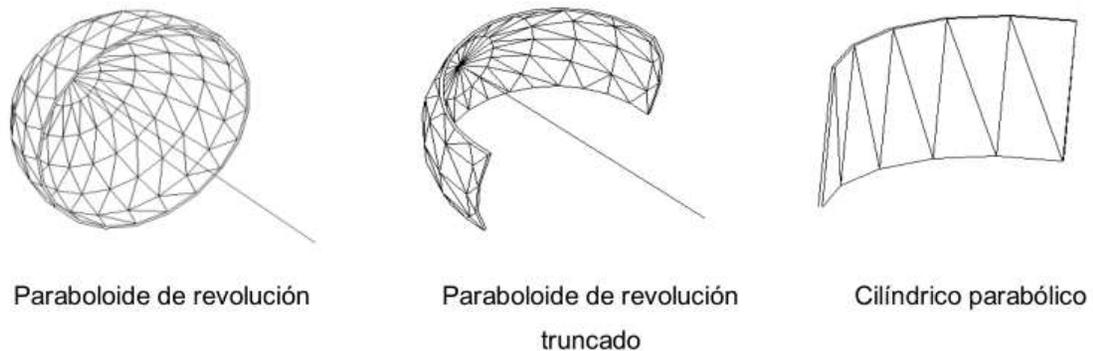
Estos consisten en un grupo de tubos de vidrio dentro de cada uno, de los cuales hay una aleta de aluminio absorbidora, conectada a un tubo de metal (normalmente cobre) o tubo de vidrio. La aleta posee un recubrimiento selectivo que absorbe la radiación solar, e inhibe la pérdida de calor radiactivo. El fluido de transferencia de calor es el agua y se distribuye a través de las tuberías, una para la entrada del líquido y el otro para la salida de fluidos. Los colectores de tubos de vacío de corriente directa vienen en varias variedades de acuerdo al tipo de tubería utilizada.

- **Captador parabólico:**

Los reflectores parabólicos representan la forma de reflector más utilizada. Ofrecen la posibilidad de dirigir las ondas de modo más variado ya sea por radiación concentrada, horizontal o asimétrica y posibilitan también una determinada limitación de deslumbramiento. Si el contorno del reflector se construye por el propio eje mediante

rotación de una parábola o un segmento parabólico resulta un reflector con distribución de onda de radiación controlada. Las superficies reflectantes permiten transportar por reflexión, la energía del frente de onda al punto f. Punto en donde se sumarían las ondas con igual fase.

Existen muchos tipos de reflectores parabólicos. Los más usados son: cilíndricos parabólicos, paraboloides de revolución truncados y paraboloides de revolución. Véase figura 1.5. (Antenas, 2004)



*Figura 1.5. Tipos de reflectores parabólicos más utilizados.*

Al realizar una búsqueda por la bibliografía relacionada con el tema de esta investigación se observó que el mecanismo más utilizado para la climatización solar es el de absorción.

Por estas razones, el diseño de instalaciones capaces de cubrir la totalidad de la demanda frigorífica a partir de la energía solar térmica necesitan disponer en paralelo de un equipo convencional de igual capacidad frigorífica, lo que supone una alta inversión que rara vez se amortizará en un tiempo razonable, inferior a ocho años. Por lo tanto, casi siempre deberá considerarse la posibilidad de cubrir con energía solar térmica, solo una parte de la demanda total de refrigeración. El objetivo será ahorrar energía.

Para elegir el sistema óptimo para las condiciones reinantes en Cuba, se ha hecho un sondeo de los diferentes tipos de refrigeración que existen en el presente, evaluando tanto el costo de producción, como las posibilidades de su realización con la tecnología a la que se puede acceder en el país en forma inmediata sin elevados costos de importación.

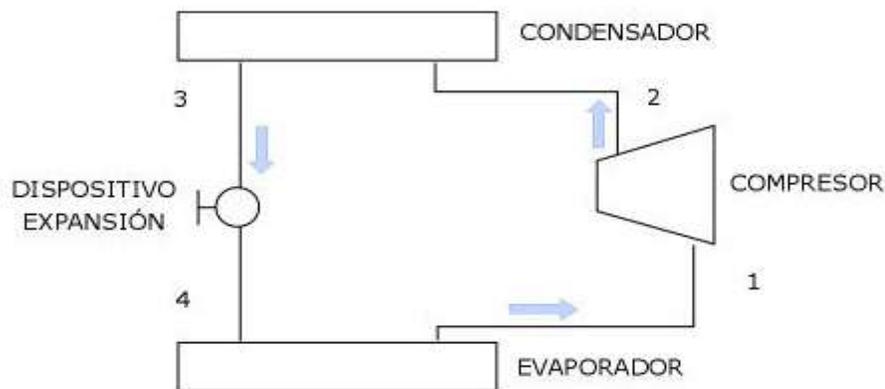
Por otro lado se piensa que la formación de un grupo de investigadores en este rubro dará, en el futuro, la posibilidad de mejorar el estado tecnológico actual para la producción de

aires acondicionados más sofisticados una vez que la propuesta en el presente trabajo se encuentre en la etapa de producción.

A continuación se presenta una pequeña reseña de las posibles formas de lograr producción de frío, con el propósito de brindar una visión tanto de las distintas posibilidades como las limitaciones de cada una de ellas.

### 1.8. Compresión de vapores

La refrigeración por compresión desplaza la energía térmica entre dos focos; creando zonas de alta y baja presión confinadas en intercambiadores de calor, mientras estos procesos de intercambio de energía suceden cuando el fluido refrigerante se encuentra en procesos de cambio de estado; de líquido a vapor, y viceversa. El proceso de refrigeración por compresión (figura 1.3) se logra evaporando un gas refrigerante en estado líquido a través de un dispositivo de expansión dentro de un intercambiador de calor, denominado evaporador.



*Figura .1.6.Ciclo de compresión mecánica.*

Los componentes principales de un sistema frigorífico por compresión mecánica son, por lo visto anteriormente, los siguientes:

- **Evaporador:** es un intercambiador de calor donde se efectúa la ebullición del refrigerante líquido que procede de la válvula de expansión con la consiguiente absorción de calor del medio en el que se encuentra.
- **Compresor:** es una máquina que tiene la misión de aumentar la presión de los gases, es decir, comprimirlos al disminuir el volumen que dicho gas ocupa. La función del

compresor es aspirar el refrigerante en estado vapor que proviene del evaporador y aumentar su presión al disminuir el volumen que dicho gas ocupa.

- **Condensador:** es un intercambiador de calor cuya función es extraer del refrigerante en estado gaseoso el calor con el fin de producir su condensación. Este calor es la suma del calor absorbido en el evaporador y el producido por el trabajo de compresión.
- **Válvula de expansión o de regulación:** la función es regular la entrada del fluido frigorífico en el evaporador y mantener la diferencia de presión necesaria entre los lados de alta y baja presión del sistema.

Por su parte, los sistemas de refrigeración por compresión se diferencian o separan en dos grandes tipos:

- **Sistemas de compresión simple:** Eleva la presión del sistema mediante una sola carrera de compresión. Es el más común de los sistemas de refrigeración, ampliamente utilizado en refrigeradores y equipos de aire acondicionado.
- **Sistemas de compresión múltiple:** Solución de compresión ideal para bajas temperaturas debido a las altas relaciones de compresión que estos sistemas superan.

Los sistemas de compresión simple son los denominados de una sola etapa, mientras que de compresión múltiple hay diversos tipos como: de doble etapa, en cascada, de compresión múltiple con enfriador intermedio de tipo abierto o cerrado.

Los gases más usados para este tipo de equipos son los clorofluorocarbonos conocidos como CFC y que tienen consecuencias graves en la disminución de la capa de ozono. En algunas instalaciones industriales se utiliza el amoníaco, que, si bien no tiene consecuencia sobre la capa de ozono, tiene consecuencias directas sobre la salud, con lo que la explotación de este tipo de tecnología requiere de controles estrictos.

La utilización de este tipo de dispositivos con energía solar llevaría a la importación de células fotoeléctricas, con el consiguiente costo de importación, además las temperaturas alcanzadas no son las ideales para el proyecto.

