



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Y METALURGIA**

“Evaluación de la operación de un campo de concentradores  
solares utilizado en el sistema de refrigeración por absorción  
de la planta HOLCIM-APASCO Hermosillo”

**TESIS**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presenta

**LARA GONZÁLEZ ADRIANA GUADALUPE**

Director

Dr. Rafael Enrique Cabanillas López

Hermosillo, Sonora

Junio, 2016

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## DEDICATORIA

A mis hermanos Naomi, Leobardo, Reyna y Julián. Gracias por el amor y apoyo incondicional que me han dado toda la vida.

A mi tía Patricia. Segunda madre, inspiración de vida e incansable docente de vocación admirable. Usted es lo máximo.

A Omar y Tito. Gracias por todos estos años junto a mí, por su amistad intacta, su cariño, por los momentos y sueños compartidos.

Para todas las mujeres maravillosas de Ingeniería Química que tuve la fortuna de conocer y entablar una amistad igual de especial que ellas: Arely, Alicia, Andrea, Gloria, Diana, Adilene, Marisol, Sonia, Delsia, Lidia. Gracias por su amistad incondicional, por estos años y todas esas cosas que compartimos. Las quiero.

Igualmente, a los chicos de Ingeniería Química, sin los que la carrera no hubiera sido la misma, gracias por su amistad, su cariño, sus risas, su tiempo y esos momentos llenos de alegría: Jesús Fco., Alfred, Ney, Gustavo, José Luis, Cesar, Juan Carlos, Víctor, Alexis, Rodolfo, Rafa, Ángel.

A todas y cada una de las personas que han ido formando parte de mi vida en épocas recientes, y a las que les he tomado especial cariño y aprecio: José, Juan, Iván, Fernanda, Sra. Conchita, Consuelo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradezco a mi director de tesis, el Dr. Cabanillas, por su confianza depositada en mí para llevar a cabo este trabajo, por toda su paciencia e imprescindible ayuda sin la que no se hubiera concretado adecuadamente el tema.

Un agradecimiento al jurado designado, conformado por el Dr. Víctor Manuel Sánchez Corrales, Dr. Ricardo Arturo Pérez Enciso y M.C. Pablo Sosa Flores, por su tiempo dedicado a la revisión de mi tesis. Aprecio en demasía sus observaciones, correcciones y consejos.

Agradezco a los ingenieros responsables del campo solar en la planta HOLCIM, Ing. Rigoberto Carrillo Macías, Ing. Mauricio Ricardo Vilchis Gómez, Ing. Gilberto Alonso Córdoba Gallego. Gracias por su tiempo, guía e imprescindible ayuda durante las visitas a la planta.

Agradezco profundamente a todos los académicos del Departamento de Ingeniería Química por sus invaluable enseñanzas a lo largo de mi trayectoria académica superior.

Un agradecimiento a la Secretaría de Educación Pública por la beca otorgada en apoyo a la Titulación de Licenciatura.

## CONTENIDO

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Dedicatoria.....       | i   |
| Agradecimientos.....   | ii  |
| Contenido.....         | iii |
| Índice de tablas.....  | v   |
| Índice de figuras..... | vi  |

### CAPÍTULO I

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| I.1 Introducción.....             | 1 |
| I.2 Antecedentes.....             | 2 |
| I.3 Justificación.....            | 3 |
| I.4 Objetivos.....                | 4 |
| I.4.1.Objetivo general.....       | 4 |
| I.4.2.Objetivos particulares..... | 4 |
| I.5 Metodología.....              | 4 |
| I.6 Estructuración de tesis.....  | 5 |

### CAPÍTULO II

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Generalidades de los colectores concentradores.....                                | 6  |
| II.2 Configuraciones de colectores solares.....                                         | 7  |
| II.3 Razón de Concentración.....                                                        | 9  |
| II.4 Concentradores de Canal Parabólico.....                                            | 10 |
| II.4.1 Tecnología de canal parabólico.....                                              | 11 |
| II.4.2 Aplicaciones de los concentradores de canal parabólico.....                      | 13 |
| II.5 Geometría de concentradores de imágenes lineales.....                              | 15 |
| II.6 Análisis óptico de un CCP.....                                                     | 18 |
| II.7 Dispersión de imagen causada por amplitud finita del sol y errores<br>ópticos..... | 21 |
| II.8 Pérdidas térmicas de un CCP.....                                                   | 23 |
| II.9 Eficiencia térmica de un colector CCP.....                                         | 25 |
| II.10 Descripción de campo solar HOLCIM-APASCO Hermosillo.....                          | 27 |

### CAPÍTULO III

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Refrigeración.....                                                                             | 32 |
| III.2 Refrigeración por compresión.....                                                              | 32 |
| III.3 Sistema de refrigeración por absorción.....                                                    | 36 |
| III.3.1 Sistema Amoniaco-Agua.....                                                                   | 38 |
| III.3.2 Sistema Agua-Bromuro de litio.....                                                           | 40 |
| III.3.3 Principales ventajas e inconvenientes de los sistemas de<br>refrigeración por absorción..... | 42 |
| III.3.4 Aplicaciones de los ciclos de absorción.....                                                 | 42 |
| III.4 Descripción de equipo enfriador instalado en HOLCIM-APASCO Hermosillo..                        | 45 |
| III.4.1 Descripción y datos técnicos de enfriador CARRIER SANYO 16LJ....                             | 45 |
| III.4.2 Descripción del ciclo de absorción CARRIER SANYO 16LJ11.....                                 | 47 |

## **CAPÍTULO IV**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Refrigeración solar.....                                               | 49 |
| IV.2 Refrigeración solar por absorción.....                                 | 50 |
| IV.2.1 Ciclos continuos de absorción.....                                   | 51 |
| IV.2.2 Ciclos intermitentes de absorción.....                               | 52 |
| IV.3 Sistema completo de refrigeración, Planta HOLCIM-APASCO Hermosillo.... | 53 |
| IV.3.1 Descripción de los equipos componentes.....                          | 53 |
| IV.3.2 Descripción de la operación del sistema.....                         | 55 |

## **CAPÍTULO V**

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| V.1 Cálculos y Resultados..... | 57 |
|--------------------------------|----|

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| Conclusiones y Recomendaciones..... | 61 |
| Bibliografía y Referencias.....     | 63 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla II.1 Datos Generales para concentradores solares de canal parabólico, SOPOGY, SopoNova® Fuente: Folleto técnico SOPOGY..... | 28 |
| Tabla II.2. Distribución de colectores y áreas efectivas. Fuente: Folleto técnico SOPOGY.....                                     | 31 |
| Tabla III.1 Datos generales para enfriadores CARRIER-SANYO 16LJ11. Fuente: Folleto técnico CARRIER.....                           | 46 |
| Tabla V.1. Datos de entrada y salida del sistema, para el día 30 de octubre del 2015.....                                         | 58 |
| Tabla V.2. Radiación directa Normal para el día 30 de Octubre del 2015, para un lapso de 10 minutos (10:50 a.m.-11:00 a.m.).....  | 59 |
| Tabla V.3. Eficiencia del campo solar, 30 de Octubre del 2015.....                                                                | 60 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura II.1 Configuraciones geométricas para colectores solares: a) receptor plano con reflectores planos, b) concentrador parabólico, c) reflector Fresnel, d) arreglo de helióstatos con receptor central. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.....                                             | 8  |
| Figura II.2 Esquema simplificado de un concentrador solar.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 9  |
| Figura II.3 Concentrador de Canal Parabólico comercial, instalado en la planta de demostración de sistema parabólico en Yanqing, Beijing, China. Fuente: Hi-Min Solar.....                                                                                                                                                    | 11 |
| Figura II.4 Elementos básicos del canal parabólico. Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Energías no Convencionales.....                                                                                                                                                                              | 12 |
| Figura II.5 Esquema simplificado de un concentrador de canal parabólico.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 13 |
| Figura II.6 Parte del complejo solar de SEGS. Fuente: National Renewable Energy Laboratory.....                                                                                                                                                                                                                               | 14 |
| Figura II.7 Parte del complejo solar de Mojave. Fuente: National Renewable Energy Laboratory.....                                                                                                                                                                                                                             | 14 |
| Figura II.8 Sección de un concentrador linear parabólico. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.....                                                                                                                                                                                                | 16 |
| Figura II.9 Dimensiones de imagen para un concentrador linear parabólico. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.....                                                                                                                                                                                | 16 |
| Figura II.10 Esquema de radiación reflejada desde el centro y el borde de la mitad de un reflector parabólico, con receptores mínimos del tipo plano, circular y semicircular, para interceptar toda la radiación reflejada desde una parábola completa. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman..... | 18 |
| Figura II.11 Pérdidas geométricas en los extremos de un CCP. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| Figura II.12 Bosquejo esquemático de errores a gran, mediana y micro escala de la superficie de un reflector. Fuente: Colectores solares, almacenamiento de energía y materiales, Francis de Winter.....                                                                                                                      | 22 |
| Figura II.13 Transferencia de calor en un elemento de colección de calor (receptor). Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                                                                                                                                                                   | 23 |
| Figura II.14 Modelo de resistencia térmica. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                                                                                                                                                                                                            | 24 |
| Figura II.15 Modelo simplificado de resistencias térmicas. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Figura II.16 Dimensiones de colector solar SopoNova® 4.1. Fuente: Folleto técnico SOPOGY.....                                                                                                                                                                                                                                 | 27 |



|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura II.17 Esquema en vista superior del colector con sus dimensiones.....                                                                                          | 27 |
| Figura II.18 Vista de corte lateral del colector con dimensiones.....                                                                                                 | 28 |
| Figura II.19 Esquema del arreglo del campo solar conectado a tierra.....                                                                                              | 29 |
| Figuras II.20 y II.21 Vista parcial del campo solar montado a suelo.....                                                                                              | 30 |
|                                                                                                                                                                       |    |
| Figura III.1. Diagrama esquemático que ilustra el ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....       | 33 |
| Figura III.2. Ciclo de refrigeración simple en diagrama de presión-entalpía. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                   | 34 |
| Figura III.3 Diagrama básico de refrigeración por absorción para enfriamiento de aire, con economizador. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....       | 36 |
| Figura III.4 Esquema del sistema de refrigeración por absorción amoniaco-agua. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                                 | 39 |
| Figura III.5 Esquema del sistema de refrigeración por absorción agua-bromuro de litio. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                         | 41 |
| Figura III.6 Sistema de cogeneración por motor a gas.....                                                                                                             | 43 |
| Figura III.7 Sistema de cogeneración por turbina a gas.....                                                                                                           | 44 |
| Figura III.8 Sistema de refrigeración con energía solar.....                                                                                                          | 44 |
| Figura III.9 Enfriador CARRIER-SANYO instalado en planta.....                                                                                                         | 45 |
| Figura III.10 Esquema de componentes de enfriador 16LJ CARRIER SANYO.....                                                                                             | 47 |
| Figura III.11 Esquema simplificado del ciclo de refrigeración por absorción para enfriador 16LJ.....                                                                  | 48 |
|                                                                                                                                                                       |    |
| Figura IV.1 Esquema simplificado de un sistema solar de acondicionamiento de aire por absorción. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman..... | 50 |
| Figura IV.2 Esquema de sistema de refrigeración por absorción impulsado con energía solar. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.....                     | 51 |
| Figura IV.3 Esquema del sistema de enfriamiento con máquina de absorción Chiller 16LJ. Edificio Administrativo Planta de Cemento HOLCIM-APASCO, Hermosillo.....       | 54 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuras V.1 y V.2 Captura del monitor de control del sistema campo solar-enfriador, para el día 30 de Octubre del 2015..... | 57 |
| Figura V.3 Gráfica de radiación directa Normal para el día 30 de octubre del 2015, 10:00a.m-12:00p.m.....                   | 60 |
| Figura V.4. Factores ópticos sobre concentrador de canal parabólico.....                                                    | 62 |

# Capítulo I

## I.1 Introducción

En los últimos años, a la par que la población, la demanda y gasto de energía eléctrica han aumentado de manera acelerada, por lo que el sector energético mundial se ha visto en la necesidad de explorar y ahondar en distintos campos para la obtención de este insumo, tratando así, de abastecer las necesidades energéticas de la población.

Como una alternativa al uso de combustibles convencionales, las energías renovables se presentan como la oportunidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones; a su vez, las tecnologías de energía renovable están mostrando finalmente madurez, así como la promesa de competitividad de costos. Es por esto, que el interés de invertir en el uso de dichas tecnologías, en especial de la energía solar, ha aumentado en años recientes.

La energía solar se define como una energía renovable obtenida a partir de la disposición de la radiación electromagnética procedente del Sol, en la que, tanto el calor y la luz pueden aprovecharse por medio de diversos captadores, como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica.

La energía solar comprende a todos los tipos de manifestaciones, en forma directa o indirecta, como la energía de los vientos, originada por el calentamiento diferenciado de las diversas capas de aire de la atmósfera; la energía almacenada en los seres vivos, aprovechable como biomasa; la energía fotovoltaica, que es susceptible a ser transformada (mediante el uso del efecto fotoeléctrico) en energía eléctrica; y el calor solar, que puede ser aprovechable como una fuente térmica de alta calidad.

De este último es donde se centra el interés para el desarrollo de esta investigación, ya que, entre las diversas finalidades del uso de energía solar, se encuentra la climatización de espacios en hogares, oficinas, escuelas, industria, etcétera, de manera que se pueda asegurar el confort adecuado en ambientes cerrados para las actividades diarias de las personas, principalmente en zonas cuyas temperaturas pueden resultar extremas (sobre los 40°C o menores a 0°C), donde la demanda de aire acondicionado y calefacción se está convirtiendo en uno de los focos de consumo energético más significativos de edificios, y esta demanda es cubierta por electricidad desde redes de distribución eléctrica, donde se provocan puntas de consumo considerable.

En este trabajo se presenta el arreglo y monitoreo de un sistema de refrigeración solar por absorción, mediante colectores solares del tipo canal parabólico, instalados en la empresa cementera HOLCIM APASCO planta Hermosillo.

## I.2 Antecedentes

La gama para el uso de instalaciones solares es muy diversa, y resulta evidente que su adecuado aprovechamiento, traería beneficios considerables en distintas áreas, no sólo a nivel mundial, sino regional; ya que el noroeste de México es una zona donde el nivel de radiación recibida, es similar al que se registra en el norte de África, el desierto de Atacama en Chile, o bien Sudáfrica y Australia (Conacyt, 2014); lo cual hace un proyecto de energía solar térmica o fotovoltaica totalmente viable.

Una aplicación interesante y conveniente, dadas las favorables condiciones de radiación solar de nuestro Estado, es la de sistemas que funcionan a base de energía solar térmica, es decir, sistemas de refrigeración por absorción, que a diferencia de los sistemas de refrigeración convencional, no requieren un compresor, siendo éste reemplazado por un receptor y un generador.

Para lograr lo mencionado anteriormente, se utilizan equipos diseñados específicamente para la captación de radiación solar, llamados colectores solares, los cuales se emplean para alimentar la máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío con el que se puede acondicionar el aire de los locales.

A partir de la base de funcionamiento de los sistemas de enfriamiento, así como de las temperaturas de operación, es que se pueden definir los niveles a los que pueden operar las tecnologías de frío solar. Es decir, se puede distinguir entre las máquinas de absorción de simple efecto y las de doble efecto. Las de doble efecto requieren agua sobrecalentada (120 -190 °C) o vapor para su funcionamiento (3 -10 bar), mientras que las de simple efecto pueden funcionar con agua caliente (80 - 95 °C).

En función de este parámetro estará condicionada la tecnología de colectores solares apropiada para suministrar la energía térmica que la máquina de absorción precisa para su funcionamiento. En el caso de las máquinas de simple efecto la utilización de colectores planos o colectores CPC ofrecen un buen aprovechamiento de la energía solar, y el costo respecto a otras tecnologías es significativamente más económico. Sin embargo, para la conexión a máquinas de doble efecto es preciso considerar colectores parabólicos. Sin embargo, es posible trabajar con estos colectores en un sistema de efecto simple.

El sistema de refrigeración solar que se ha estudiado funciona por el principio de absorción de agua-bromuro de litio, y es alimentado de agua caliente por un campo solar de colectores del tipo canal parabólico. La descripción detallada del funcionamiento del sistema completo, se tratará en capítulos posteriores.