### 1.8.1. Efecto Peltier

Este efecto fue descubierto por J. Peltier a principios del siglo XIX y consiste en que el paso de una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales distintos, es capaz de enfriar la juntura si circula en el sentido correcto, (ver figura 1.7). Este efecto suele ser enmascarado por el efecto Joule, que calienta la juntura. Sin embargo, eligiendo en forma correcta el par

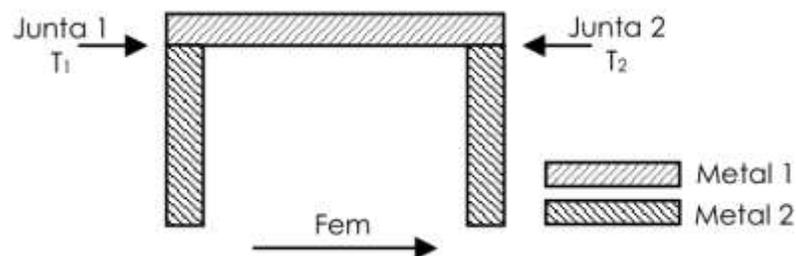
de metales utilizados, como también el dimensionamiento del dispositivo, es posible lograr frío en forma directa a partir del pasaje de una corriente.

Actualmente existen refrigeradores de este tipo (llamados refrigeradores termoeléctricos) en los que se utiliza no ya una juntura de dos metales, sino elementos de estado sólido. Dichos refrigeradores presentan un rendimiento mucho menor que los refrigeradores de compresión estándar (los de uso doméstico). Sin embargo, cuando se trata de producir frío en un pequeño volumen (por ejemplo, en dispositivos electrónicos como una CCD de bajo ruido) el rendimiento de los refrigeradores a compresor cae drásticamente y resulta mucho más conveniente el uso de los termoeléctricos.

Incluso existen pequeñas unidades que permiten mantener frías las bebidas y comestibles para un día de camping conectando la unidad al encendedor del carro. Uno de los inconvenientes mayores de estas unidades es que cuando se interrumpe el paso de la corriente eléctrica, la zona del refrigerador que era muy eficiente para hacer pasar el calor desde el interior del refrigerador hacia el medio ambiente se convierte en una zona de grandes pérdidas del frío logrado. De este modo, frente a una interrupción del suministro de energía eléctrica, la temperatura del interior sube rápidamente hasta llegar a la del ambiente.

Las principales ventajas se encuentran en su pequeño tamaño, son silenciosas porque no poseen partes móviles, y su relativamente larga vida útil. Además, no contienen líquidos ni gases como medios refrigerantes, lo que las hace inocuas para el medio ambiente (si no se piensa en que es necesario producir la energía eléctrica con la que se las debe alimentar).

Por otro lado, la utilización de estos dispositivos haciendo uso de la energía solar, implica la necesidad de importación de celdas fotovoltaicas, así como los componentes de estado sólido que extraen el calor. En este caso, no hay la posibilidad de competir con las grandes potencias productoras de este tipo de dispositivos, ya que llevan muchos años de ventaja, y poseen enormes grupos de desarrollo tecnológico dedicados a este tipo de tecnología.



*Figura.1.7.Juntas termoeléctrica J1 y J2 de dos metales diferentes (termopar)*

### 1.8.2. Refrigeración por adsorción

La refrigeración de este tipo, se basa en los procesos de adsorción y desorción de una materia en estado gaseoso sobre un cuerpo sólido. [Lemini, F 2002].

En el proceso de adsorción, el gas es atrapado por la superficie del cuerpo sólido liberando una cierta cantidad de energía en forma de calor. El proceso de desorción es, por el contrario, la liberación del gas atrapado por el sólido, cuando a éste se le entrega calor.

Si bien estos fenómenos se aplican desde hace muchísimo tiempo en la técnica de procesos industriales, en el campo de la refrigeración se aplicaron en los años veinte y treinta del siglo XX, pero fueron desplazadas rápidamente por la aplicación de los CFC a las máquinas que funcionan con ciclo de compresión. Una de las razones más notables para que esto ocurriera, es el carácter intermitente de su funcionamiento, ya que se produce frío sólo en la etapa de adsorción. Sin embargo, a partir de la década del 70 del siglo XX, con la crisis energética mundial sumada a los problemas ambientales suscitados por los CFC, comienza a despertarse un nuevo interés en el desarrollo de este tipo de refrigeración.

Algunos ejemplos como pares refrigerante/adsorbedor son: agua/zaoolita, metanol/carbón activado.

Existen múltiples variantes y soluciones técnicas como:

- **Ciclo de adsorción intermitente:** La mayoría de sistema de refrigeración por adsorción que hay instalados en el mundo son de este tipo. Utilizando carbón activado y metanol, se utilizan principalmente para la producción de hielo. La mayoría de estos sistemas integran el adsorbente en el captador (tanto en captadores planos, como de tubos al vacío).
- **Sistemas continuos de adsorción:** Al igual que en el anterior, se puede complicar haciéndolo continuo con un condensador, un evaporador, un reactor de porción y una válvula de mariposa y un elemento de expansión.

### 1.8.3. Ciclo de refrigeración por absorción

Otra forma de refrigeración, que tiene un atractivo económico cuando se tiene una fuente de energía térmica barata a una temperatura de 100 a 200 °C, es la refrigeración por absorción. 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.

Como su nombre lo indica, los sistemas de refrigeración por absorción implican la absorción de un refrigerante por un medio de transporte. El sistema de refrigeración por absorción más utilizado en el sistema de amoníaco-agua, donde el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) sirve como el refrigerante y el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 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.

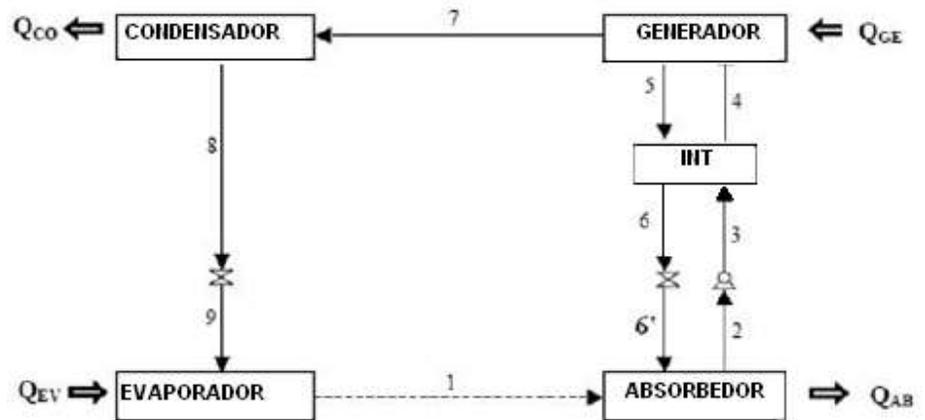


Figura 1.8. Diagrama esquemático del ciclo de absorción de amoníaco-agua (Cañadas y Torres, 2010).

### 1.9 Tecnología de refrigeración por absorción.

Para comprender los principios básicos que implica la refrigeración por absorción, se examina el sistema amoníaco-agua que se muestra en la Figura 1.8.

Se puede observar inmediatamente de la figura 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 regenerador y una válvula.

Una vez que la presión del amoníaco es elevada por los componentes presentados en la Figura 1.8, el amoníaco se enfría y se condensa en el condensador, liberando calor hacia los alrededores; se estrangula hasta la presión del evaporador.

El vapor de amoníaco sale del evaporador y entra al absorbedor, donde se disuelve y tiene una reacción química con el agua para formar  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ . Esta es una reacción exotérmica; por ello el calor se libera durante este proceso. La cantidad de  $\text{NH}_3$  que puede disolverse en  $\text{H}_2\text{O}$  es inversamente proporcional a la temperatura. Por consiguiente, es necesario enfriar el absorbedor para mantener su temperatura lo más baja posible y, por ende, para maximizar la cantidad de  $\text{NH}_3$  disuelto en el agua. La solución líquida  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , que es rica en  $\text{NH}_3$ , se bombea luego al generador. El calor se transfiere a la solución de una fuente para evaporar la solución. El vapor que es rico en  $\text{NH}_3$  pasa por un rectificador, que separa el agua y la regresa al generador. El vapor de  $\text{NH}_3$  puro de alta presión continúa luego su trayecto por el resto del ciclo. La solución caliente  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , pobre en  $\text{NH}_3$ , pasa después por un regenerador, donde transfiere una parte de su calor a la solución enriquecida que sale de la bomba, y se estrangula hasta la presión del absorbedor.