### I.3 Justificación

La energía es el motor del crecimiento, un requerimiento esencial para el desarrollo económico y social, siendo fundamental su rol para asegurar un adecuado nivel de calidad de vida. Las energías renovables son la mejor solución para detener el calentamiento global y tener un mundo más ecológico.

Se han realizados esfuerzos importantes por parte de la comunidad internacional para la protección del medio ambiente como son el protocolo de Montreal y el protocolo de Kyoto. Bajo estos acuerdos internacionales es donde la tecnología relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar se reconoce como una solución apropiada para la generación de energía térmica y eléctrica.

Si bien las fuentes renovables de energía tienen gran potencial económico, sin olvidar desde luego su bajo impacto ambiental, hasta la fecha no han sido ampliamente explotadas y comercializadas.

Como ya se dijo en parte de la introducción, la refrigeración es un proceso que demanda una gran cantidad de energía eléctrica para su operación debido principalmente al trabajo requerido en el compresor. En regiones de climas cálidos o con veranos prolongados como los que se presentan en el noroeste de México con temperaturas ambientes que rebasan fácilmente los 40°C, la demanda eléctrica se triplica comparada con la presentada en otras estaciones del año.

Teniendo esto en cuenta, la empresa HOLCIM-APASCO planta Hermosillo, adquirió concentradores de canal parabólico para la instalación de su campo solar en el año 2011, con el fin de construir un suministro del flujo de agua caliente necesaria como fuente de energía para la operación de un equipo enfriador, sin necesidad de consumo adicional de energía eléctrica, además de la requerida para el funcionamiento de su bomba interna y equipo electrónico.

Sin embargo, desde un inicio se tuvieron dificultades con el arranque del equipo enfriador, lo que obstaculizó la puesta en marcha del sistema completo y resultó en un abandono prolongado de las instalaciones, tanto del enfriador como del campo solar. Para lograr las primeras corridas de refrigeración, primero se tuvo que arreglar el enfriador, lo que requirió tiempo y que conllevó a un deterioro en la instalación solar que se encontraba en desuso.

Una vez puesto en operación el enfriador, se presentaron nuevos problemas concernientes a la instalación solar del techo, ya que ésta fue completamente inhabilitada a causa de la temporada de lluvias del año 2015 en la zona. Sumado a esto, se tuvieron inconvenientes con el software del controlador de los colectores en lo concerniente al seguimiento solar y el adquisidor de datos. Es por lo dicho anteriormente, que se propone el tema de tesis citado, con la finalidad de que el trabajo de investigación sea capaz de brindar resultados satisfactorios, según los objetivos propuestos.

## **I.4 Objetivos**

### **I.4.1 Objetivo General**

- Evaluar la operación de un campo de concentradores solares cilindro-parabólicos que alimenta de agua caliente el sistema de refrigeración por absorción de la empresa HOLCIM-APASCO planta Hermosillo.

### **I.4.2 Objetivos particulares**

- Contar con un levantamiento de todos los componentes del campo de concentradores y del sistema de refrigeración.
- Describir el funcionamiento de los concentradores solares, y determinar su razón de concentración.
- Describir las principales partes del sistema de refrigeración y entender su funcionamiento a las condiciones de operación sugeridas.
- Hacer mediciones de los principales parámetros para calcular la eficiencia del campo de colectores.

## **I.5 Metodología**

- Revisión bibliográfica sobre concentradores solares.
- Para la comprensión del proceso de refrigeración por absorción y para entender el rol de los concentradores solares de media temperatura se hará una revisión bibliográfica.
- Se hará un levantamiento de los componentes del sistema integrando una base de datos donde se especifiquen dimensiones, capacidades y condiciones de operación.
- Se harán mediciones de incrementos de temperatura del agua en el campo solar para establecer su eficiencia.

## I.6 Estructuración de Tesis

En el presente capítulo, se hace una introducción al uso de energía solar, así como un breve resumen sobre los antecedentes del uso de tecnología solar para la refrigeración, que ayudarán a abordar en primera instancia el tema a tratar a lo largo del trabajo de investigación; de igual manera se presentan los objetivos del trabajo y la metodología.

En el capítulo II, se detalla información sobre los colectores solares del tipo canal parabólico, abreviado CCP, así como definiciones y ecuaciones asociadas a las eficiencias ópticas y térmicas que intervienen en el diseño de estos equipos de concentración solar. También se hace una descripción del campo solar instalado en HOLCIM APASCO, con anexos de información técnica de los equipos.

En el capítulo III se define el ciclo de refrigeración por absorción, tanto en sistema de Amoniaco-Agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ), como de Agua-Bromuro de Litio ( $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ), con fines comparativos. En la sección final se describe el equipo de enfriamiento utilizado por la empresa cementera y las especificaciones técnicas de dicho equipo.

En el capítulo IV se explica a detalle el ciclo de refrigeración solar por absorción, así como el funcionamiento del sistema completo instalado en HOLCIM-APASCO.

En el capítulo V se presentan los cálculos y resultados a partir de los datos experimentales obtenidos del sistema de HOLCIM APASCO.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

# Capítulo II

## II.1 Generalidades de los colectores solares

Los colectores solares de energía son un tipo de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica. La clasificación de colectores solares puede realizarse en dos categorías: los que tienen sistema de concentración y los que carecen de éste. En un colector no concentrador con seguimiento aparente del sol, el área de abertura del colector es igual al área de recepción, mientras que en un colector concentrador con seguidor solar, el área de abertura es más grande que el área de recepción.

Para muchas aplicaciones, es deseable un suministro de energía proporcionado por altas temperaturas. Para lograr esto, es necesario reducir el área donde ocurre la pérdida de calor y así incrementar la temperatura hasta obtener los valores de trabajo deseados, es decir, la energía solar se concentra teniendo una mayor densidad de flujo radiativo por unidad de área. Lo anterior se puede lograr incluyendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie de absorción de energía; de manera que la pérdida de energía sea menor comparada con un colector de placa plana.

En estos equipos, la energía proveniente del sol se concentra en un dispositivo receptor donde dicha energía se absorbe en la superficie y se transforma en calor por conducción. Este calor es removido por un fluido (normalmente aire, agua, o aceite) que fluye a través del receptor. Dependiendo de la óptica utilizada para llevar a cabo la concentración de la energía solar, los colectores concentradores se pueden clasificar en concentradores de imagen, que tienen una relación intermedia de concentración y forman una imagen bien definida del sol; o de no-imagen, con baja relación de concentración, sin imagen definida del sol.

Diversos diseños han sido establecidos para los colectores de concentración. Los concentradores pueden ser reflectores o refractores, cilíndricos o superficies de rotación, así como continuos o segmentados. Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos, y pueden estar cubiertos o descubiertos, y las relaciones de concentración pueden variar en algunos órdenes de magnitud.

Los colectores concentradores tienen ciertas ventajas comparados con los colectores planos convencionales:

- Se obtienen mayores temperaturas en un colector concentrador para la misma superficie de colección. Esto significa que se puede lograr una mejor eficiencia termodinámica.
- La eficiencia térmica es mayor debido a que el área de pérdida de calor es pequeña comparada con el área de recepción.
- Es económicamente viable el tratamiento de superficies selectivas y la instalación de tubos de vacío para reducir pérdidas de calor.



Las desventajas son:

- Los sistemas de concentración prácticamente no colectan la radiación difusa y sólo aprovechan la radiación solar directa. Por lo tanto, no pueden funcionar en días nublados.
- Se requiere de un sistema de seguimiento del movimiento aparente del Sol, de forma que se intercepte la radiación directa y mejore su eficiencia.
- Las superficies reflectivas pueden perder su reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

Este tipo de sistemas de concentración pueden ser rotados para seguir al Sol de manera que intercepten la mayor cantidad de radiación directa posible. Pueden tener uno o dos ejes, y pueden estar orientados norte-sur o este-oeste.

## II.2 Configuraciones de colectores solares

Los colectores solares de concentración, tienen como propósito el aumentar el flujo de radiación solar sobre los receptores. Pueden ser cilíndricos para enfocar en una línea, o circulares para enfocar en un punto; reflectores o refractores, formar imagen solar o no, pueden ser cóncavos, planos o convexos; y según sus configuraciones geométricas, mostradas en la figura II.1, se identifican como: receptor plano y concentrador-reflector plano (fig. II.1.a) tiene un bajo índice de concentración; se aprovecha en el receptor parte de la componente solar difusa incidente sobre el colector; colector con concentrador-reflector cilíndrico parabólico y receptor tubular (fig. II.1.b), es el modelo más usado y en el que el tubo receptor se encuentra a lo largo de todas las posiciones focales. La temperatura alcanzada en el mismo puede llegar a ser del orden de los 300°C, suficiente para muchas aplicaciones; reflector Fresnel (Fig. II.1.c), las superficies pueden ser planas o curvas, estando diseñada cada una para reflejar individualmente la radiación sobre el receptor; su gran ventaja radica en su facilidad de construcción, siendo muy interesante su utilización en colectores solares de gran potencia y alta temperatura. Arreglo de helióstatos con receptor central (Fig. II.1.d), donde los reflectores pueden ser montados y posicionados individualmente; en grandes arreglos de helióstatos de este tipo, los receptores montados en una torre, son llamados colectores de *Torre Central*.



a)



b)



c)



d)

Figura II.1. Configuraciones geométricas para colectores solares: a) receptor plano con reflectores planos, b) concentrador parabólico, c) reflector Fresnel, d) arreglo de helióstatos con receptor central. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.

Existe una amplia variedad de medios que permiten aumentar el flujo de la radiación solar sobre un receptor pudiéndose clasificar teniendo en cuenta una serie de factores, como:

- El que sean lentes o reflectores
- Por el sistema de montaje y modelo de orientación
- Por la magnitud de la concentración de radiación que son capaces de conseguir
- Por los materiales utilizados en su construcción
- Por los fluidos térmicos que se van a utilizar que dependen de sus aplicaciones, etc.

### II.3 Razón de concentración

Un concepto fundamental en concentración solar es precisamente la razón de concentración. Las dos definiciones habituales que se pueden dar de concentración son la de área o geométrica y la óptica o de flujo. La concentración geométrica se define como la razón entre el área de apertura y el área del receptor, es decir (ver Figura II.2).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.1)$$

Existe un compromiso directo entre el aumento de la concentración geométrica y la reducción del costo del colector, ya que los colectores con altas concentraciones deben ser fabricados con precisión, y a su vez la precisión de un concentrador influye en su costo.

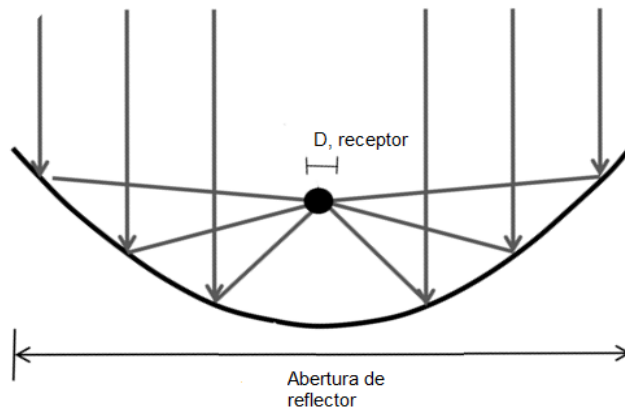


Figura II.2 Esquema simplificado de un concentrador solar.

La razón de concentración geométrica definida anteriormente, es una medida de la concentración ideal promedio de flujo radiativo solar si está uniformemente distribuido sobre el área de apertura del receptor. Los concentradores reales no producen este tipo de flujo uniforme, en cambio, producen una serie compleja de niveles de flujos altos y bajos distribuidos en el área de la apertura del reflector. Generalmente, el perfil de flujos concentrados tiene picos en el centro y disminuye hacia los extremos del área del receptor como una distribución normal o gaussiana.

La concentración óptica o de flujo en un punto es definida como la razón del flujo en ese punto al flujo solar incidente

$$C = \frac{I_r}{I_a} \quad (2.2)$$

Es típico encontrar picos de concentración óptica de 3 a 5 veces el valor de la concentración geométrica.

## **II.4 Concentradores de Canal Parabólico**

Los concentradores más comunes comercialmente son los llamados de canal parabólico (CCP) para la concentración de energía solar, en el que se obtienen altas temperaturas sin degradaciones graves en la eficiencia del colector. La clasificación de colectores solares puede realizarse en dos categorías: los que tienen sistema de concentración y los que carecen de éste. En un colector no concentrador con seguimiento aparente del sol, el área de abertura del colector es igual al área de recepción, mientras que en un colector concentrador con seguidor solar, el área de abertura es más grande que el área de recepción. De éstos últimos, se puede hacer una clasificación según las temperaturas de operación:

- **Colectores de baja temperatura.**

Proveen calor útil a temperaturas menores de 65°C mediante receptores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el calor de proceso no es mayor de 60°C, por ejemplo la pasteurización, el lavado textil, etc.

- **Colectores de temperatura media.**

Son los dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 300°C. En esta categoría se tiene a los concentradores estacionarios y a los canales parabólicos, todos ellos efectúan la concentración mediante espejos dirigidos hacia un receptor de menor tamaño. Tienen el inconveniente de trabajar solamente con la componente directa de la radiación solar por lo que su utilización queda restringida a zonas de alta insolación.

- **Colectores de alta temperatura.**

Existen en tres tipos diferentes: los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central. Operan a temperaturas superiores a los 500°C y se usan para generar electricidad (electricidad termosolar) y transmitirla a la red eléctrica; en algunos países estos sistemas son operados por productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotas o escasas.

#### II.4.1 Tecnología de canal parabólico.

La figura II.3 muestra ilustrativamente la forma de un colector de este tipo. Están constituidos por: un reflector que tiene forma parabólica, el cual concentra la luz solar en una línea focal o en un punto focal. La construcción de esta superficie parabólica es normalmente una lámina de metal pulido, aunque también se pueden utilizar segmentos de espejos inclinados; un receptor, que se haya en la línea focal. Consiste en un tubo de metal, usualmente introducido en un tubo vidrio al vacío que reduce las pérdidas de calor por radiación y convección. El resto de la montura se trata de la base y los mecanismos de seguimiento solar. La figura II.4 muestra las partes que constituyen a un concentrador de canal parabólico, según la descripción anterior.

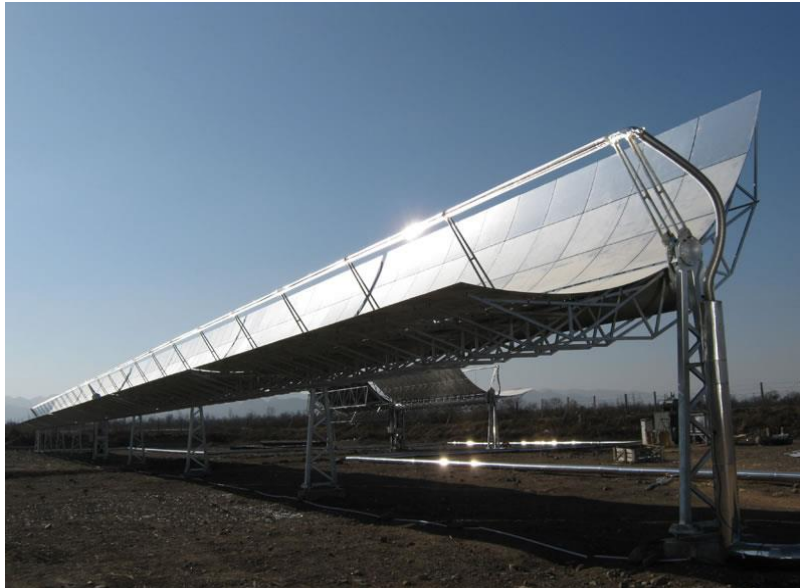


Figura II.3. Concentrador de Canal Parabólico comercial, instalado en la planta de demostración de sistema parabólico en Yanqing, Beijing, China. Fuente: Hi-Min Solar.

Los colectores de canal parabólico normalmente siguen al sol utilizando una de las tres orientaciones: este-oeste, norte-sur, o polar, siendo este-oeste y norte-sur las configuraciones más sencillas para instalar en grandes conjuntos; el seguimiento solar puede realizarse para cada una de las orientaciones a través de softwares de programación que controlen los motores de seguimiento.

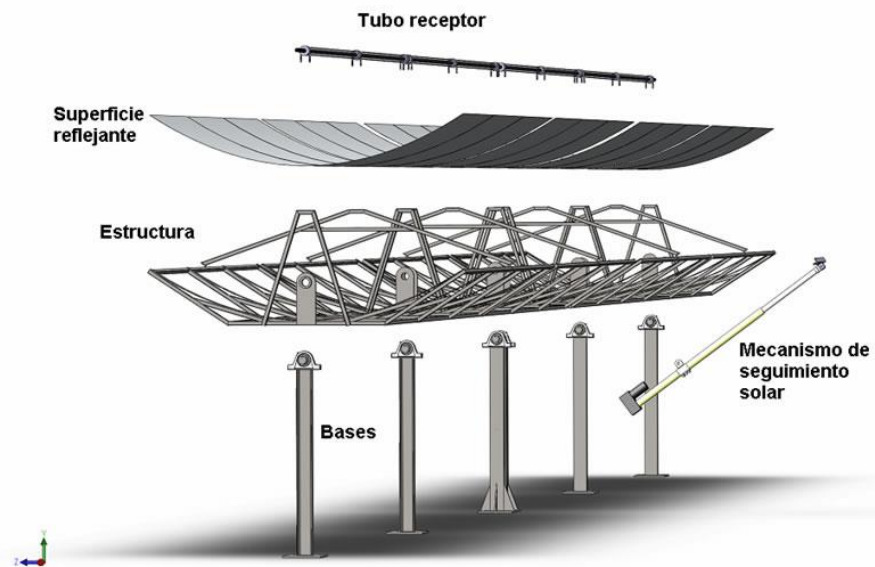


Figura II.4. Elementos básicos del canal parabólico. Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Energías no Convencionales.

Fueron utilizados por primera vez en la década de 1870 por el sueco-americano Jhon Ericsson, quien hizo funcionar su máquina de aire caliente con un concentrador parabólico. En 1907 se patentó el diseño de sobre concentradores parabólicos por el Dr. Wilhem Maier y Adolf Remshardt, y a finales de 1913, Frank Shumann inauguró la primera planta solar que trabajaba con canales parabólicos, alcanzando 55 caballos de potencia y una captación del 40% de la energía solar disponible, sin embargo, fue cerrada en 1915 debido a la primera guerra mundial.

Las temperaturas generadas por los concentradores de canal parabólico se logran debido a la concentración de la energía solar por el reflector parabólico. En un concentrador de este tipo, se aprovecha la radiación directa del sol. Cuando el concentrador está adecuadamente orientado, los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica e inciden en una región a lo largo de una línea que corresponde al foco de la sección transversal del canal parabólico, como se muestra esquemáticamente en la figura II.5 En esta línea focal está colocado un receptor normalmente cilíndrico, donde la radiación es absorbida y trasformada en energía térmica. Dicha energía es removida mediante un fluido con propiedades térmicas adecuadas, ya sea agua o algún aceite térmico, y posteriormente es utilizada como calor. Las pérdidas térmicas de este sistema son en su mayor parte debidas a la convección (velocidad del viento) y la radiación emitida en la superficie del receptor (temperaturas por arriba de los 400° C).

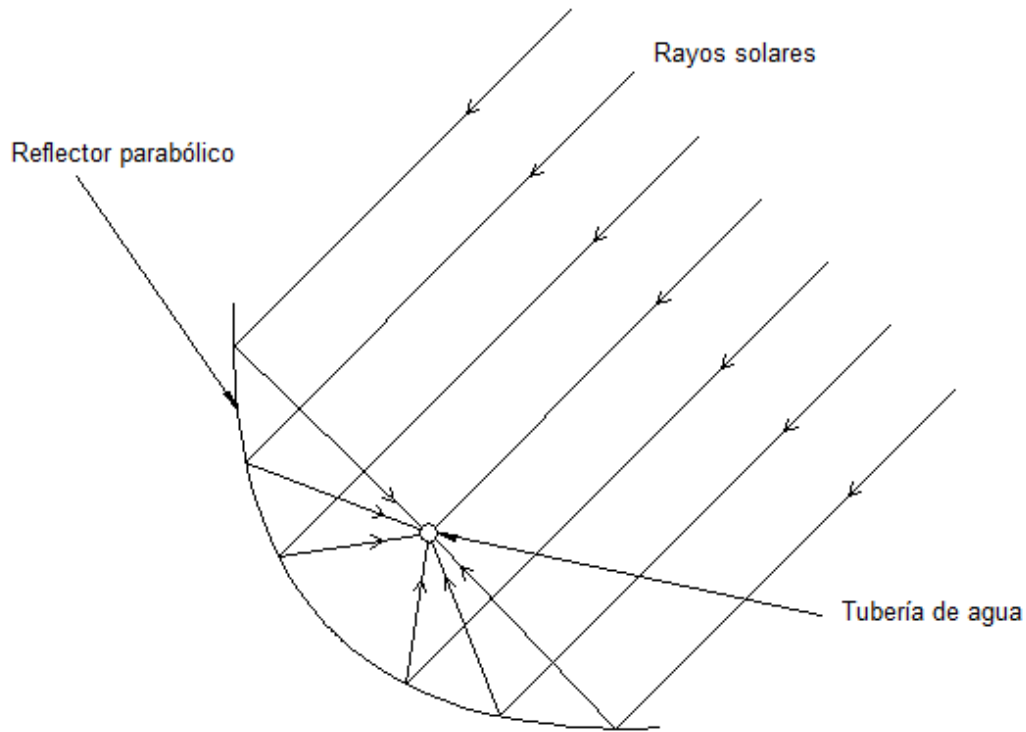


Figura II.5. Esquema simplificado de un concentrador de canal parabólico.

El receptor está localizado en la línea focal del canal parabólico e incluye al receptor (asociado con cubiertas y aislamiento).

El receptor es comúnmente un conducto por donde circula el fluido que transporta el calor hacia una máquina térmica para su utilización. El sistema debe estar motorizado para seguir el movimiento del sol ya que el concentrador debe obtener el máximo posible de radiación solar directa y formar una imagen del sol en el receptor lineal. El requerimiento de rastreo en conjunto con el uso de materiales que deben resistir altas temperaturas, eleva el costo y mantenimiento de estos sistemas hasta el punto en que se restringe su uso a instalaciones de gran escala.

#### II.4.2 Aplicaciones de los concentradores de canal parabólico

Los usos de los colectores solares del tipo canal parabólico, resultan acertados si se combinan con ciclos de:

- Generación de energía eléctrica
- Generación de calor de proceso para industrias y comercios
- Sistemas de aire acondicionado para industrias y comercios

Siendo el proceso de generación de energía eléctrica la aplicación más importante que se le da a este tipo de colectores. Actualmente existe una larga lista de instalaciones eléctricas termosolares, entre las cuales podemos mencionar la

Solar Energy Generating Systems (SEGS), ubicada en el desierto de Mojave, en California, Estados Unidos con una capacidad de 354MW (Figura II.6); Mojave Solar Project, en Barstow, California, con una capacidad de 280MW (Figura II.7); Solana Generating Station, en Gila Bend, Arizona, con una capacidad de 280MW, etcétera.



Figura II.6 Parte del complejo solar de SEGS. Fuente: National Renewable Energy Laboratory



Figura II.7 Parte del complejo solar de Mojave. Fuente: National Renewable Energy Laboratory



Estas resultan ser las estaciones de mayor capacidad de generación en el mundo, y que cuentan, como ya se dijo, con la tecnología de concentración de canal parabólico. Al igual que Estados Unidos, también hay otros países involucrados en este tipo de proyectos, como el caso de España, Sudáfrica, Marruecos y Emiratos Árabes Unidos, por mencionar los de mayor generación.

## **II.5 Geometría de concentradores de imágenes lineales.**

Los concentradores lineales con sección transversal parabólica han sido estudiados extensamente tanto analítica, como experimentalmente, y han sido propuestos y utilizados para aplicaciones que requieren razones de concentración intermedias y temperaturas con rangos de 100 a 500°C. El receptor usado con este concentrador es cilíndrico y está cerrado en una envoltura tubular evacuada; se han utilizado receptores planos para este tipo de reflectores.

Para comprender cómo operan estos colectores, es necesario describir las propiedades ópticas de los concentradores y las imágenes (la distribución del flujo solar a través del foco) que producen. Esta sección aborda la geometría de los reflectores y la amplitud de las imágenes producidas.

Imágenes teóricas, son aquellas producidas por concentradores perfectos que están perfectamente alineados, dependiendo de la geometría del concentrador. Las secciones transversales de un concentrador linear parabólico son mostradas en la figura II.8 y II.9. La ecuación de la parábola, en términos del sistema de coordenadas mostrado, es

$$y^2 = 4fx \quad (2.3)$$

La abertura es  $a$ , y la longitud focal (la distancia desde el punto focal al vértice) es  $f$ .

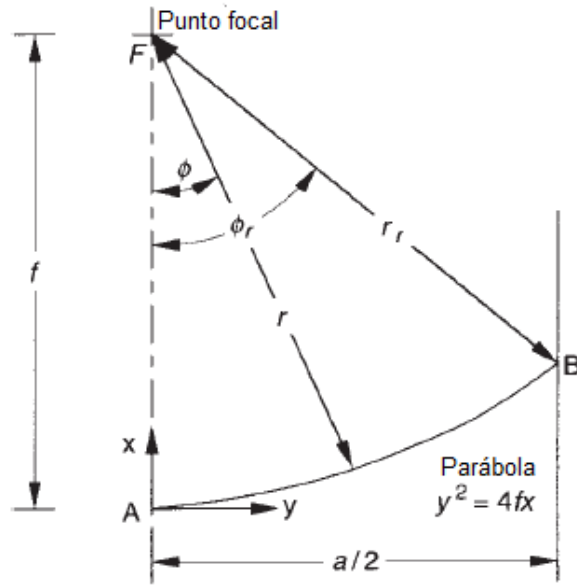


Figura II.8. Sección de un concentrador lineal parabólico. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.

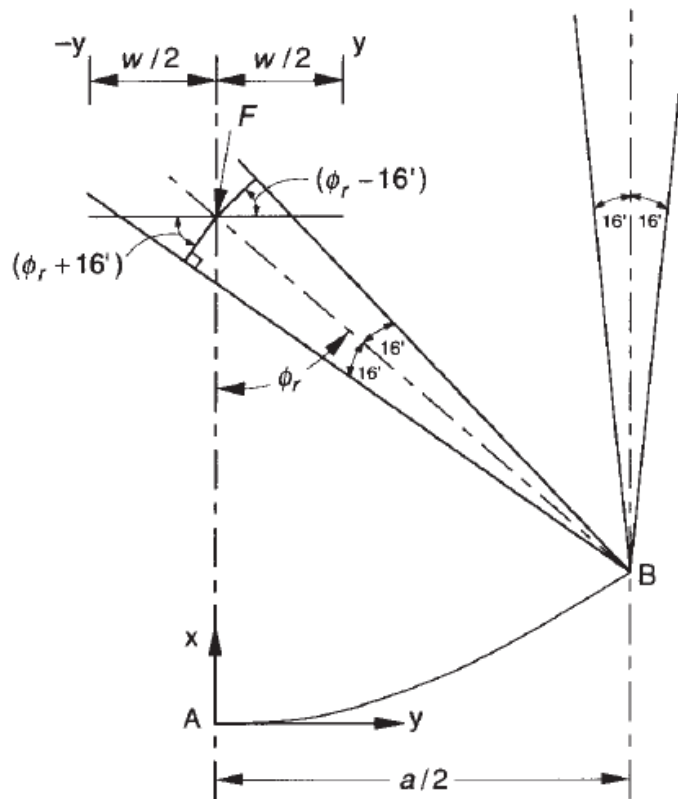


Figura II.9. Dimensiones de imagen para un concentrador lineal parabólico. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.

El haz de radiación mostrado en la figura II.9 es incidente en el reflector en el punto B para el borde donde el radio del espejo es máximo a  $r_r$ . El ángulo  $\phi_r$  es el ángulo de borde, descrito por AFB, y está dado por

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8\left(\frac{f}{a}\right)}{16\left(\frac{f}{a}\right)^2 - 1} \right] = \text{sen}^{-1} \left( \frac{a}{2r_r} \right) \quad (2.4)$$

Para cualquier punto del reflector parabólico el radio de espejo local es

$$r = \frac{2f}{1 + \cos\phi} \quad (2.5)$$

Un haz incidente de radiación solar es un cono con amplitud angular de  $0.53^\circ$  (eso es, medio ángulo  $\theta_s$  de  $0.267^\circ$ , o  $16'$ ). Para los presentes propósitos, se asume que el concentrador es simétrico y que el haz de radiación es normal a la apertura. Así, el haz de radiación es incidente en el concentrador en una dirección paralela al plano central de la parábola (el plano x-z descrito por el eje y el foco de la parábola).

La figura II.10 muestra esquemáticamente cómo la radiación reflejada desde el borde de la parábola determina la amplitud de la zona focal. La amplitud de la imagen solar en el plano focal incrementa a la par que el ángulo de borde. Los tamaños mínimos de receptores planos, circulares y semicirculares centrados en el punto focal para interceptar toda la radiación reflejada son mostrados. Es claro en este diagrama que el ángulo de incidencia de radiación en la superficie de cualquier forma de estos receptores es variable.

Para reflectores parabólicos especulares de forma y alineación perfectas, el tamaño del receptor para interceptar toda la imagen solar, puede ser calculado. El diámetro  $D$  de un receptor cilíndrico es

$$D = 2r \text{sen} 0.267 = \frac{a \text{sen} 0.267}{\text{sen} \phi_r} \quad (2.6)$$

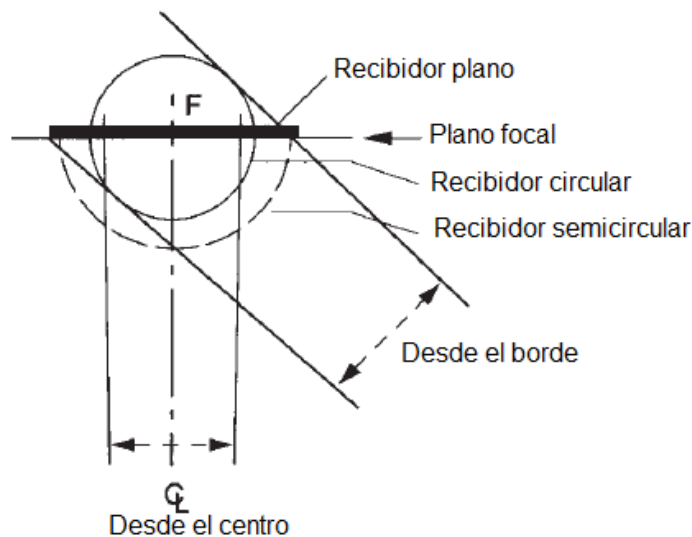


Figura II.10. Esquema de radiación reflejada desde el centro y el borde de la mitad de un reflector parabólico, con receptores mínimos del tipo plano, circular y semicircular, para interceptar toda la radiación reflejada desde una parábola completa. Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.

La longitud para un receptor plano también puede ser calculada, sin embargo, para los intereses del desarrollo del presente trabajo, no se incluirán en este apartado.

La longitud focal es un factor determinante en el tamaño de imagen, y la abertura es el factor determinante en la energía total; así, el brillo de la imagen o la concentración de flujo de energía en el receptor de un sistema enfocado será función de la razón  $a/f$ .

## II.6 Análisis óptico de un CCP

La meta del análisis óptico para un colector solar es calcular la eficiencia óptica  $\eta_0$ , que se define como la fracción de la radiación solar incidente en la abertura del colector, cuando ésta apunta directamente al sol, que es absorbida por el receptor. Hay que señalar que el término colector, significa el ensamble completo del concentrador (reflector o lente) y el receptor (receptor más el recubrimiento asociado).