Comparados con los sistemas por compresión de vapor, los sistemas de refrigeración por absorción presentan una ventaja importante: se comprime un líquido en vez de un vapor, [Mardones Barrientos, 2016].

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

- **Sistema multiefecto** (doble o triple). La única limitación radica en que la fuente necesaria para hacer funcionar el sistema debe ser superior a  $120^\circ \text{C}$ .
- **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.
- **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.

### 1.9.1 Sistema elegido:

La selección del sistema 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, así por ejemplo se podría hacer uso del ciclo de compresión mecánica de vapor, que es muy eficiente, pero la principal desventaja de dicho arreglo es la gran variación en el volumen específico del fluido de trabajo como vapor sobrecalentado a su paso por el compresor. Dicho decremento se traduce en tres grandes inconvenientes:

1. La energía requerida por el ciclo para operar ( $W$ ) debe suministrarse como trabajo mecánico.
2. El trabajo mecánico requerido por el ciclo debe de suministrarse en cantidades relativamente grandes.
3. La mayoría de los compresores que operan en ciclos de bomba de calor por compresión mecánica son accionados por motores eléctricos; esto es que el alto requerimiento de energía mecánica del ciclo se traduce en un alto consumo de energía eléctrica por el compresor y en un mayor consumo de la fuente energética primaria a partir de la cual se produce dicha potencia eléctrica, por lo que inmediatamente queda descartado.

La variante del uso del efecto Peltier y células fotovoltaicas, pero esto produciría un costo dependiente de la importación de estos elementos, su pequeño tamaño sería un gran inconveniente para la instalación, como la posibilidad de que se interrumpa el paso de la corriente eléctrica, y se convierta en una zona de grandes pérdidas del frío logrado. Con una falla de unos minutos se llegaría a la temperatura ambiente.

Para las posibilidades de trabajo con las que se cuenta, tanto en la producción del dispositivo como las condiciones de operación del mismo, una forma sencilla de producir un vapor sobrecalentado 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) uno de los ciclos que parece ser el más conveniente es el de absorción.

### 1.10. Selección del refrigerante.

El refrigerante es una sustancia que es capaz de producir un efecto de enfriamiento sobre el medio que lo rodea, sea un espacio o un cuerpo y que de manera general fluye y evoluciona en un ciclo al interior de un circuito de una máquina frigorífica. En el caso de producción de frío por medio de vaporización, estas sustancias deben tener una temperatura de ebullición, a presión normal, inferior a la temperatura ambiente.

Para cada uno de los diferentes métodos de producción de frío existen para determinadas condiciones de funcionamiento uno o varios refrigerantes apropiados, que garantizan un óptimo de eficiencia y seguridad, en relación con sus propiedades químicas y físicas, existiendo ciertas condiciones mínimas y propiedades que deben satisfacer, tales como:

- Comportamiento indiferente frente a los materiales utilizados. El refrigerante no debe combinarse o reaccionar con los materiales utilizados para la construcción de la máquina frigorífica.
- Estabilidad química. El refrigerante no debe de sufrir ningún tipo de transformación química, dentro del dominio de temperaturas y presiones de operación.
- Ausencia de toxicidad. Es importante que el refrigerante no tenga efectos nocivos sobre la salud, ni sobre el medio. No todos los refrigerantes satisfacen esta condición.
- Fácil detección de fugas. Por aspectos de seguridad, operación y economía, es necesario que la circulación del refrigerante se realice en conductos herméticos y que las fugas en caso de ocurrir deben ser inmediatamente detectadas, prefiriéndose aquellos refrigerantes que tengan un olor penetrante.

Existen refrigerantes inorgánicos como el agua y el amoníaco y refrigerantes orgánicos como los hidrocarburos halogenados.

Actualmente hay dos combinaciones refrigerante-absorbente que son de uso común. La más antigua de ellas es amoníaco-agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ), donde el amoníaco es el refrigerante y el agua el absorbente, es usada para refrigeración industrial donde potencias a cubrir son grandes. La otra combinación es agua-bromuro de litio ( $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ), donde el agua es el refrigerante y el bromuro de litio el absorbente, la cual es usada en refrigeraciones de locales o viviendas.

La combinación amoníaco-agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ) es excepcionalmente buena, satisface algunos de los requisitos más importantes pero tiene algunas pequeñas desventajas. El absorbente agua tiene una gran afinidad por el vapor de amoníaco, y los dos son mutuamente solubles en un rango muy amplio de condiciones de operación. Ambos fluidos son muy estables y son compatibles con casi todos los tipos de acero. Una excepción notable es el cobre y sus aleaciones, los cuales no son adecuados para usarse con las soluciones amoníaco-agua, por la alta corrosión que les produce, ya que el amoníaco las ataca en presencia del oxígeno e hidrógeno. El calor latente de vaporización del amoníaco es alto, pero es ligeramente tóxico y muy irritante. Sus presiones de operación son relativamente altas.

Probablemente la principal desventaja de la mezcla amoníaco-agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ) es el hecho de que el absorbente agua es relativamente volátil, por lo que se mezcla en cantidades apreciables con el vapor refrigerante amoníaco en el generador. Estas pequeñas cantidades atraviesan el condensador y llegan al evaporador donde aumentan la temperatura de evaporación, disminuyendo el efecto refrigerante por tenerse una solución amoníaco-agua no vaporizaba a baja temperatura. Por esta razón la eficiencia del sistema amoníaco-agua puede mejorarse usando un rectificador cuya función es la de eliminar el vapor de agua a la salida del generador, antes de que llegue al condensador.

En la combinación agua-bromuro de litio ( $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ) el agua es el refrigerante, estos sistemas no son apropiados en aplicaciones donde la temperatura del evaporador sea igual o menor de  $0^\circ\text{C}$ , para evitar su congelación. En los ciclos Agua-Bromuro de Litio el refrigerante que se utiliza R-718 (agua destilada), y el absorbente es una solución de Bromuro de Litio.

El bromuro de litio es una sal higroscópica y su salmuera tiene gran afinidad con el vapor de agua. Sin embargo, una desventaja de la combinación agua-bromuro de litio ( $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ) es que el absorbente no es del todo soluble en el agua bajo todos los valores de temperatura y presión que pueden darse en el sistema y deben tomarse precauciones especiales en el diseño y operación, para evitar la precipitación y cristalización del absorbente.

Una de las principales ventajas de la solución agua-bromuro de litio ( $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ), es que el absorbente no es volátil, de tal manera que no se tiene mezcla del absorbente con el refrigerante (agua) al salir del generador y por lo tanto no es necesario un rectificador.

Además, puesto que el agua es el refrigerante, las presiones de operación son muy bajas, siendo menores que la atmosférica. Por ejemplo, suponiendo una temperatura en el evaporador de 4,5 °C y una temperatura condensante de 38 °C, las presiones en el evaporador y en el condensador son de 0,9 kPa y 7 kPa absolutas, respectivamente. Con estas pequeñas diferencias entre los lados de alta y baja presión, no se necesita tener válvulas reductoras de presión, debido a que la caída de presión a través de las tuberías de conexión y en las toberas atomizadoras, por lo general proporciona el diferencial de presión necesaria.[ Yazaki, (2004).]

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.

El R22 era hasta hace poco el gas refrigerante más utilizado en el sector del aire acondicionado, tanto para instalaciones de tipo industrial como domésticas, aunque está prohibido su distribución por ser altamente perjudicial para la capa de ozono.

Las tuberías para amoníaco son menos costosas ya que este refrigerante tiene una viscosidad inferior a la del R12 y R22, lo que implica un menor flujo másico. Además, las tuberías deben ser de acero o aluminio, materiales más baratos que el cobre, necesario para los sistemas con refrigerantes fluorados.

## CAPÍTULO II: Diseño del sistema de aire acondicionado.

El fluido utilizado en el ciclo de refrigeración por absorción, es una solución de agua y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), 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.

El  $\text{NH}_3$  es el más tradicional de los refrigerantes inorgánicos conociéndose como tal con la denominación de R-717. Empezando el análisis del ciclo en el generador, (cilindro parabólico), en él la solución de agua y amoníaco se calienta en su interior por la aportación del colector solar, hasta alcanzar una temperatura del orden de  $180^\circ\text{C}$  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.

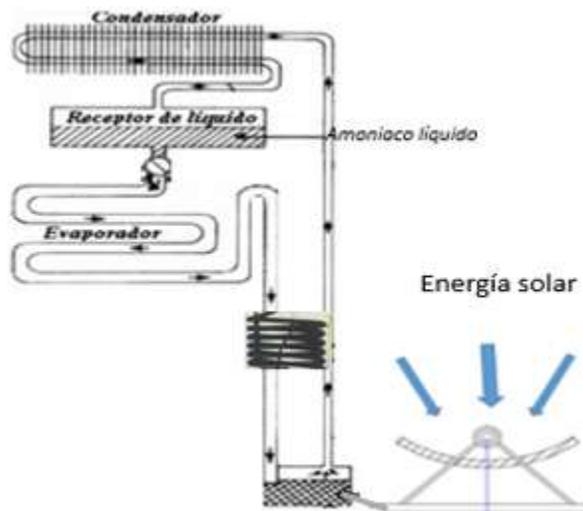


Figura 2.1. Sistema de absorción

### 2.1 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.

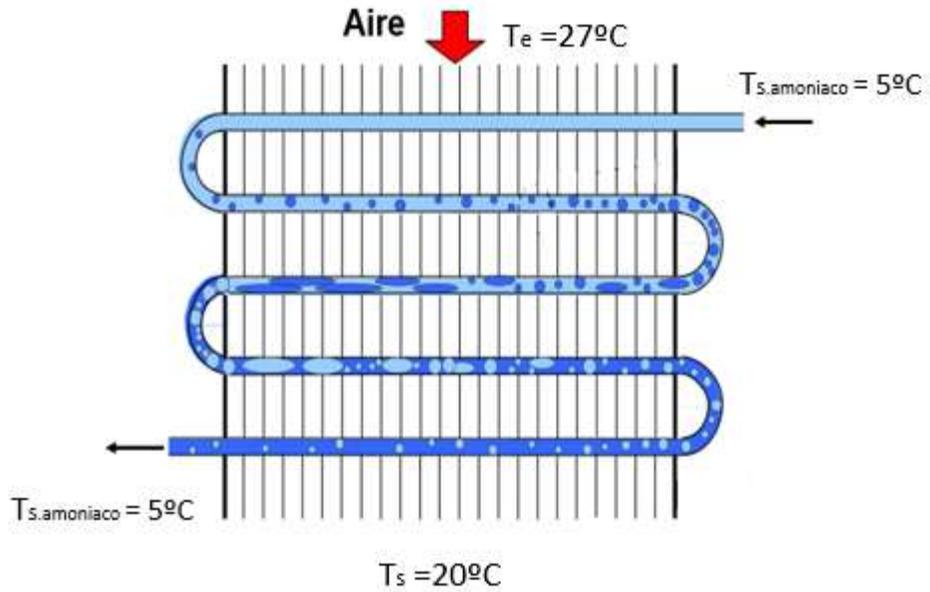


Figura 2.2. Esquema del evaporador.

- Selección de diámetro, espesor, material y configuración de los tubos.

Para el diseño del evaporador se utilizará una tubería de acero al 0,5 de carbono, con las características siguientes:

- Diámetro exterior ( $d_e=10,287 \cdot 10^{-3}$ , m)
- 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.

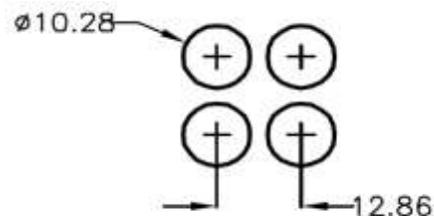
La configuración en los tubos se considerará de tipo cuadrada, por su facilidad de limpieza mecánica. Donde de acuerdo a la norma TEMA el paso por tubo ( $P_t$ ) se define por la ecuación:

$$P_t = 1,25 d_e$$

Entonces sustituyendo datos se tiene:

$$P_t = 1,25 (10,287 \cdot 10^{-3}) \text{ m}$$

$$P_t = 12,86 \text{ mm}$$



- Temperatura media logarítmica ( $\Delta T_{mldt}$ ):

Es la diferencia de temperatura en un extremo del intercambiador menos la diferencia de temperatura en el otro extremo, dividido entre el logaritmo natural del cociente de las dos diferencias.

$$\Delta T_{mldt} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \dots\dots\dots (1)$$

Sustituyendo datos en (1):

$$\Delta T_{mldt} = \frac{(27 - 5) - (20 - 5)}{\ln \frac{27 - 5}{20 - 5}} = 5,14^0 C$$

- Cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (U):

El coeficiente Global de transferencia de calor se calcula según la ecuación (2):

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right)} \dots\dots\dots (2)$$

- Cálculo del coeficiente individual de transferencia de calor por el exterior de la tubería (h<sub>1</sub>).

El coeficiente individual de transferencia de calor para el exterior de tubería se calcula como flujo forzado transversal a un tubo aislado, porque el aire será impulsado por el ventilador a una velocidad de 25 m/seg.

Las propiedades del aire se toman a la temperatura media del mismo que se calcula como:

$$T = \frac{T_{en} + T_{sal}}{2}$$

$$T = \frac{27 + 20}{2} = 23,5^0 C$$

Las propiedades del aire a 23,5 °C son:

$$\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 25,51 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\mu = 18,49 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$P_r = 0.7296$$

$$C_p = 1,007 \text{ kJ/kg K}$$

Para calcular el valor de  $h_1$  primeramente se hace necesario calcular el Número de Reynolds por la expresión:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_e}{\mu} \dots\dots\dots (3)$$

Sustituyendo datos en la ecuación 3 se tiene:

$$Re = \frac{1,184 \cdot 25 \cdot 10,287 \cdot 10^{-3}}{18,49 \cdot 10^{-6}} = 16468,1$$

Como  $Re > 1 \cdot 10^3$

$$N_u = 0,22 R_e^{0,6} = 0,22 \cdot 16468,1^{0,6}$$

$$N_u = 74,54$$

$$h_1 = N_u \cdot \frac{k}{d_i} = 74,54 \cdot \frac{25,51 \cdot 10^{-3}}{6,83 \cdot 10^{-3}} = 278,4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Coeficiente de convección para la evaporación en el interior de la tubería ( $h_2$ ):  
Para el cálculo del coeficiente individual de transferencia de calor por el interior de tubería. Se utilizará la figura 2.4.

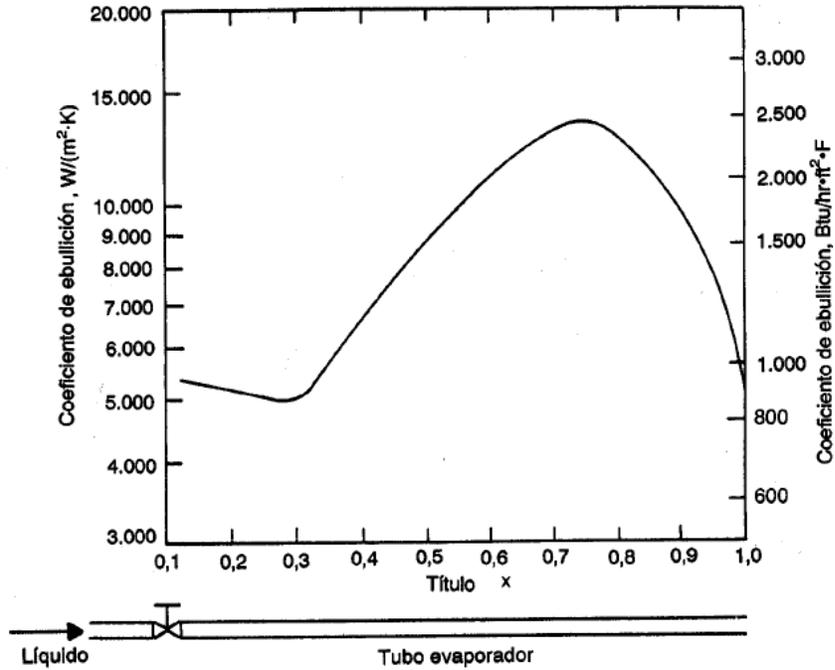


Figura 2.3: Coeficiente de transferencia de calor a lo largo de un tubo de un evaporador de expansión directa. [Stoecker W.F., 1988].