Los factores básicos que entran en el análisis óptico de colectores solares tipo CCP son:

- La reflectancia de los reflectores de vidrio limpio,  $\rho$ . Los espejos limpios de vidrio plateado utilizados en los CCP tienen una reflectancia alrededor de 0.93-0.94.

- La transmitancia de la cubierta de vidrio del receptor,  $\tau$ . El valor típico de la transmitancia es 0.93. Sin embargo, puede aumentar hasta más de 0.96 si se aplican cubiertas anti-reflectivas en ambos lados del vidrio.
- La absortancia del receptor,  $\alpha$ . Los valores típicos de  $\alpha$  para receptores selectivos son 0.94-0.95.
- El factor de intercepción  $\gamma$ .

Este último se define como la fracción de la incidencia de los rayos solares en la abertura del colector que alcanzan el receptor. Una fracción de los rayos reflejados del espejo no alcanza al receptor, esto a causa de las imperfecciones del espejo, errores geométricos en la forma del reflector parabólico, deformaciones mecánicas del CCP durante el seguimiento, ensombrecimiento debido a fuelles flexibles y los soportes del receptor. Dejando de lado las imperfecciones del espejo, el intercepto para un ángulo de  $0^\circ$  de incidencia puede considerarse formado por tres factores: errores geométricos en la forma del canal parabólico,  $\gamma_1$ ; ensombrecimiento por fuelles flexibles y soportes del receptor,  $\gamma_2$ ; y deformación mecánica de la estructura de soporte durante el seguimiento solar,  $\gamma_3$ ; el factor de intercepción está dado por

$$\gamma = \gamma_1\gamma_2\gamma_3 \quad (2.7)$$

Los valores típicos de los factores de intercepción para CCP son  $\gamma_1 = 0.97$ - $0.98$ ,  $\gamma_2 = 0.96$ - $0.97$ ,  $\gamma_3 = 0.99$ , lo que da un factor de intercepción  $\gamma$  en el rango de  $0.92$ - $0.94$ . Por lo tanto, la eficiencia óptica máxima de un concentrador de canal parabólico a un ángulo de  $0^\circ$  de incidencia es

$$\eta_{0max} = \rho\tau\alpha\gamma \quad (2.8)$$

Durante la operación, la eficiencia óptica de un CCP es mucho menor que la eficiencia máxima debido al ángulo de incidencia, el ensuciamiento de los espejos y la cubierta de vidrio del receptor, y las pérdidas en los extremos, que representan la fracción del receptor que no es iluminado por los rayos incidentes en la apertura del canal.

El ángulo de incidencia del haz sobre la abertura del CCP afecta a los cuatro parámetros que comprenden la eficiencia óptica. El efecto es cuantificado por el modificador de ángulo de incidencia,  $K(i)$ , por un ángulo de incidencia,  $i$ , el cual es definido por

$$K(i) = \frac{\eta_{oi}}{\eta_{o(i=0)}} \quad (2.9)$$

Otro factor geométrico son las pérdidas en los extremos atribuidas al ángulo de incidencia, que representan la fracción del tubo del receptor no iluminada por la radiación reflejada. De la figura II.11 el factor de pérdidas en los extremos  $F_{el}$  está dado por

$$F_{el} = \frac{(L_c - z)}{L_c} = 1 - \frac{r}{L_c} \tan i \quad (2.10)$$

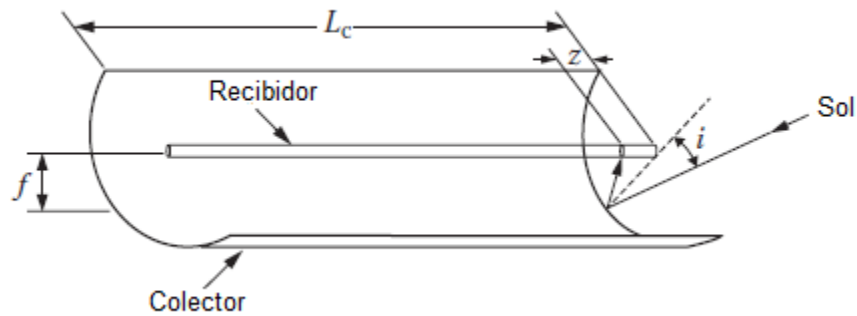


Figura II.11 Pérdidas geométricas en los extremos de un CCP. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

Donde  $r$  es mostrado en la figura II.6. Lippke (1995) propuso usar  $r = f$ , lo que es utilizado en muchas simulaciones. Por lo tanto,

$$F_{el} \approx 1 - \frac{f}{L_c} \tan i \quad (2.11)$$

Gaul y Rabl (1979) propusieron utilizar un valor promedio de  $r$ , el cual para un CCP de amplia abertura  $a$ , da un  $F_{el}$

$$F_{el} = 1 - \frac{f}{L_c} \left( 1 + \frac{a^2}{48f^2} \right) \tan i \quad (2.12)$$

Finalmente, el ensuciamiento de los espejos con el paso del tiempo resulta en pérdidas, cuantificadas por el factor de ensuciamiento  $F_s$ . Éste es definido como la relación de la reflectancia promedio del espejo en operación con la reflectancia nominal del espejo cuando está limpio (Zara Moya, 2012). Por ejemplo, si la reflectancia del espejo limpio es 0.95, y el espejo es lavado cuando la reflectancia

cae a 0.9, entonces la reflectancia promedio del espejo es 0.925 y el  $F_s$  es  $0.925/0.95=0.97$ .

Por lo tanto, la eficiencia óptica de un CCP se obtiene

$$\eta_0 = \eta_{0max} F_{el} F_s K(i) = \rho \tau \alpha \gamma F_{el} F_s K(i) \quad (2.13)$$

## II.7 Dispersión de imagen causada por amplitud finita del sol y errores ópticos.

En principio, cualquier colector, incluso los de placa plana, puede ser construido para seguir al sol, pero en la práctica por lo general se va a recurrir al seguimiento en colectores con alta razón de concentración. Por lo tanto, el ángulo de aceptación para colectores con seguimiento es relativamente pequeño. Dado que la radiación solar directa no es perfectamente paralela sino que viene en un rango de direcciones con propagación causada por errores ópticos, el receptor debe exceder un tamaño mínimo para que pueda interceptar la mayor cantidad de radiación incidente en la apertura dada del colector.

La elección del tamaño óptimo ideal del receptor involucra un compromiso entre el desempeño óptico y térmico. Si el receptor resulta demasiado grande, la mayoría de la radiación solar incidente será interceptada, pero la pérdida de calor resultará excesiva. Por otro lado, un receptor pequeño tiene poca pérdida de calor pero se pierde demasiada de la radiación solar disponible. La razón óptima de concentración se encuentra igualando la pérdida gradual de calor con la pérdida gradual óptica. Un análisis apropiado de estos efectos necesita tener en cuenta la distribución angular de la radiación solar directa y los errores ópticos.

La ley de reflexión de Snell es una idealización basada en superficies perfectamente lisas. Las superficies reales tienden a tener irregularidades, desde rugosidades microscópicas hasta ondulaciones macroscópicas. Además, las superficies de reflectores reales no se conformarán exactamente a la forma del diseño, y los colectores de seguimiento pueden tener errores de alineamiento. Todos estos efectos contribuyen al alargamiento de la zona focal en un concentrador solar.

Cuando se habla de las características de superficies reflectoras, es de gran utilidad distinguir tres escalas, que se ilustran en la figura II.12 La línea punteada muestra la forma diseñada de la superficie, en este caso una parábola. La línea sólida muestra la superficie real del reflector con sus ondulaciones. Y finalmente, la línea discontinua representa los promedios de las ondulaciones. La diferencia entre la forma de diseño (línea punteada) y la forma promedio (línea discontinua)

representa los errores ópticos a gran escala causados por gravedad, viento, tensión o errores de manufactura. La ondulación, con longitudes típicas de onda que varían del orden de centímetros a decímetros, representa errores de mediana escala. Finalmente está la pequeña escala, dada por rugosidades microscópicas que causan dispersiones lejos de la dirección especular.

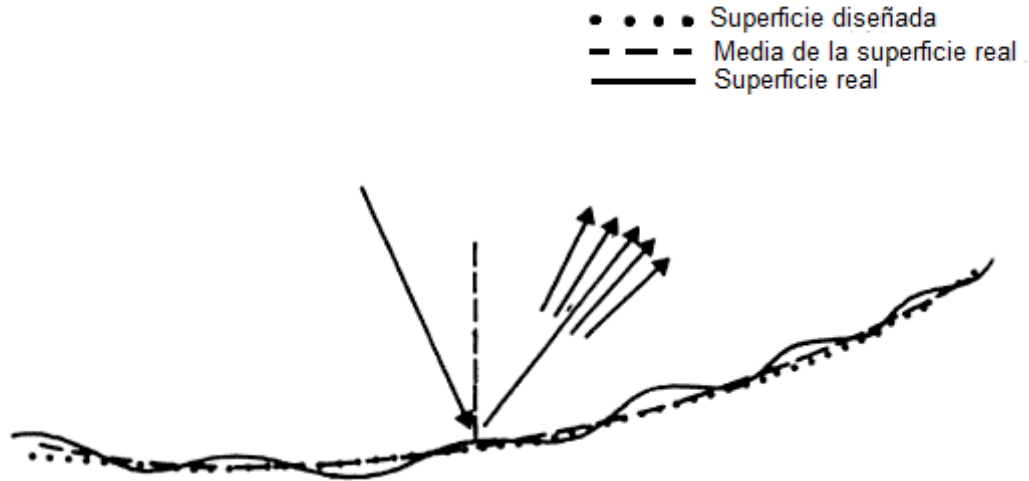


Figura II.12 Bosquejo esquemático de errores a gran, mediana y micro escala de la superficie de un reflector. Fuente: Colectores solares, almacenamiento de energía y materiales, Francis de Winter.

Los errores a pequeña escala son una propiedad de la superficie reflejante, mientras que los errores de mediana y gran escala se deben a los soportes y las estructuras de éstos. Por tanto, los errores de pequeña escala son determinados a partir de la medición de la propagación de un haz de luz colimado después de que ha sido reflejado desde una muestra pequeña del material. Los errores de mediana y gran escala se pueden determinar al mapear el contorno del reflector, utilizando trazado mecánico o de rayos láser. En adición a estos errores de la superficie del reflector, se suman los errores de rastreo; es decir, errores de puntería neta en todo el colector.

La parábola es la única forma de colector que enfoca un haz de radiación colimado a un solo punto. El enfoque perfecto es posible solamente para rayos que son incidentes paralelos al eje óptico (simétrico) de la parábola. Un haz colimado que viene de otras direcciones, no sólo fallará el foco, sino a causa de las alteraciones fuera del eje de la parábola, no convergerá en ningún punto.

Si se desea que el receptor intercepte la mayor cantidad de rayos, debe ser lo suficientemente grande. La figura II.12 ilustra la problemática del enfoque para colectores con reflector de canal parabólico y un receptor cilíndrico. El tubo del receptor es colocado concéntricamente alrededor de la línea focal. Si el rayo con la



mayor desviación ( $\theta_a$ ) apenas llega a alcanzar el receptor, como lo muestra la línea discontinua en la figura II.12, entonces la concentración será

$$C_{cyl,abs} = \frac{D}{\pi d} = \frac{\text{sen}\phi}{\pi} = \frac{\text{sen}\phi}{\pi \text{sen}\theta_a} = \frac{\text{sen}\phi}{\pi} C_{ideal} \quad (2.14)$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de borde  $\sphericalangle$  AOB. El máximo ocurre para  $\phi = 90^\circ$  y cae a un factor  $\pi$  debajo del límite ideal. Esto es típico de todos los concentradores enfocados de una sola etapa; es decir, alcanzan sólo de un cuarto a la mitad de la termodinámica del límite de concentración. La ecuación 2.14 determina qué tan grande debe ser el receptor para interceptar todos los rayos incidentes dentro del ángulo de tolerancia.

## II.8 Pérdidas térmicas de un CCP

Una diferencia notable entre un colector de placa plana y un colector concentrador, tal como un CCP, es que las pérdidas en un CCP vienen de la superficie del receptor cuya área es mucho más pequeña que el área de apertura. Sin embargo, las pérdidas radiativas son mucho mayores dado que la temperatura del receptor  $T_r$  es mucho mayor, y las pérdidas radiativas son proporcionales a la cuarta potencia de  $T_r$ . En la figura II.13 se muestra la sección transversal del receptor, indicando las transferencias de energía.

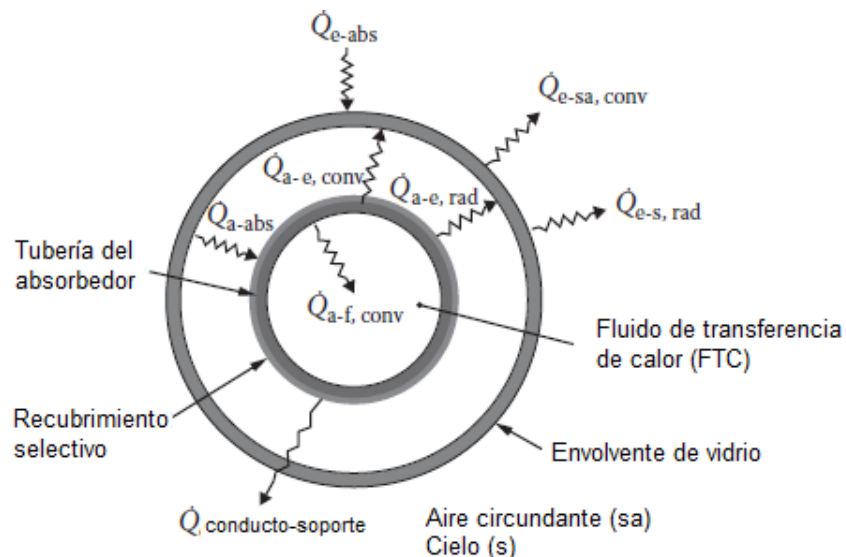


Figura II.13. Transferencia de calor en un elemento de colección de calor (receptor). Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

Un modelo detallado de la transferencia de calor, mostrado en la figura II.14, considera que la transferencia de calor ocurre desde la superficie del receptor hasta el fluido de transferencia de calor (FTC) por conducción a través del tubo del receptor y convección ( $Q_{a-f,conv}$ ), la pérdida de calor desde la superficie del receptor a la cubierta de vidrio por convección ( $Q_{r-e,conv}$ ), y radiación ( $Q_{r-e,rad}$ ), y la transferencia de calor desde la envoltura de vidrio al ambiente por convección ( $Q_{e-a,conv}$ ) y radiación ( $Q_{e-a,rad}$ ) incluyendo el calor radiativo transmitido desde el receptor a través del vidrio. Además, hay una pérdida de calor por conducción en los soportes de apoyo  $Q_{conductor-soporte}$ .

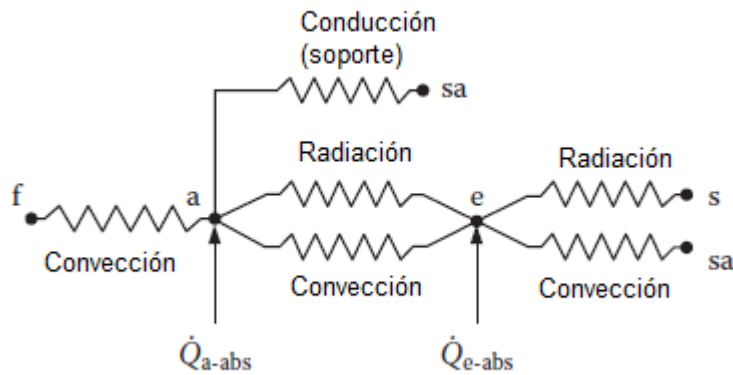


Figura II.14. Modelo de resistencia térmica. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

Para simplificar, si la pérdida de calor por convección desde el receptor se desprecia debido al vacío, y la absorción en la cubierta de vidrio también es despreciada, la transferencia de calor puede ser representada por la figura II.15 y la pérdida de calor  $q_L$  puede ser escrita como

$$q_L = A_k \frac{T_r - T_a}{R_k} + \epsilon_r \sigma (T_r^4 - T_a^4) A_r \quad (2.15)$$

Donde  $R_k$  es la resistencia térmica compuesta de los soportes de apoyo y  $A_k$  es el área efectiva de transferencia de calor por conducción.