Utilizando una calidad del vapor (x) de 0.75 se obtiene un coeficiente de transferencia de calor ( $h_2$ ) de  $12500 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

- Cálculo de U sustituyendo en la ecuación (2)

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{278,4} + \frac{1}{12500}\right)} = 272,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- Cálculo para la superficie de intercambio y longitud

El área de intercambio se obtiene mediante la ecuación

$$A_{total} = \frac{Q}{U\Delta T_m} = \frac{3.52 \cdot 10^3}{272,3 \cdot 5,14} = 2,51 \text{ m}^2$$

El área se multiplica por 0,1 que es el valor del coeficiente de las aletas del evaporador

$$l = \frac{A}{\pi \cdot d} = 7,9 \text{ m}$$

Tomando que la distancia aproximada de un ventilador para la climatización tipo Split es de 75 cm se hace la distribución siguiente de los tubos:

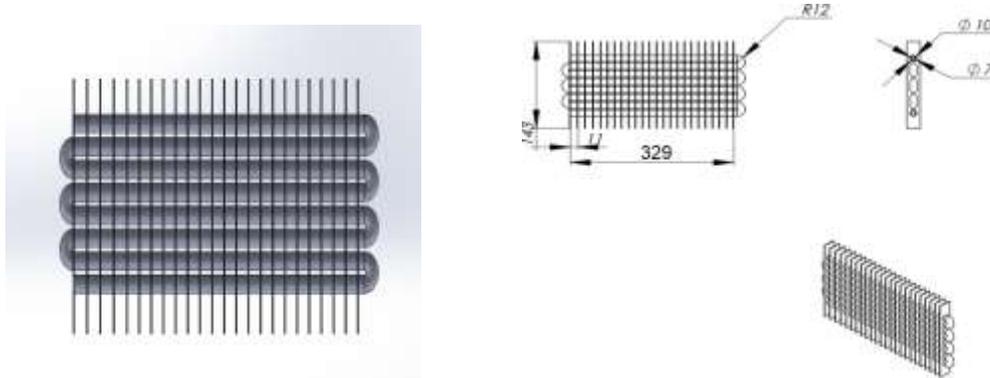


Figura 2.4. Vistas del evaporador

A continuación, en la tabla 2.1 se muestran las principales propiedades mecánicas del diseño del evaporador.

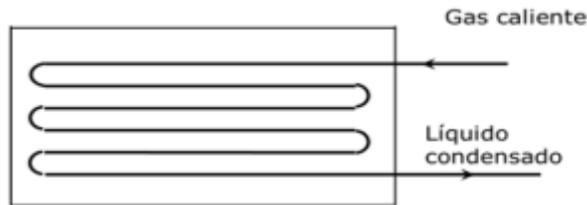
Tabla 2.1. Resumen de las principales propiedades mecánicas del evaporador

Propiedades mecánica	
Diámetro nominal de los tubos	10.287 mm
$L_t$	7900 mm
$N_b$	24
Configuración	cuadrada
Material de los tubos	Ac al carbono ASTM A-106

Dimensiones del capilar:

Las dimensiones del capilar para un aire acondicionado de 12 000 Btu es un capilar corto de 40´x 0,64. (Ver Anexo 4).

## 2.2 Diseño del condensador.



*Figura 2.5. Esquema del condensador*

El condensador es el componente del equipo frigorífico encargado de licuar los vapores de refrigerante, a alta presión, procedente del generador; su fin esencial consiste en el traspaso del flujo calorífico del fluido refrigerante al medio ambiente. El condensador es, en suma, un intercambiador de calor.

Se pueden distinguir tres zonas dentro del condensador:

- Zona de enfriamiento: enfriamiento de los vapores desde la temperatura del vapor recalentado hasta la temperatura de condensación (eliminación de calor sensible). Esta fase es muy rápida debido a la gran diferencia de temperatura que existe y se efectúa generalmente en la primera cuarta parte del condensador.
- Zona de condensación: cesión de calor latente de condensación a temperatura constante. Esta cesión de calor es muy lenta y necesita las dos cuartas partes siguientes del condensador. Para que esta cesión se realice es necesario un salto de temperaturas importante entre el fluido y el medio de condensación.
- Zona de subenfriamiento: enfriamiento del líquido desde su temperatura de condensación hasta la temperatura deseada (líquido subenfriado). Este enfriamiento se realiza en la cuarta y última parte del condensador. El enfriamiento que se consigue es función del salto térmico entre el refrigerante y el medio de condensación.

La transmisión de calor desde el refrigerante hasta el aire tiene lugar en varias etapas. La primera etapa es el paso de calor desde el vapor refrigerante hasta el tubo, a través de la película de líquido condensado sobre el exterior del tubo. A continuación, el calor pasa desde la superficie exterior del tubo hasta la superficie interior. Desde la superficie interior del tubo, el calor debe fluir a través de la capa de incrustaciones que

generalmente se forma en el interior del tubo. Finalmente, el calor pasa desde la capa de incrustaciones a través de la capa límite, hasta el medio ambiente. La cantidad de calor que fluye a través de cada una de las sucesivas resistencias al paso del flujo térmico tiene que ser la misma en condiciones de equilibrio.

El coeficiente de transferencia de calor para el aire por el exterior de la tubería se determina a partir de las condiciones ambientales, habiéndolas evaluado a la temperatura promedio de 25° C. El coeficiente de transferencia de calor por convección, en el exterior de la tubería, depende de la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido refrigerante.

- Selección del diámetro, espesor, material y configuración de los tubos.

Para el diseño del condensador utilizará una tubería de acero al 0,5 de carbono, con las características siguientes:

Diámetro exterior ( $d_e=10,287 \cdot 10^{-3}$  m)

Diámetro interior ( $d_i=6,83 \cdot 10^{-3}$  m)

La configuración en los tubos se considerará de tipo cuadrada, por su facilidad de limpieza mecánica. Donde de acuerdo a la norma TEMA el paso por tubo se define por la siguiente formula:

$$P_t = 1,25 d_e$$

Entonces sustituyendo datos se tiene:

$$P_t = 1,25(10,287 \cdot 10^{-3}) \text{ m}$$

$$P_t = 12,86 \text{ mm}$$

- Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el exterior del condensador ( $h_1$ )

Cálculo de temperatura media ( $\Delta T$ )

$$\Delta t = T_{\text{amoniacó}} - T_{\text{saturación}}$$

$$\Delta t = 30 - 24 = 6$$

La temperatura media del aire de enfriamiento es de 30:

Las propiedades del aire a 27 °C son:

$$\rho = 1,16 \text{ Kg/m}^3$$

$$k = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ w/mK}$$

$$\mu = 184,6 \cdot 10^{-7} \text{ N. s/m}^2$$

$$Pr = 0,707$$

$$C_p = 1,007 \text{ kJ/kg. K}$$

$$N_u = C(G_r Pr_f)^n \left( \frac{Pr_f}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad \text{Donde } C=0,50 \text{ y } n=0,25 \text{ en tubo horizontal}$$