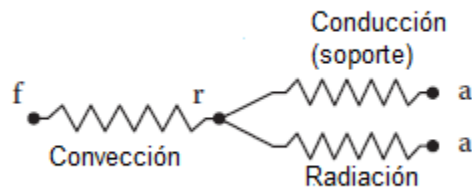


Figura II.15. Modelo simplificado de resistencias térmicas. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

## II.9 Eficiencia térmica de un colector CCP

El rendimiento térmico de un colector solar es determinado parcialmente obteniendo valores de eficiencias instantáneas para las diferentes combinaciones de radiación incidente, temperatura ambiente y temperatura de entrada del fluido. Esto requiere mediciones experimentales de la radiación incidente en el colector así como la tasa de energía que se añade al fluido de transferencia cuando está circulando a través del colector, todo bajo estado estacionario o casi-estacionario (Kalogirou, 2004).

El procedimiento general de pruebas es operar el colector en condiciones cuasi-estacionarias, evaluar la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo y determinar el calor útil ganado  $Q_u$ .

Con base en dichas mediciones se determina la eficiencia instantánea  $\eta$  del colector (Duffie y Beckman, 1991). Las pruebas se hacen para un rango de temperaturas de entrada. Para minimizar los efectos de la capacidad calorífica del colector, las pruebas son hechas en pares simétricos con respecto al mediodía solar, (i.e. si el mediodía solar es a las 11:30 a.m. un buen par de pruebas simétrico sería: la primera prueba a las 11:00 a.m. y la segunda a las 12:00 p.m.) con resultados de los pares promediados. Las eficiencias instantáneas son determinadas de:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_b A_c} \quad (2.16)$$

Donde

$$Q_u = mCp(T_o - T_i) \quad (2.17)$$

Otra ecuación para evaluar el calor útil depende de la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo al colector y del flujo másico que circula a través del colector (Duffie and Beckman, 1991):

$$Q_u = \dot{m}Cp(T_o - T_i) \quad (2.18)$$

Considerando condiciones casi permanentes durante la evaluación del calor útil y sustituyendo en la primera ecuación, se tiene que (Duffie and Beckman, 1991):

$$\eta_c = \frac{mCp(T_o - T_i)}{G_b A_c} \quad (2.19)$$

Donde  $G_b$  es la radiación incidente sobre el tubo receptor del concentrador parabólico,  $A_c$  es el área de apertura del colector.

## II.10 Descripción del campo solar HOLCIM-APASCO Hermosillo

La instalación solar de la planta HOLCIM-APASCO Hermosillo está compuesta por 160 colectores de la marca SOPOGY, modelo SopoNova® 4.1 (figura II.16). Las dimensiones de un solo colector son 3.65m de largo, 1.65m de ancho y 1.19m de altura, área de 6.03m<sup>2</sup> y un área efectiva de 5.21m<sup>2</sup>, mientras que para el receptor su longitud es de 3.65m y un diámetro de 0.05m, tal como lo muestran las figuras II.17 y II.18. Cada uno de los colectores instalados consta de: tres placas de metal plateado tipo espejo que conforman el reflector, y un tubo de vidrio como cubierta para el receptor.

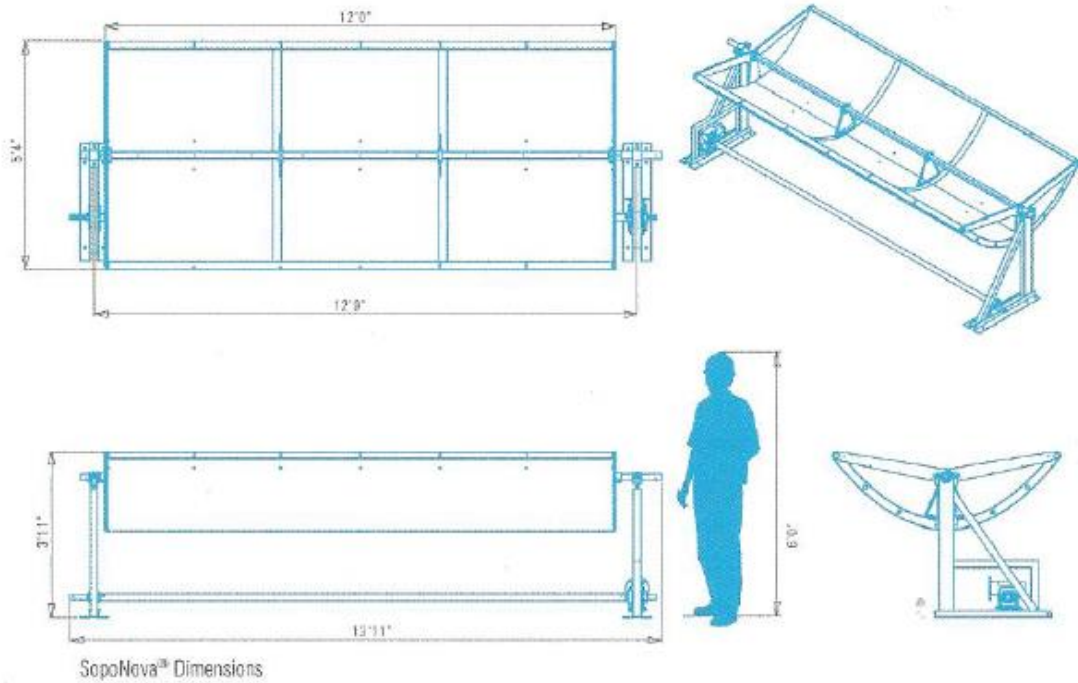


Figura II.16 Dimensiones de colector solar SopoNova® 4.1. Fuente: Folleto técnico SOPOGY.

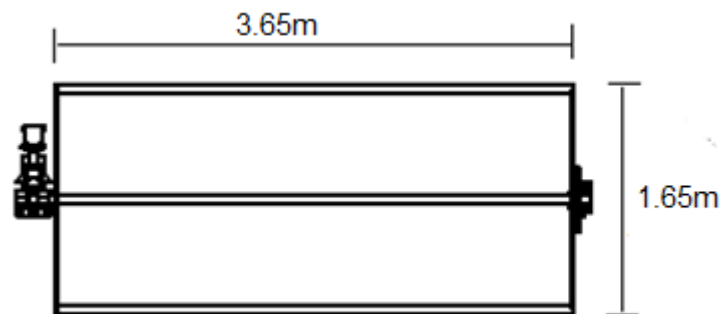


Figura II.17 Esquema en vista superior del colector con sus dimensiones.

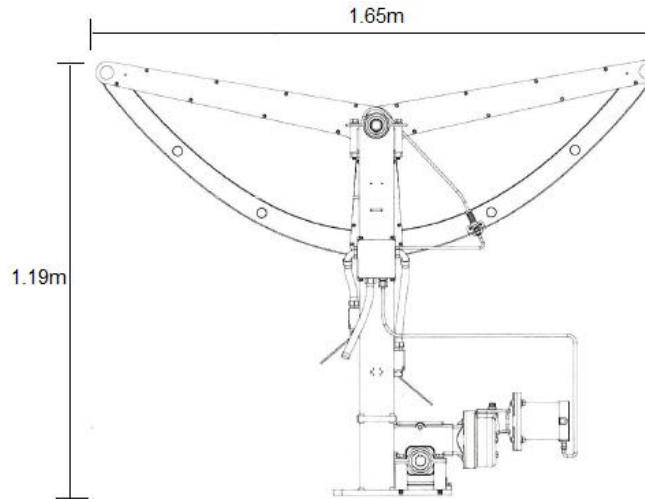


Figura II.18 Vista de corte lateral del colector con dimensiones.

La tabla II.1 recopila los datos generales de los concentradores de canal parabólico de la marca SOPOGY, modelo SopoNova® 4.1.

| DESCRIPTION                    | UNITS (METRIC)      | UNITS (STANDARD)      |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Collector Length               | 3.657 m             | 12 ft                 |
| Collector Width                | 1.65 m              | 5.4 ft                |
| Collector Area (gross)         | 6.03 m <sup>2</sup> | 65 ft <sup>2</sup>    |
| Collector Area (net)           | 5.21 m <sup>2</sup> | 56.04 ft <sup>2</sup> |
| Heat Collection Element, O.D.  | 25 mm               | 1 inch                |
| Heat Transfer Fluid Capacity   | 2.098 liter         | 0.554 gal             |
| Recommended Flow Rate          | 22.7-45.4 liter/min | 6-12 gal/min          |
| Operating Temperature Ranges   | 50-270°C            | 122-518°F             |
| Collector Weight               | 68 kg               | 150 lbs               |
| Focal Length                   | 304.8 mm            | 12 inch               |
| Ambient Operating Temperatures | -10 to 50°C         | 14 to 122°F           |
| Maximum Wind Speed (stowed)    | 169 km/h            | 105 mph               |
| Maximum Wind Speed (tracking)  | 54 km/h             | 33 mph                |
| Useful Life Expectancy         | 30 + years          | 30 + years            |

SopoNova®

Tabla II.1, Datos Generales para concentradores solares de canal parabólico, SOPOGY, SopoNova®. Fuente: Folleto técnico SOPOGY.

La distribución de toda la instalación solar de 160 colectores con un área total efectiva de  $833.60\text{m}^2$ . A su vez, la instalación se divide en dos secciones: una en el techo de un edificio con 112 colectores, los cuales están divididos en 7 líneas de 16 colectores cada una, resultando en un área efectiva de  $583.52\text{m}^2$ ; y otra sección en una plataforma de concreto ubicada en el suelo frente al mismo edificio.

Para el propósito de este estudio solo la sección del campo solar montado en el suelo fue evaluada. Esta sección cuenta con 48 colectores, en un arreglo de 6 líneas de 8 colectores cada una. Las dimensiones totales del campo son de  $32.53\text{m}$  de largo, y  $19\text{m}$  de ancho, y un área efectiva total de  $250.08\text{m}^2$ . La figura II.19 muestra el arreglo de colectores, mientras que las figuras II.20 y II.21 dan una vista del campo solar de la empresa. El campo cuenta además con 3 bombas, 8 sensores de temperatura, 3 medidores de flujo, 8 manómetros y 14 medidores de temperatura.

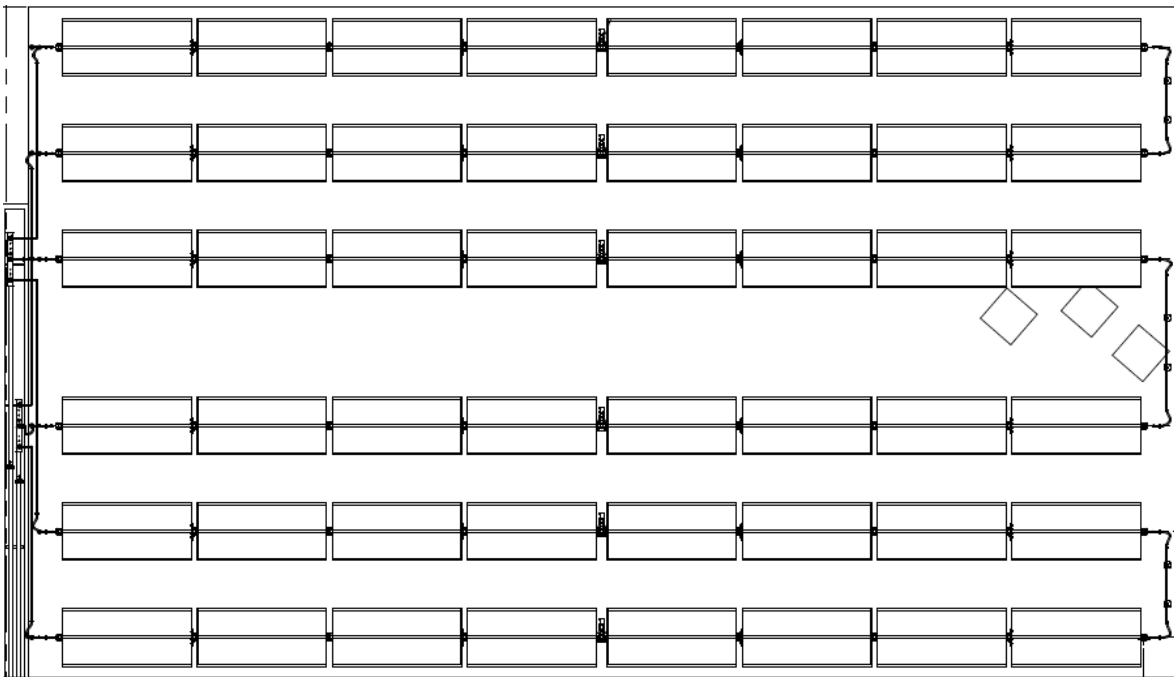


Figura II.19 Arreglo del campo solar de la sección instalada en piso.

El controlador del campo solar contiene un software que utiliza latitud, longitud, y tiempo de entradas diarias que causan que los colectores solares sigan al sol. La bomba de circulación del campo solar se encenderá cuando los receptores alcancen una temperatura preestablecida de un fluido de alta temperatura para prevenir un choque térmico en el sistema (usualmente igual a la temperatura de la parte superior del tanque de almacenamiento térmico).

El controlador del campo continuará siguiendo al sol y operará la bomba de circulación mientras haya ganancia positiva de calor a la temperatura de operación deseada. El motor de seguimiento del campo solar está ubicado cada cuatro colectores por línea.



Figuras II.20 y II.21 Vista parcial del campo solar montado a suelo.



| DESCRIPCIÓN               | MAGNITUD | UNIDADES (MÉTRICAS) |
|---------------------------|----------|---------------------|
| Longitud del colector     | 3.657    | m                   |
| Ancho del colector        | 1.65     | m                   |
| Área                      | 6.03     | m <sup>2</sup>      |
| Área efectiva             | 5.21     | m <sup>2</sup>      |
| Total de Colectores       | 160      |                     |
| Área total efectiva       | 833.60   | m <sup>2</sup>      |
| Colectores en el techo    | 112      |                     |
| Área total en el techo    | 674.52   | m <sup>2</sup>      |
| Área total efectiva techo | 583.52   | m <sup>2</sup>      |
| Colectores en el suelo    | 48       |                     |
| Área total en el suelo    | 289.44   | m <sup>2</sup>      |
| Área total efectiva suelo | 250.08   | m <sup>2</sup>      |

Tabla II.2. Distribución de colectores y áreas efectivas. Fuente: Folleto técnico SOPOGY.

Basándonos en la importancia del concepto de razón de concentración, mencionado en la sección II.3, y de los datos descritos anteriormente, se procederá a calcular la razón de concentración para los colectores SopoNova® 4. Para esto, es necesario hacer uso de la ecuación

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.1)$$

Sustituyendo datos,

$$C = \frac{(1.6524 \text{ m})(3.65\text{m})}{(0.05 \text{ m})(3.65\text{m})} = 33.048$$

# Capítulo III

## III.1 Refrigeración

La refrigeración se define como un proceso termodinámico donde se extrae calor de un cuerpo, y se transporta a otro lugar capaz de admitir esa energía térmica, mediante fluidos llamados refrigerantes que llevan la energía calorífica. Éstos tienen la característica principal de evaporarse a bajas presiones y temperaturas y condensarse a altas presiones y temperaturas; son capaces de absorber calor de un ambiente.

El modo más utilizado para el enfriamiento artificial de espacios cerrados, se consigue mediante los métodos de compresión y de absorción. El método por compresión es el más utilizado, puesto que el método por absorción sólo se suele utilizar cuando hay una fuente de calor residual o barata.

Las aplicaciones de refrigeración son, entre muchas:

- Alcanzar un grado de confort térmico adecuado para la habitabilidad de un edificio.
- Conservación de medicamentos, órganos, alimentos
- Producción de nieve o hielo
- Reducción de temperatura en maquinarias
- Criogénesis
- Radiadores de enfriamiento
- Refrigeración de aparatos electrónicos

## III.2 Refrigeración por compresión

El método de climatización más utilizado emplea un ciclo de refrigeración por compresión de vapor. El ciclo de refrigeración por compresión requiere entrada de energía en el compresor, la cual se provee como electricidad desde un sistema fotovoltaico o como energía mecánica de un motor impulsado por energía solar. En la figura III.1 se ilustra el funcionamiento del ciclo de refrigeración por compresión: el compresor eleva la presión del refrigerante, el cual también incrementa su temperatura. El vapor de refrigerante comprimido a alta temperatura transfiere entonces su calor al medio ambiente en el condensador, donde se condensa a un líquido de alta presión a una temperatura cercana (aunque mayor que) a la temperatura ambiente.