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta_t \cdot d^3}{\nu_f^2} \quad \beta = \frac{1}{t_f + 273} = \frac{1}{303} \text{ K}^{-1}$$

$$N_u = 5,84 \cdot 10^8$$

$$h_1 = N_u \cdot \frac{k}{d_i} = 5,84 \cdot 10^8 \cdot \frac{26,3 \cdot 10^{-3}}{6,83 \cdot 10^{-3}} = 2249 \cdot 10^6 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por el interior de la tubería ( $h_1$ )  
Si los tubos de un condensador están dispuestos en columnas, Nusselt analizó el caso de una columna de tubos horizontales y encontró que el coeficiente de transferencia calorífica promedio para una columna de N tubos se expresa por la ecuación:

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

Todas las propiedades se determinan a temperatura de saturación  $T_{sat} = 30^\circ \text{C}$

De tablas de amoniaco a 30 °C se tiene:

$$\rho = 596,4 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 0,507 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$Pr = 2,01$$

$$\mu = 2,081 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/m s}$$

$$h_{fg} = 1145,5 \text{ kJ/kg}$$

Sustituyendo en la ecuación 4:

$$h_2 = 0,725 \cdot \left[ \frac{596,4^2 \cdot 9,81 \cdot 1145,5 \cdot 0,507^3}{2,081 \cdot 10^{-6} \cdot 10,287 \cdot 10^{-3} \cdot 2(T_{sat} - T_e)} \right]^{1/4} = 42818,467(T_{sat} - T_e)^{-1/4}$$

$$h_2 = 42818,467(T_{sat} - T_e)^{-1/4} = 29581,14 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Determinación de U sustituyendo en (2)

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{2249 \cdot 10^6} + \frac{1}{2958,14} \right)} = 2958,13 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo para la superficie de intercambio y longitud

El área de intercambio se obtiene mediante la ecuación

$$A_{total} = \frac{Q}{U_{op} \Delta T_m} = \frac{12000}{2958,13 \cdot 27} = 0,150 \text{ m}^2$$

$$l = \frac{A}{\pi \cdot d} = 4,7 \text{ m}$$



Figura 2.5. Condensador

Tabla (2.2) Resumen de las principales propiedades del condensador

Propiedades mecánicas
-----------------------

Diámetro nominal de los tubos	$10,287 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
$L_t$	4,7m
$N_b$	12
Configuración	cuadrada
Material de los tubos	Ac al carbono ASTM A-106

#### 2.4 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.



*Figura 2.6 vista del generador*

#### Diseño del canal parabólico:

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.

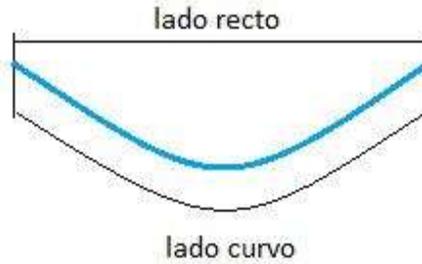


Figura 2.7. Perfil de la superficie captadora

Tomando como origen de coordenadas el punto (0,0) en el vértice de la parábola, los cálculos se toman para tres posibles distancias focales: 20, 30 y 50 cm.

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.

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

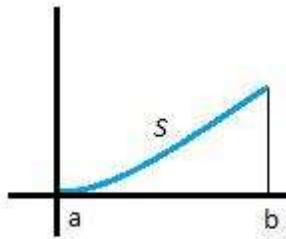


Figura.2, 8

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  $f(X)=y=\frac{x^2}{4 \cdot F}$  por lo que:

$$F=0.50 \text{ m} \rightarrow f(X)=\frac{x^2}{4 \cdot 0,5} = \frac{x^2}{2} \rightarrow f'(x) = x \rightarrow x_{max} = 0,43 \text{ m}$$

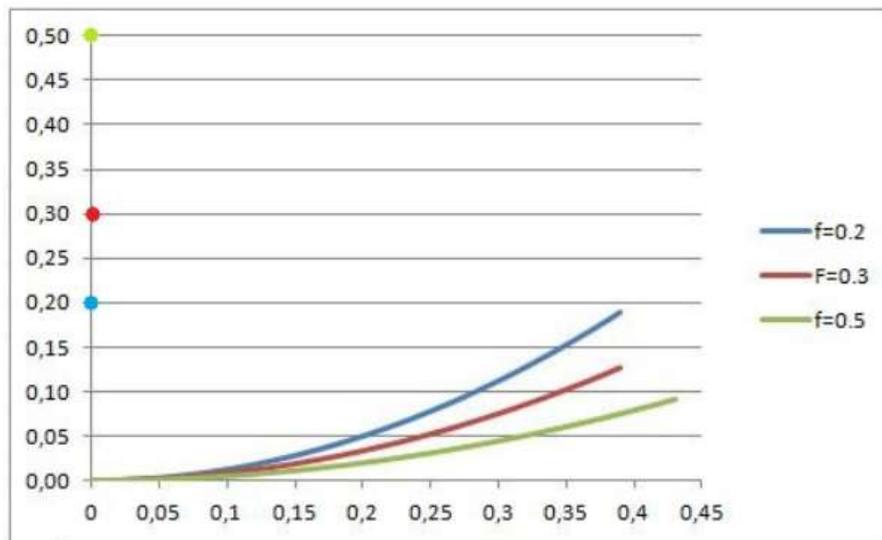
$$F=0.30m \rightarrow f(X)=\frac{x^2}{4 \cdot 0,3} = \frac{x^2}{1,2} \rightarrow f'(x)=1,67x \rightarrow f'(x)=0,39m$$

$$F=0.20m \rightarrow f(X)=\frac{x^2}{4 \cdot 0,20} = \frac{x^2}{0,8} \rightarrow f'(x)=2,5x \rightarrow f'(x)=0,39m$$

Para obtener  $Y_{max}$ , se sustituye la  $X_{max}$  obtenida, en la ecuación general de la parábola de forma que quedan los siguientes resultados:

*Tabla 2.4. Relación de focos con sus respectivas coordenadas de abertura máxima*

Foco	0,20m	0,30m	0,50m
$X_{max}$	0,39	0,39	0,43
$Y_{max}$	0,19	0,13	0,09

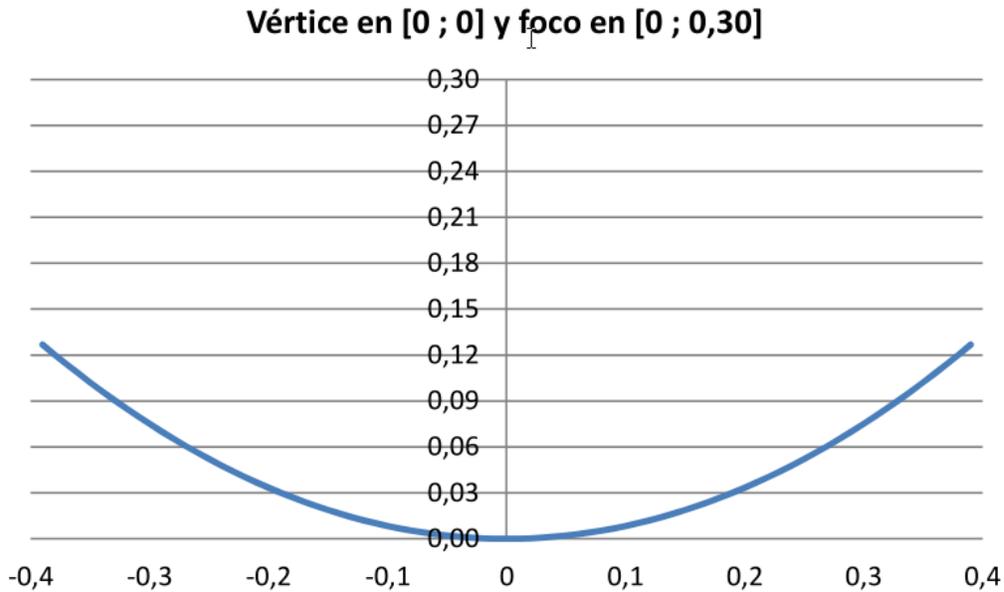


*Figura 2.9. Grafica de relación de focos con sus respectivas coordenadas de abertura máxima*

La abertura para un foco a 50cm de distancia es demasiado grande para las necesidades térmicas del proyecto, además de que la altura máxima sobre el vértice es de tan sólo 9cm, queda por tanto descartado. Para un foco a 20 cm, la altura  $Y_{max}$  es prácticamente la misma; estructuralmente este es el caso más favorable, pues foco

y altura máxima se pueden ajustar al mismo plano Z. Por último, para un foco a 30 cm, la relación distancia focal – altura máxima, queda a prácticamente el doble la una de la otra.