El refrigerante líquido pasa luego a través de la válvula de expansión donde su presión es drásticamente reducida, resultando en una mezcla de vapor-líquido a una temperatura mucho menor. El refrigerante a baja temperatura es utilizado para enfriar aire o agua en el evaporador, donde el líquido refrigerante se evapora al absorber calor del medio que se enfría. El ciclo se completa con el vapor retornando

al compresor. Si el agua es enfriada por el evaporador, el dispositivo es usualmente llamado enfriador. El agua fría es entonces usada para enfriar el aire en el edificio.

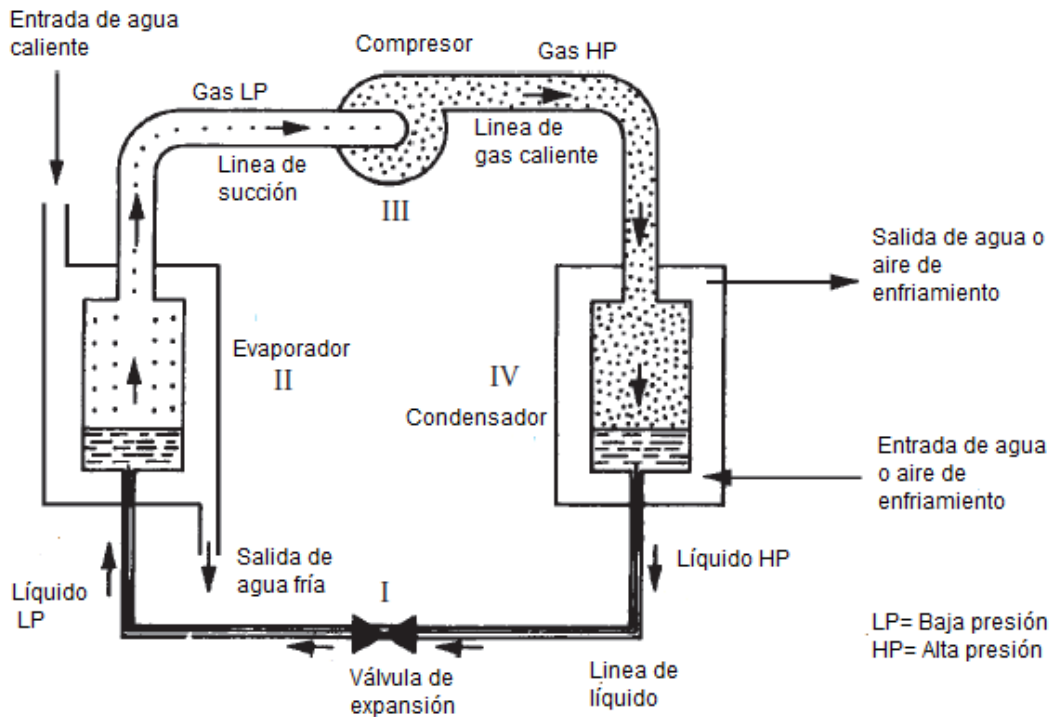


Figura III.1 Diagrama esquemático que ilustra el ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

El principio de operación de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor puede ser ilustrado convenientemente con la ayuda de un diagrama presión-entalpía, como el que se muestra en la figura III.2. La ordenada es la presión del refrigerante en  $N/m^2$  absolutos, y la abscisa es su entalpía en  $kJ/kg$ . La numeración romana en la figura III.2 corresponde a las ubicaciones físicas en el diagrama esquemático de la figura III.1.

El proceso I, es un proceso de estrangulación en donde el refrigerante de líquido caliente a la presión de condensación  $p_c$  pasa a través de la válvula de expansión, donde su presión es reducida a la presión del evaporador  $p_e$ . Este es un proceso isoentálpico, en el cual la temperatura del refrigerante decrece. En este proceso, se produce algo de vapor y el estado de la mezcla de refrigerante líquido y vapor entrando al evaporador se muestra en el punto A. ya que la expansión es isoentálpica, la siguiente relación se mantiene:

$$h_{ve}f + h_{le}(1 - f) = h_{lc} \quad (3.1)$$

donde  $f$  es la fracción de masa en estado vapor, subíndices "v" y "l" se refieren a los estados vapor y líquido, respectivamente, "c" y "e" se refieren a los

estados correspondientes a las presiones del condensador y evaporador, respectivamente. Y,

$$f = \frac{h_{lc} - h_{le}}{h_{ve} - h_{le}} \quad (3.2)$$

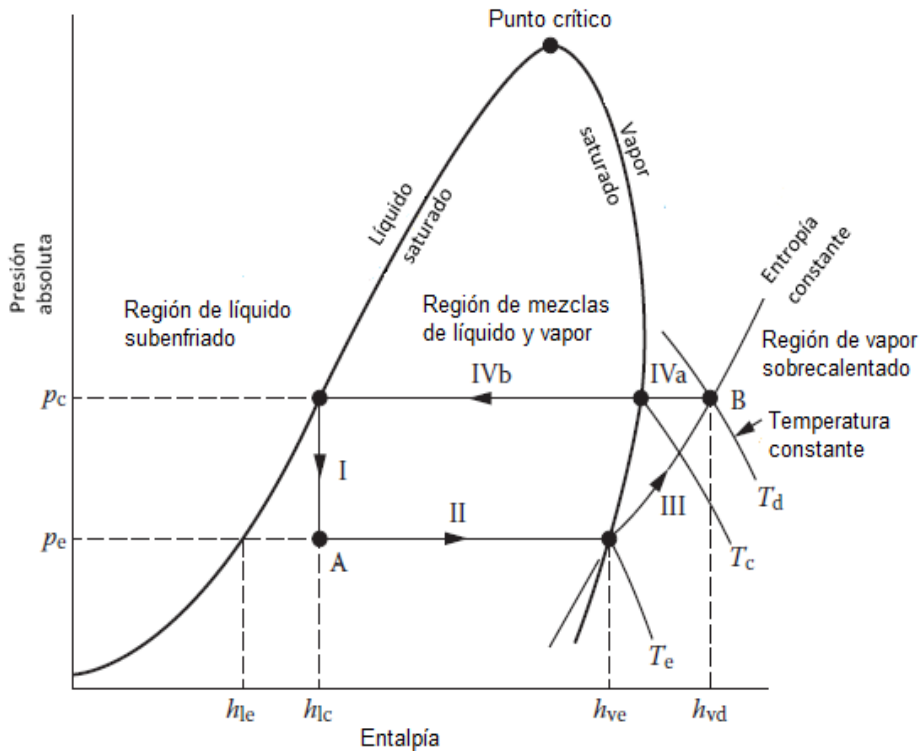


Figura III.2 Ciclo de refrigeración simple en diagrama de presión-entalpía. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

El proceso II representa la vaporización del líquido restante. Este es el proceso durante el cual el calor es removido del enfriador. Por lo tanto, el efecto de refrigeración específico por kilogramo de refrigerante  $q_r$  es

$$q_r = h_{ve} - h_{lc} \quad (BTU/lb) \quad (3.3)$$

Es común en la práctica medir la refrigeración en términos de toneladas. Una tonelada es la cantidad de enfriamiento producido si una tonelada de hielo se derrite en un periodo de 24 horas. Ya que una 1 ton= 907.2 kg y el calor latente de fusión del agua es 334.9 kJ/kg,

$$1 \text{ ton} = \frac{(907.2 \text{ kg}) \times (334.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(24 \text{ hrs})(3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}})} = 3.516 \text{ kW} = 12,000 \text{ BTU/hr} \quad (3.4)$$

Si la velocidad de refrigeración requiere una velocidad de transferencia de calor  $\dot{Q}_r$ , entonces la velocidad del flujo de masa de refrigerante necesaria  $\dot{m}_r$  es

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{Q}_r}{(h_{ve} - h_{lc})} \quad (3.5)$$

El proceso III en la figura III.2 representa la compresión del refrigerante desde una presión  $p_e$  hasta  $p_c$ , para lo cual el proceso requiere entrada de trabajo desde una fuente externa. En general, si el vapor calentado que sale del compresor está a la condición representada por el punto B en la figura III.2, el trabajo de compresión  $W_c$  es

$$W_c = \dot{m}_r(h_{vd} - h_{ve}) \quad (3.6)$$

En un análisis de ciclo ideal, el proceso de compresión es usualmente asumido isoentrópico.

El proceso IV representa la condensación del refrigerante. De hecho, el calor sensible es removido primeramente en el subproceso IVa a la vez que el vapor es enfriado a presión constante desde  $T_d$  a  $T_c$ , y el calor latente es removido a la temperatura de condensación  $T_c$ , correspondiente a la presión de saturación  $P_c$  en el condensador. La velocidad de transferencia de calor en el condensador  $\dot{Q}_c$  es

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_r(h_{vd} - h_{lc}) \quad (3.7)$$

Este calor debe ser expulsado hacia el ambiente, ya sea agua de enfriamiento o a la atmósfera si no hay agua disponible. El rendimiento global de una máquina de refrigeración es generalmente expresado como la razón del calor transferido al evaporador  $\dot{Q}_r$  por el trabajo mecánico suministrado al compresor. Esta relación es llamada *coeficiente de rendimiento* (COP), definido por

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_r}{W_c} = \frac{(h_{ve} - h_{lc})}{h_{vd} - h_{ve}} \quad (3.8)$$

El coeficiente más alto de rendimiento para las temperaturas del evaporador y condensador dadas, se obtendría si el sistema estuviera operando en un ciclo de Carnot reversible. Bajo estas condiciones,

$$\text{COP}(\text{carnot}) = \frac{\dot{Q}_r}{W_c} = \frac{T_e}{T_d - T_e} \quad (3.9)$$

Sin embargo, los efectos de fricción y las pérdidas irreversibles de calor disminuyen el COP de los ciclos reales muy por debajo de este máximo.

### III.3 Sistema de refrigeración por absorción

El ciclo termodinámico de refrigeración por absorción, al igual que el de compresión, se basa en la necesidad del fluido usado como refrigerante de obtener calor del líquido a enfriar para poder pasar del estado líquido al de vapor al reducirse la presión a la que está sometido. En los equipos de refrigeración, el fluido en estado líquido se encuentra a más alta presión en el condensador y se le hace fluir al evaporador a baja presión donde obtiene de su entorno el calor necesario para poder evaporarse. Este refrigerante en estado vapor se devuelve a alta presión al condensador donde se le sustrae el calor que ha obtenido volviendo al estado líquido para empezar de nuevo el ciclo. Con ello se logra el objetivo de sacar calor de un espacio, el evaporador, enfriándolo, para disiparlo en otro, el condensador.

La refrigeración por absorción difiere del ciclo por compresión únicamente en el método para comprimir el refrigerante. Mientras que en el ciclo de compresión, la circulación del fluido y el efecto de la presión se obtiene con un compresor mecánico, en el ciclo de absorción ello se logra aportando calor al generador donde el refrigerante está mezclado con otro fluido denominado absorbente cuya función es absorber el vapor en la zona de baja presión para poder devolverlo en forma líquida al generador. Un sistema de refrigeración que opera bajo el ciclo de absorción tiene la característica de que la energía necesaria para mantener el proceso de enfriamiento se suministra principalmente en forma de calor. La figura III.3 muestra un esquema de un sistema de refrigeración por absorción.

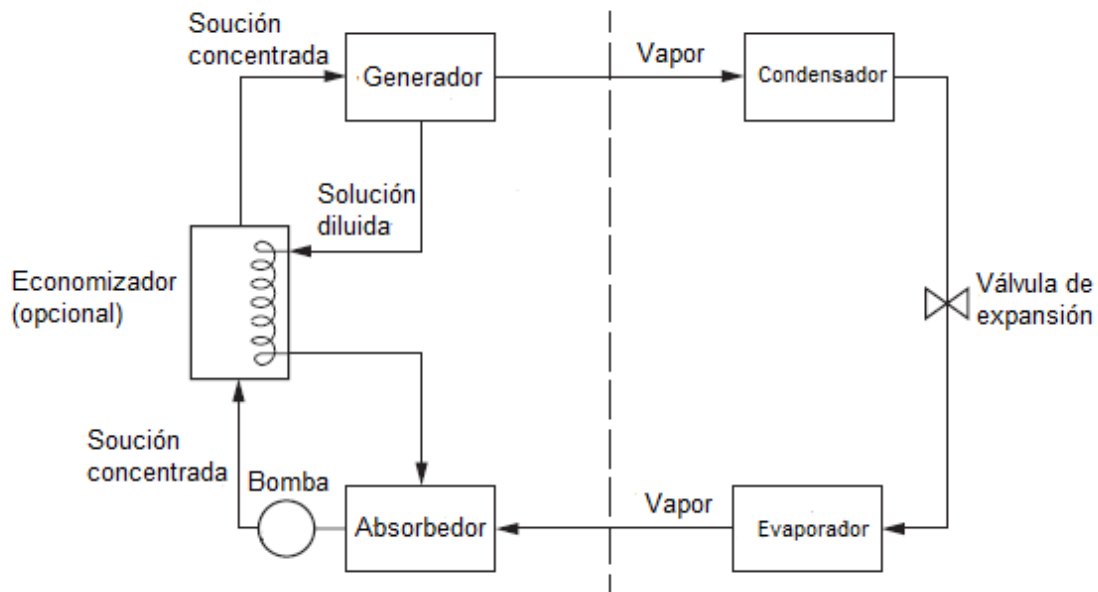


Figura III.3 Diagrama básico de refrigeración por absorción para enfriamiento de aire, con economizador. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

El ciclo de absorción no es un descubrimiento reciente. Sus antecedentes pueden situarse en 1755, cuando el escocés William Cullen consiguió obtener una pequeña cantidad de hielo en una campana donde mantenía una presión reducida. Poco después, en 1777, otro escocés, Gerald Nairne, introducía ácido sulfúrico en la campana de Cullen, de manera que el vapor de agua fuera absorbido por éste, dejando espacio para permitir una mayor evaporación de agua. Algo más tarde, en 1810, John Leslie coloca dentro de la campana bajo vacío, un recipiente con el agua a evaporar y en el fondo otro recipiente con el ácido sulfúrico, logrando una producción de 3 kg de hielo por hora.

Pero es finalmente el francés Ferdinand Carré, quién construye y comercializa la primera máquina de absorción, destinada principalmente a la fabricación de hielo, utilizando amoníaco como refrigerante y agua como absorbente. Esta máquina fue patentada en 1859 y obtuvo el premio de la Exposición Universal de Londres de 1862. En 1875 el buque Paraguay, equipado con máquinas de Carré, transportó por primera vez carne congelada desde Buenos Aires hasta el puerto de Le Havre.

El rendimiento efectivo de un ciclo de absorción depende de los dos materiales que comprendan el par refrigerante-absorbente. La siguiente lista corresponde a las características deseables de este par refrigerante-absorbente.

- La ausencia de un absorbente de fase sólida.
- Un refrigerante que sea más volátil que el absorbente, de manera que la separación desde el absorbente ocurra fácilmente en el generador.
- Un absorbente que tenga una fuerte afinidad por el refrigerante para condiciones en las que la absorción se lleva a cabo.
- Un alto grado de estabilidad para operaciones de largo plazo.
- Fluidos no tóxicos y no inflamables para aplicaciones de residencia. Esta condición es menos crítica en la refrigeración industrial.
- Un refrigerante que tiene un alto calor latente, de manera que la velocidad de circulación pueda mantenerse baja.
- Un fluido de baja viscosidad que mejore la transferencia de calor y masa y que reduzca la potencia de bombeo.
- Fluidos que no causen efectos medioambientales a largo plazo.

Agua-bromuro de litio y amoníaco-agua son dos pares que cumplen con la mayoría de los requisitos. En el sistema  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ , el agua es el refrigerante y el bromuro de litio es el absorbente, mientras que en el sistema  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , el amoníaco es el refrigerante y el agua el absorbente. Debido a que el sistema agua-bromuro de litio tiene una alta relación de volatilidad, puede operar a bajas presiones.

Una desventaja que presenta el primer sistema, es que el par tiende a formar sólidos. El bromuro de litio tiene una tendencia a cristalizarse cuando se enfría el aire, y el sistema no puede ser operado a, o por debajo, del punto de congelación del agua. Por lo tanto, el sistema  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  es operado a temperaturas del evaporador a  $5^\circ\text{C}$  o más. Usando una mezcla de bromuro de litio con alguna otra

sal como el absorbente, se puede superar el problema de la cristalización. El sistema NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O tiene la ventaja de que puede ser operado a temperaturas muy bajas. Sin embargo, para temperaturas muy por debajo de 0°C, el vapor de agua debe ser removido del amoniaco tanto como sea posible para prevenir la formación de cristales de hielo. Esto requiere una columna de rectificación después del hervidor. También, el amoniaco es un fluido que pertenece al Grupo Código B2 (Estándar ASHRAE 34-1992) que restringe su uso en interiores (ASHRAE 2013). Otros pares de refrigerante-absorbente incluyen (Macriss y Zawacki, 1989):

- Amoniaco-sal
- Metilamina-sal
- Alcohol-sal
- Amoniaco-solvente orgánico
- Dióxido de azufre-solvente orgánico
- Hidrocarburos halogenados- solvente orgánico
- Agua- nitrato alcalino
- Amoniaco-agua-sal

Si se desprecia el trabajo de la bomba, el COP de un acondicionador de aire por absorción puede calcularse

$$COP = \frac{\text{efecto de enfriamiento}}{\text{calor suministrado}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (3.10)$$

Los valores del COP para el acondicionamiento de aire por absorción varían en un rango desde 0.5, para una unidad pequeña de una sola etapa, hasta 0.85 para una unidad de doble etapa de vapor despedido. Estos valores son aproximadamente el 15% de los valores del COP que pueden ser logrados por un acondicionador de aire por compresión de vapor. Es difícil comparar directamente el COP de un ciclo de refrigeración por absorción con uno de compresión debido a que la eficiencia de la generación de energía eléctrica o la transmisión no está incluida en el COP del ciclo por compresión.

### III.3.1 Sistema Amoniaco-Agua

El amoniaco fue el primer refrigerante utilizado en plantas de refrigeración por medio de compresión mecánica en 1876 por Carl von Linde. Clasificado por ASHRAE con R-717, dentro del grupo de refrigerantes naturales, no destruye la capa de ozono y no contribuye al efecto invernadero asociado al calentamiento global.

El amoniaco es el refrigerante de uso más común en los sistemas de refrigeración por absorción por sus propiedades; el agua tiene la capacidad de absorber el vapor de amoniaco con tanta rapidez, que resulta tan efectiva como un



compresor mecánico para mantener una baja presión en el evaporador; la cantidad absorbida aumenta con la presión y disminuye al aumentar la temperatura.

Este sistema es muy similar al de por compresión de vapor, excepto que el compresor ha sido sustituido por un mecanismo de absorción compuesto por: receptor, bomba, generador, regenerador, válvula y rectificador. La figura III.4 muestra un esquema de un sistema de refrigeración por absorción con par  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ .

La diferencia principal entre el sistema de  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  y el sistema  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  es que el primero tiene un rectificador (también llamado desflegmador) después del hervidor para condensar vapor de agua tanto como sea posible fuera de la mezcla de vapor.

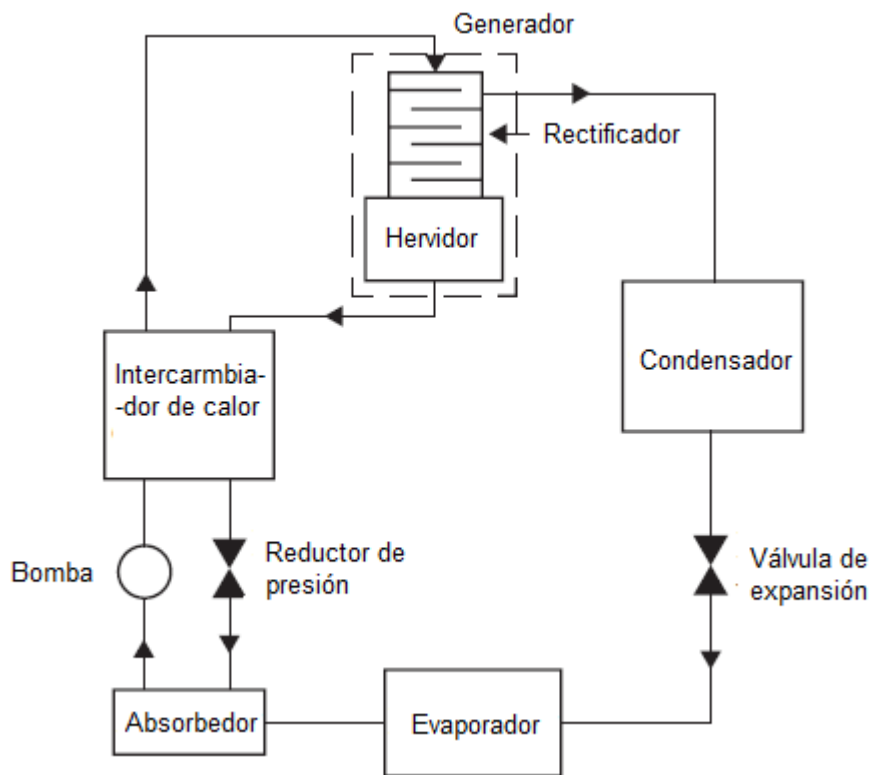


Figura III.4. Esquema del sistema de refrigeración por absorción amoníaco-agua. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

Una vez que la presión del amoníaco es elevada en el generador este se enfría y condensa, liberando calor hacia los alrededores; se estrangula hasta la presión del evaporador y absorbe calor del espacio refrigerado cuando fluye a través del evaporador.

El vapor de amoníaco sale del evaporador y entra al receptor, donde se disuelve y tiene una reacción química con el agua para formar  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , siendo esta una reacción exotérmica. La cantidad de amoníaco que puede disolverse en agua

es inversamente proporcional a la temperatura. Por consiguiente, es necesario enfriar el receptor para mantener su temperatura lo más baja posible y, por ende, para maximizar la cantidad de amoníaco disuelto en el agua. La solución líquida  $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}$ , que es rica en amoníaco se bombea luego al generador. El calor se transfiere a la solución de una fuente para evaporar algo de la solución. El vapor que es rico en amoníaco pasa por un rectificador, que separa el agua y la regresa al generador. El vapor de amoníaco 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 amoníaco, pasa por un regenerador donde transfiere algo de calor a la solución enriquecida que sale de la bomba, y se estrangula hasta la presión del receptor.

Como se mencionó al principio del apartado, el amoníaco no afecta a la capa de ozono, pero es tóxico e inflamable y tiene consecuencias directas sobre la salud del ser humano, por lo que pérdidas de este compuesto en el sistema pueden afectar mediante el contacto directo o por la contaminación de los alimentos presentes en la cámara frigorífica. En el caso del  $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ , el COP no supera el 0.5.

### **III.3.2 Sistema Agua-Bromuro de litio**

Cuando una sal se expone al aire húmedo, en forma natural absorbe la humedad para formar una solución acuosa; entonces la sal recibe el nombre de absorbente. Hay unas sales que absorben más agua que otras tales como las de bromuro de litio o las de cloruro de litio, cloruro de calcio. El bromuro de litio es una sal higroscópica y su sal tiene gran afinidad por el vapor de agua. Sin embargo, una desventaja de la combinación  $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$  es que el absorbente, no es del todo soluble en el agua bajo todos los valores de presión y temperatura que pueden darse en el sistema, por lo que 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  $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ , es que el absorbente no es volátil, de tal manera que no se tiene mezcla del absorbente en el refrigerante al salir del generador, y por lo tanto, no es necesario un rectificador, sin embargo, el agua no puede condensar o evaporar por debajo de  $0.01^\circ\text{C}$ , por lo que no puede ser empleada en equipos de producción de frío de temperatura negativa.

. Utilizando agua como refrigerante, se trabaja a presiones inferiores a la atmosférica (vacío) para las temperaturas habituales de climatización, lo cual obliga a diseños de máquinas muy compactas para minimizar las pérdidas de carga en tuberías. La figura III.5 muestra un esquema de un sistema de refrigeración por absorción con par  $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ .

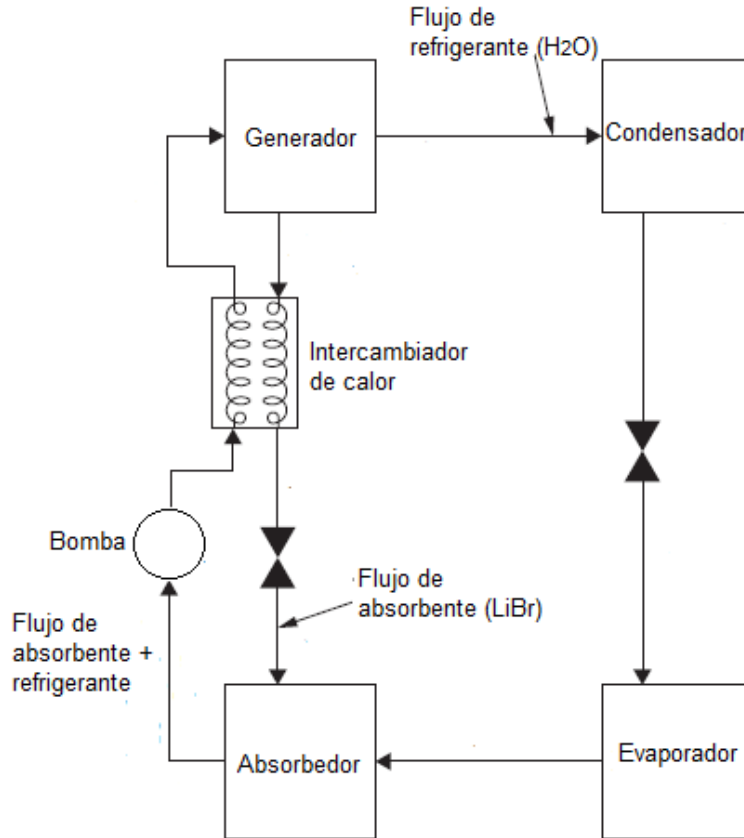


Figura III.5. Esquema del sistema de refrigeración por absorción agua-bromuro de litio. Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

En el ciclo con agua y bromuro de litio, el vapor del refrigerante liberado en el evaporador se absorbe en la solución absorbente y ésta se diluye. Para recuperar el refrigerante y reconcentrar la solución, ésta se bombea al generador, donde mediante el aporte de calor se libera el refrigerante por destilación. La solución concentrada se envía al receptor para volver a absorber refrigerante.

El vapor refrigerante liberado en el generador a mayor presión y temperatura pasa al condensador, de ahí sigue a la válvula de expansión donde baja su presión y al entrar en el evaporador absorbe el calor y vuelve a repetirse el ciclo. Al igual que los sistemas de compresión que utilizan agua en sus procesos, el sistema requiere una torre de enfriamiento para disipar el calor sobrante.

Según la temperatura del foco caliente se clasifica en dos tipos:

- Absorción simple efecto: La fuente térmica es agua caliente a una temperatura entre 80 y 95°C, obteniéndose un COP del orden del 0.7.
- Absorción doble efecto: La fuente térmica puede ser vapor de agua, gases de escape de motores o turbinas o, incluso, fuego directo, obteniéndose un COP hasta de 1.4

### **III.3.3 Principales ventajas e inconvenientes de los sistemas de refrigeración por absorción**

#### **a) Ventajas**

- Inexistencia de elementos móviles.
- Alta fiabilidad.
- Dilatado número de horas de funcionamiento, sin revisiones ni averías.
- Escaso mantenimiento y pocos controles.
- Menores costos de explotación y reducción de la demanda punta de electricidad.
- Fácil integración en procesos industriales.
- Uso de refrigerantes no agresivos con la capa de ozono.
- Imposibilidad total de descargas de gases nocivos o peligrosos hacia la atmósfera.

#### **b) Inconvenientes**

- El precio del sistema de absorción es mayor que el de un sistema convencional, aunque se amortiza más rápidamente por su bajo consumo de energía y mantenimiento.
- Rendimiento menor que en el método por compresión (0.8 frente a 5.5), sin embargo en algunos casos compensa el que la energía proveniente de una fuente calórica sea más económica o incluso residual.
- La cristalización, aunque es un problema que puede resolverse sin sustitución de elementos, únicamente con mano de obra y en cuestión de pocas horas.
- Los aparatos son más voluminosos y requieren inmovilidad.

### **III.3.4 Aplicaciones de los ciclos de absorción**

Las máquinas de absorción tienen unas aplicaciones muy determinadas en aquellos proyectos en los que existe la posibilidad de obtener efluentes térmicos gratuitos. En caso contrario, los estudios de viabilidad demuestran periodos de amortización más largos que las máquinas de compresión convencionales, ya que los COP obtenidos en máquinas de absorción sólo son rentables si la energía térmica de calentamiento no tiene costo económico ninguno.

Existen tres tipos principales de instalación con obtención de flujos térmicos residuales o gratuitos en los que se recomienda mayoritariamente la instalación de máquinas de absorción.

### a) Instalaciones con Cogeneración para Producción de Agua Caliente y Motores de Combustión.

La máquina de absorción puede ser alimentada con energía térmica procedente de los motores de combustión, figura III.6. Esta energía se obtiene de la recuperación del calor de los humos procedentes de la combustión y del agua caliente de refrigeración de las camisas del motor.

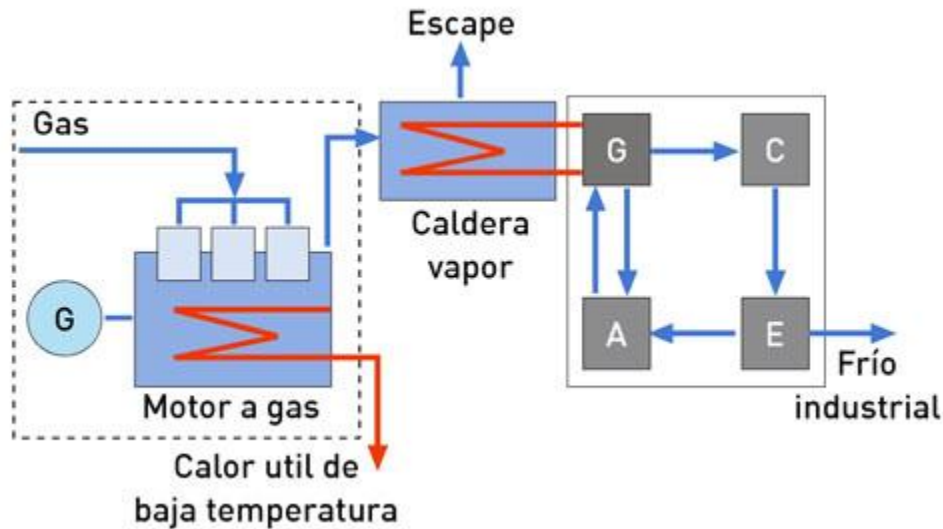


Figura III.6 Sistema de cogeneración por motor a gas.

### b) Instalaciones con Cogeneración para Producción de Vapor y Calderas de Post Combustión

En las calderas de postcombustión se obtiene vapor a distintas presiones que puede utilizarse para las máquinas de absorción. De esta manera se puede obtener un rendimiento del 29% de la potencia aportada en combustión como potencia frigorífica disponible.

Las instalaciones de cogeneración mediante turbina de gas y ciclo combinado con ciclo de vapor exigen que el consumo eléctrico sea constante, ya que la turbina alcanza sus máximos rendimientos a plena carga, siendo desaconsejable su utilización para instalaciones que van a ser utilizadas frecuentemente a carga parcial. La figura III.7 ilustra lo anterior.