Dicho lo anterior, se decide que la distancia focal será de 30 cm. La parábola definitiva tiene las dimensiones siguientes: Foco=0,30 metros, lado curvo=1,2 metros y lado recto=0,78 metros.



*Figura 2.10 Gráfica del Perfil del canal parabólico (expresado en metros)*

**Cálculo del ángulo de abertura  $\alpha$  y de la distancia  $p$**

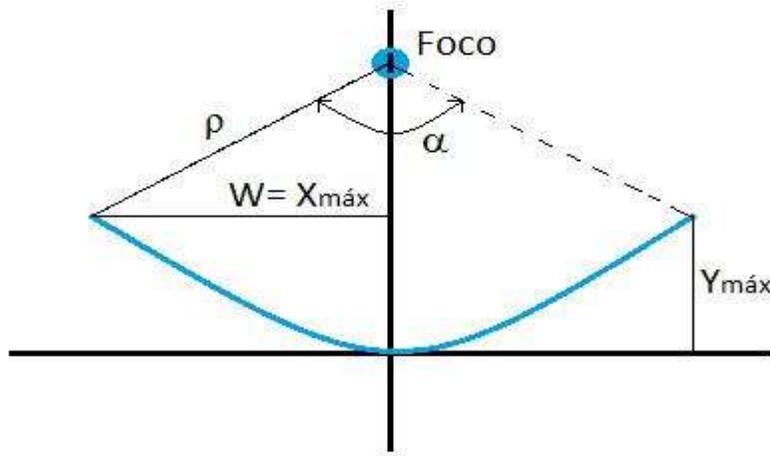


Figura 2.11. Esquema de las relaciones y distancias dentro del perfil del CCP

$$\text{Tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{x_{\max}}{f - y_{\max}} = \frac{0,39}{0,30 - 0,13} = 2,29$$

$$\alpha = 2 \times \arctg(2.29) = 113^\circ$$

$$\alpha = 2,32 \text{ rad}$$

$$\rho = \sqrt{w^2 + (f - y)^2} = \sqrt{0.39^2 + (0.30 - 0.13)^2}$$

$$\rho = 0,425\text{m}$$

### Cálculo del diámetro del tubo receptor

El Sol no es una fuente solar luminosa puntual. Visto desde la superficie de la Tierra, el disco solar que conforma corresponde a un ángulo de apertura de 32', por tanto la radiación solar directa sobre la superficie terrestre no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semiángulo igual a 16' alrededor de la línea que une el punto de observación con el centro del disco solar. Así, no todos los rayos de este cono alcanzarán un receptor de tamaño arbitrario, [Paredes V 2012].

El valor del diámetro mínimo que tiene que tener el tubo receptor depende principalmente de la distancia focal a través del valor de  $\rho$ , así para una un foco situado

a 30 cm sobre el vértice del colector, el diámetro mínimo se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\phi_{\min} = \frac{2 \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} 16'}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot \operatorname{tg} 16'}{\cos \frac{113}{2}}$$

$$\phi_{\min} = 0,99 \text{ cm} \approx 1 \text{ cm}$$

Si hacemos el mismo cálculo para un foco situado más bajo, el diámetro mínimo que se obtiene es de 13,8 cm, es decir, haría falta un tubo de ese diámetro para que, con el foco a esa distancia, el cono solar captase al tubo receptor.

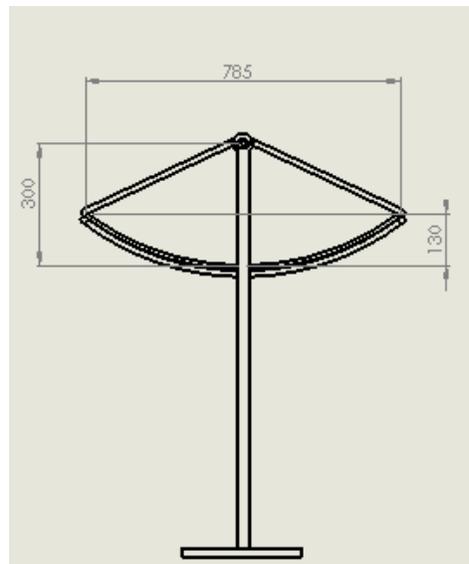


Figura 2.12. Vista de las dimensiones laterales del cilindro parabólico.

### Dimensionado del tubo receptor: Selección de diámetro, espesor, material y configuración del tubo receptor.

El receptor de absorción está compuesto por un tubo de acero AISI 347 de diámetro 13,8 cm. A forma de aislante, se recubre al tubo por la parte superior de una capa de fibra de vidrio, cuya conductividad térmica es de  $k_{f.vidrio}=0,036 \text{ W/ mK}$ . A su vez la parte inferior se deja el tubo desnudo.

Emisividad = 0,8

$$Q = \varepsilon_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \cdot F$$

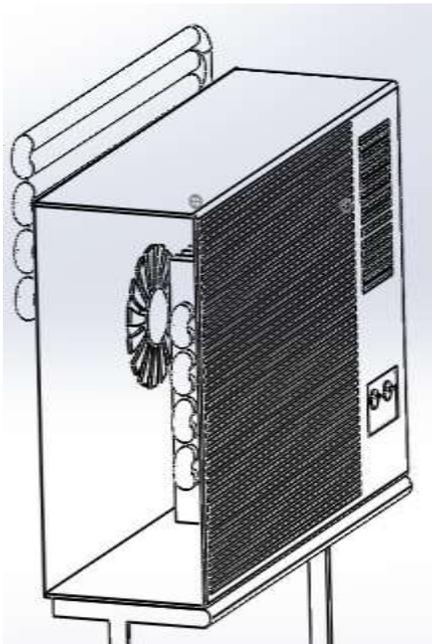
$$5kW/m^2 = 0,8 \left( \frac{180}{100} \right)^4 \cdot \pi \cdot d \cdot l$$

$$l = 1,8 \approx 2m$$



Figura.2.12. Vistas de la estructura de la parábola.

## 2.5 Propuesta del prototipo:



**2.6 Análisis económico, y medioambiental.**

**Valoración económica y ambiental de la propuesta.**

**Determinación del ahorro por concepto de disminución de consumo de energía eléctrica.**

Para realizar el análisis del beneficio económico del uso de la energía solar se tomaron como referencia los datos siguientes:

- Consumo nominal de un aire acondicionado de una capacidad de 12000 btu: 3,5 kW/h
- Tiempo de trabajo del aire acondicionado: 8 am a 3pm.
- Costo del kW/h:

(0 – 100) kWh	0,09 CUP
(101 – 150) kWh	0,30 CUP
(151 – 200) kWh	0,40 CUP
(201 – 250) kWh	0,60 CUP
(251–300) kWh	0,80CUP
(301–350) kWh	1,50CUP
(351–500) kWh	1,80 CUP

A partir de estos parámetros se calculó el consumo de energía eléctrica en el mes, el costo de la energía consumida en CUP, así como la cantidad de combustible necesario para generar le energía eléctrica consumida asumiendo que para generar un kWh se necesitan 360 g de combustible [Guzmán Chinaea, 2007]. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.5.

*Tabla 2.5. Valores de consumo mensual.*

	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Costo (CUP)</b>	<b>Combustible (kg)</b>
<b>Equipo</b>	490	441	176,4

Como se puede observar, para climatizar el local analizado se requiere un consumo de 490 kWh, con un costo ascendente a 441 CUP al mes. Por tanto al sustituir este equipo por el propuesto en esta investigación siendo utilizado en el horario señalado, se vería disminuido notablemente el consumo de energía eléctrica, y como consecuencia traería un ahorro monetario considerable del mismo, lo que se traduce que al año se ahorrarían \$4410.

**Periodo Simple de Recuperación**

Este método consiste en determinar el tiempo simple (meses, años, etc.) que tarda un inversionista para recuperar el capital invertido, ya sea por los ingresos que produce el proyecto o por los beneficios resultantes de aplicar alguna medida de ahorro de energía (ahorros en la facturación eléctrica). El número de meses o años en que se amortiza la inversión que requiere la aplicación de la medida recibe el nombre de período simple de recuperación.

$$\text{Período de Recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

Para determinar el valor de la inversión se tendrán en cuenta los siguientes datos que se muestran en la Tabla 2.6.

*Tabla 2.6. Desglose de los costos del proyecto.*

Componente	Costo unitario	Costo total
Concentrador solar cilíndrico parabólico	\$ 80,00 x m <sup>2</sup>	\$ 192 (para 2,4 m <sup>2</sup> )
Conductos	\$ 5,20 x m	\$ 15,6 (para la interconexión del sistema)
Tuberías de acero 10 mm	\$ 8,85 x m	\$ 127,44 (para la construcción del serpentín)
Elementos para la estructura		\$ 1 800, 00 (precio general estimado)

Mano de obra	\$ 500,00 salario promedio por trabajador	\$ 2 500,00 (para 5 trabajadores: soldador, mecánico, electricista, ayudante general y jefe de obra).
Costo total	\$4635	(se determinarán \$ 5 000,00 para dejar un margen para gastos adicionales

Tomando la ecuación:

$$\text{Período de Recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

$$\text{Período de Recuperación} = \frac{\$ 5000,00}{\$4410}$$

$$\text{Período de Recuperación} = 1,2 \text{ años}$$

**Determinación de los beneficios ambientales.**

Para analizar el impacto ambiental se tomó en cuenta la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera al quemarse la cantidad de combustible necesaria para generar la energía eléctrica utilizada en un año para la climatización del local analizado en el horario comprendido.

Con la disminución de 4900 kWh no solo se ahorra el equivalente a \$ 4 410 cada año, sino que también se evita que 1764 kg de petróleo sean quemados para suministrar esta energía, contrarrestando con ello el efecto invernadero que se ve beneficiado constantemente por el desprendimiento de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## **Conclusiones:**

Una vez culminado este trabajo se arriba a las conclusiones siguientes:

1. El estudio teórico realizado permite afirmar que la refrigeración por absorción constituye la alternativa viable para climatizar locales utilizando la energía solar térmica.
2. Se diseñó el evaporador, el condensador y el canal cilíndrico parabólico para la construcción de un primer prototipo.
3. El costo económico del prototipo es de 5 000.00 CUP y su inversión se recupera en 1,2 años.
4. El ahorro por la utilización de esta alternativa es de 4900kWh al año, equivalente a 1764 litros de petróleo, y evitando emitir a la atmósfera cuatro toneladas de CO<sub>2</sub>.

**Recomendaciones:**

Se recomienda que:

- 1- Que se construya y se pruebe el prototipo.
- 2- Se divulgue el resultado de esta investigación y se elaboren proyectos para continuar con el estudio del tema.

## Bibliografía:

- Arrastía, M. A., Ahorro de Energía y Respeto Ambiental., Editorial Política, Empresa de Gestión del Conocimiento y la Tecnología, La Habana, 2002, pp. 17-23.
- Arrastía, M. A., Corp S., Energía, el invencible dios Sol., Editorial Científico-Técnica, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 2013, pp. 48-58.
- CAÑADAS, M. E. & TORRES, G. A. 2010: *Diseño de un refrigerador por absorción para uso didáctico*. Tesis de grado. Universidad de El Salvador.
- CEREZO, R. J. 2006: *Estudio del proceso de absorción con amoníaco-agua en intercambiadores de placas para equipos de refrigeración por absorción*. Tesis doctoral. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona.
- “Colector de tubos de vacío”, Página dedicada a la venta de material para instalaciones solares, Informa sobre captadores de tubos de vacío, 12/2008.
- Ciencia y sociedad : Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029101>
- Cisneros Ramírez, C ,2013. Factibilidad del uso de la climatización solar de pequeña capacidad.
- “El Sol representa a la energía que ha permitido la existencia de los seres vivos en la Tierra”, Página sobre el sol y su importancia energética mediante la energía solar térmica, 12/2008.
- F.Lemini, A. Errougrtni, F-Bentaveb'Realisationexperimentale d'un refrigerateursolairea adsorptioná Rabat FIER' 2002 TetouanMaroc.
- Guia-del-Frio-Solar-fenercom-2011
- Míguez,J.A. noviembre 2010.Fundamentos de energía solar térmica,IFFI,UdelaR.

- “Nousol, Energías renovables: Suelo radiante”, Página web dedicada a las energías renovables solares, Expone un ejemplo de instalación solar con calefacción por suelo radiante y agua caliente sanitaria, 12/2008.
- Paredes Velasco, C, septiembre 2012 Diseño de captador solar cilíndrico parabólico.
- Revista de Ingeniería Energética, 2017, vol XXXVIII, n. 2, mayo/agosto, p. 143-152
- Renovable.cu, No 03/marzo 2017.
- Romero, J.A., Carbonell, T., Quevedo, V.F, Simulación de un sistema de refrigeración solar por absorción. Ingeniería Energética, 2016. XXXVII (2): p. 84-93. ISSN 1815 5901. Disponible en: [www.redalyc.org/pdf/3291/329145824009.pdf](http://www.redalyc.org/pdf/3291/329145824009.pdf).
- Stoecker W.F., 1988.
- Turrini, E., El camino del sol., Vol. 1, Editorial Cubasolar, La Habana, 2006.
- <https://www.researchgate.net/publication/298212575>
- Yazaki, “*WaterFiredChiller/Chiller-Heater*”, Texas(2004).
  - <http://www.nousol.com/articles/detail.php?id=26>
  - <http://www.servymant-renovables.com/coleptor-de-tubo-de-vacio-wshp-24-p-197.html>
  - <http://www.idae.es/>
- “Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía”, Pagina información sobre el ahorro energético, Información varia sobre el ahorro de energía y la sostenibilidad medioambiental, así como de las financiaciones o ayudas existentes, 02/2009.
  - <http://www20.gencat.cat/portal/site/icaen>

**Anexos:**

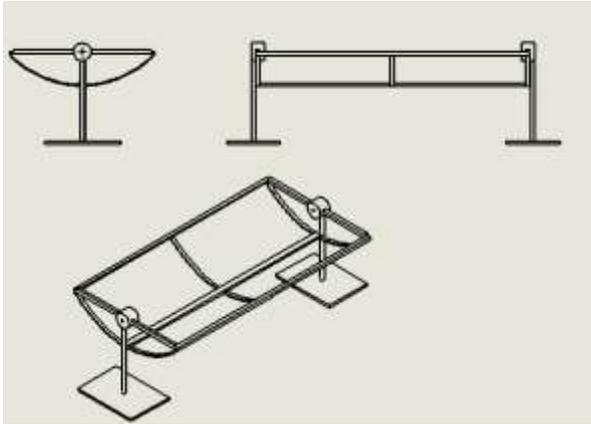
Anexo 1: *Captador de placa plana*



Anexo 2: *Captador de tubo de vacío*



Anexo 3: Diseños de la estructura del canal cilíndrico parabólico.



Anexo 4: Medidas de capilares en aire acondicionado

Anexo 5: Prototipo

Gentileza de PROVEN c.a.	Medidas de Capilares para Reemplazar en Aparatos de Acondicionado con R-717	
	B.T.U.	Capilar - CORTO
4500	36" X 042	80" X 049
5000	25" X 042	64" X 049
5500	20" X 042	52" X 049
6000	40" X 049	75" X 054
6500	35" X 049	65" X 054
7000	28" X 049	52" X 054
8000	36" X 054	65" X 059
9000	28" X 054	43" X 059
10.000	36" X 059	64" X 064
11.000	28" X 059	50" X 064
12.000	40" X 064	68" X 070
13.000	32" X 064	56" X 070
14.000	44" X 070	70" X 075
15.000	36" X 070	53" X 075
16.000	30" X 070	48" X 075
17.000	38" X 075	66" X 080
18.000	35" X 075	55" X 080
19.000	28" X 075	48" X 080
20.000	40" X 080	58" X 085