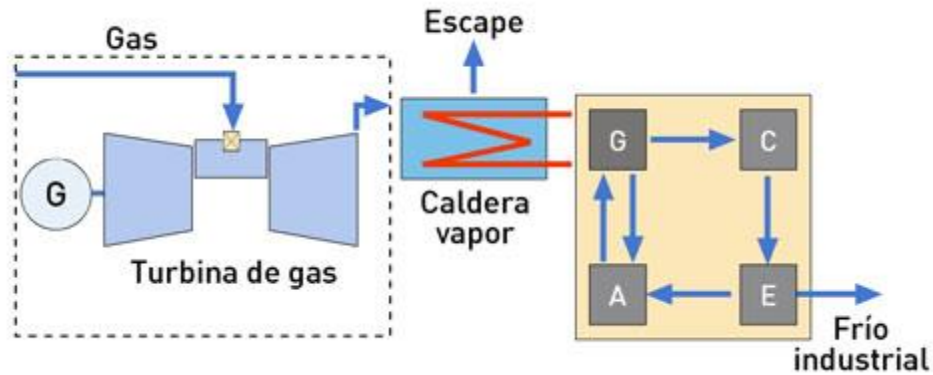


Figura III.7 Sistema de cogeneración por turbina a gas.

### c) Instalaciones con Energía Solar

Los colectores solares producen agua caliente a una temperatura aproximada de 80°C. Mediante un intercambiador de calor, el circuito de los colectores cede su energía al agua almacenada en un tanque de acumulación. La máquina de absorción se acciona con el agua caliente del tanque, y produce frío que es distribuido al local a través de los fan-coils (serpentines de refrigeración de aire). El sistema completo descrito anteriormente se ilustra esquemáticamente en la figura III.8.

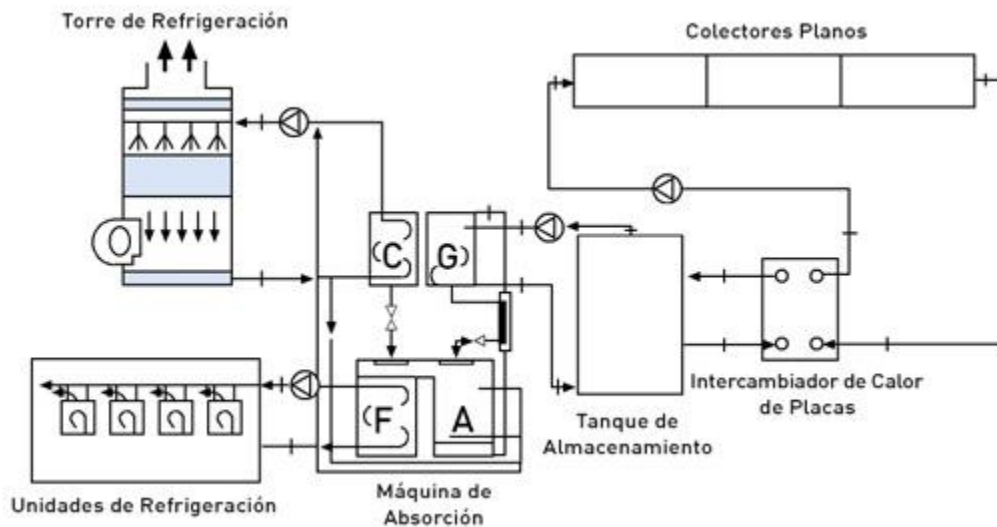


Figura III.8 Sistema de refrigeración con energía solar.

### III.4 Descripción de equipo enfriador instalado en HOLCIM-PASCO Hermosillo

#### III.4.1 Descripción y datos técnicos de enfriador CARRIER SANYO 16LJ

En el proyecto del edificio de oficinas de la planta de cemento de HOLCIM-APASCO en Hermosillo, Sonora, se instaló como fuente principal del sistema de Aire Acondicionado, un equipo *CARRIER-SANYO Modelo 16LJ* de 75 Toneladas de Refrigeración (TR), de efecto simple, figura III.9. La tabla III.1 expone los principales datos técnicos del equipo instalado.



Figura III.7 Enfriador CARRIER-SANYO instalado en planta.

## Physical data

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| UNIT 16LJ                            | 11    |
| NOMINAL COOLING CAPACITY (ton)       | 75    |
| RIGGING WEIGHT (lb)                  | 7,800 |
| OPERATING WEIGHT (lb)                | 8,900 |
| LITHIUM BROMIDE SOLUTION CHARGE (lb) | 950   |
| REFRIGERANT (WATER) CHARGE (lb)      | 130   |
| <b>CHILLED WATER</b>                 |       |
| Pipe Connection Size (in.)           | 3     |
| No. of Passes                        | 5     |
| <b>COOLING WATER</b>                 |       |
| Pipe Connection Size (in.)           | 5     |
| No. of Passes                        |       |
| Absorber                             | 4     |
| Condenser                            | 2     |
| <b>HOT WATER</b>                     |       |
| Pipe Connection Size (in.)           | 4     |
| No. of Passes                        | 6     |

## Performance data

|                        |      |
|------------------------|------|
| UNIT 16LJ              | 11   |
| COOLING CAPACITY (Ton) | 75   |
| <b>CHILLED WATER</b>   |      |
| Flow Rate (gpm)        | 180  |
| Pressure Drop (ft)     | 18.3 |
| <b>COOLING WATER</b>   |      |
| Flow Rate (gpm)        | 270  |
| Pressure Drop (ft)     | 12.2 |
| <b>HOT WATER</b>       |      |
| Flow Rate (gpm)        | 164  |
| Pressure Drop (ft)     | 10.3 |



Tabla III.1 Datos generales para enfriadores CARRIER-SANYO 16LJ11. Fuente: Folleto técnico CARRIER.



### III.4.2 Descripción del ciclo de absorción CARRIER SANYO 16LJ11

El enfriador de efecto simple 16LJ11 está compuesto por un evaporador, receptor, condensador, generador de agua caliente, intercambiador de calor de solución, bombas de refrigerante/absorbente, purga, controladores y auxiliares (Figura III.8). El agua es usada como el refrigerante en contenedores mantenidos a una baja presión absoluta (vacío).

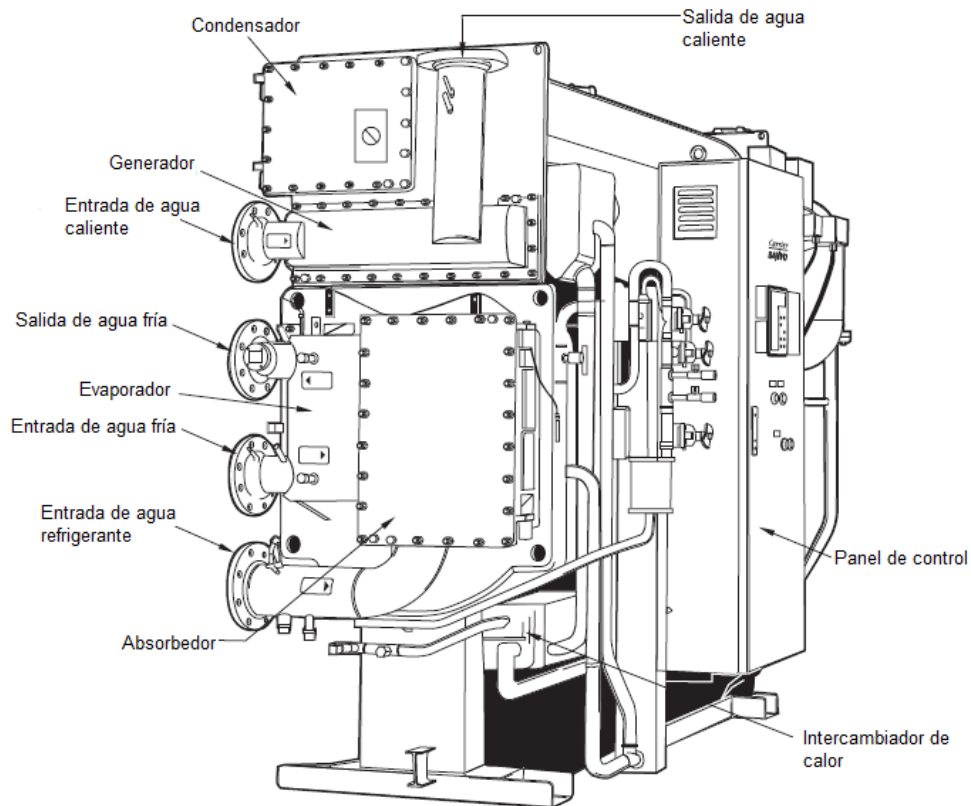


Figura III.8 Esquema de componentes de enfriador 16LJ CARRIER SANYO.

El enfriador opera bajo el principio de que a vacío, el agua hierve a una baja temperatura (aproximadamente 40°F), enfriando así el agua fría que circula por los tubos del evaporador. Una bomba de refrigerante es utilizada para circular el agua de refrigeración sobre los tubos del evaporador para mejorar el proceso de transferencia de calor.

El vapor de refrigerante es removido al mismo tiempo que es producido, con el fin de hacer continuo el proceso de enfriamiento. Una solución de bromuro de litio (el cual tiene alta afinidad por el agua) es usada para absorber el vapor de agua. A medida que continúa este proceso, el bromuro de litio se diluye, el cual reduce su habilidad de absorción. Una bomba de absorbente transfiere entonces esta solución

diluida al generador, donde es reconcentrada por la introducción de agua caliente en los tubos del generador para hervir el agua absorbida previamente.

El vapor de agua liberado en la envoltura del generador entra al condensador para ser enfriado y regresarlo a estado líquido. En este punto, el agua de refrigeración regresa al evaporador para comenzar un nuevo ciclo. Para remover calor de la máquina, agua relativamente fría proveniente de una torre de enfriamiento, o alguna otra fuente, es circulada a través de los tubos del receptor para remover el calor de vaporización. Esta misma agua es entonces circulada a través de los tubos del condensador.

La solución concentrada proveniente del generador fluye de nuevo al receptor para comenzar un nuevo ciclo. Por eficiencia, la solución concentrada del generador se pasa a través de un intercambiador de calor de solución para precalentar la solución diluida, mientras se preenfía la solución concentrada antes de retornar al receptor. La siguiente figura, ilustra el proceso descrito anteriormente.

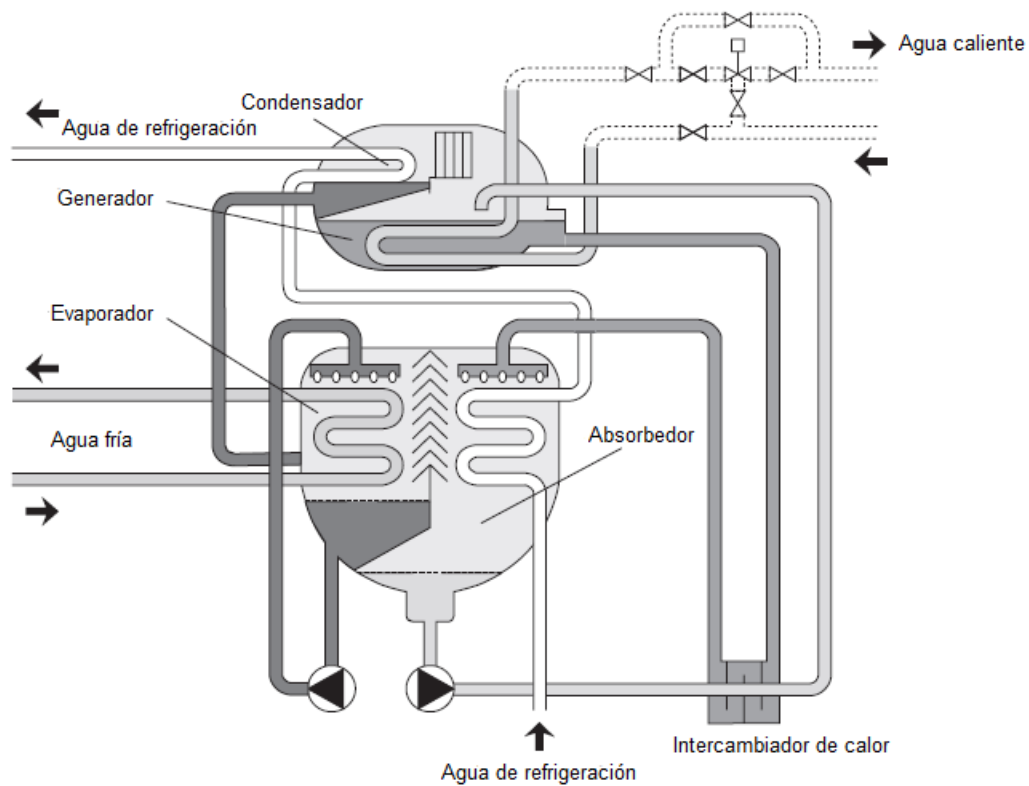


Figura III.9 Esquema simplificado del ciclo de refrigeración por absorción para enfriador 16LJ.

# Capítulo IV

## IV.1 Refrigeración solar

El uso de la energía solar para operar ciclos de refrigeración, ha sido considerado para dos propósitos: proveer refrigeración para la preservación de alimentos, y refrigeración de confort. La refrigeración es importante cuando se trata de acondicionar espacios en la mayoría de edificios para climas cálidos y en grandes edificios para climas más fríos, por lo que el uso de energía solar, resulta una idea interesante.

La refrigeración solar puede ser utilizada en tres diferentes sistemas: ciclos de absorción, ciclos desecantes y procesos mecánico-solares. Dentro de esas clases, se encuentran otras categorías, tales como los ciclos continuos o intermitentes, almacenamiento de energía de lado caliente o frío, varias estrategias de control, rangos de temperatura y diferentes tipos de colectores. En este capítulo, se dará énfasis en el proceso de absorción, para los intereses del desarrollo de este trabajo.

El proceso de refrigeración es uno de altos costos de operación, como lo es igualmente la calefacción. En algunos casos, la energía solar es más adecuada para el enfriamiento y refrigeración de espacios que para calefacción. La variación estacional de la energía solar es extremadamente adecuada para los requerimientos de enfriamiento de espacios en edificios, ya que, los principales factores que afectan la temperatura en una construcción son la cantidad promedio de radiación recibida y la temperatura del aire ambiental.

Las estaciones más cálidas del año corresponden a los periodos de mayor insolación, por lo que la energía solar es más abundante cuando más se requiere la refrigeración de confort. La eficiencia de los colectores solares incrementa al aumentar la insolación y la temperatura ambiental. Consecuentemente, en el verano, la cantidad de energía entregada por unidad de área superficial del colector puede ser más que eso en invierno.

Existen varios enfoques que pueden ser usados para el enfriamiento y refrigeración solar de espacios. Debido a la limitada experiencia al operar con sistemas de enfriamiento solar, el diseño debe ser basado en los principios básicos y la experiencia con los sistemas convencionales de refrigeración.

Los dos métodos principales para bajar la temperatura del aire para enfriamiento de confort, son la refrigeración con eliminación real de energía del aire o enfriamiento evaporativo del aire con vaporización adiabática de la humedad en él. Los sistemas de refrigeración pueden ser usados bajo cualquier condición de humedad de aire entrante, mientras que el enfriamiento evaporativo sólo puede ser utilizado cuando el aire entrante tiene comparativamente una baja humedad relativa.

## IV.2 Refrigeración solar por absorción

Dos enfoques se han tomado para el funcionamiento con energía solar de enfriadores de absorción. El primero es usar los enfriadores continuos, similares en construcción y funcionamiento a los de gas convencional o unidades de vapor de agua alimentada, con la energía suministrada al generador del sistema colector solar-almacenaje-auxiliar siempre que las condiciones en el edificio dicten la necesidad de refrigeración. La segunda, es utilizar enfriadores intermitentes similares en concepto a la de los refrigeradores de alimentos fabricados comercialmente, utilizados hace muchos años en las zonas rurales, antes de que la electrificación y la refrigeración mecánica fueran generalizadas. Los refrigeradores intermitentes se han considerado para la refrigeración, pero la mayoría del trabajo en el aire acondicionado solar se ha basado en ciclos continuos. El diagrama de un posible arreglo para este sistema se muestra en la figura IV.1.

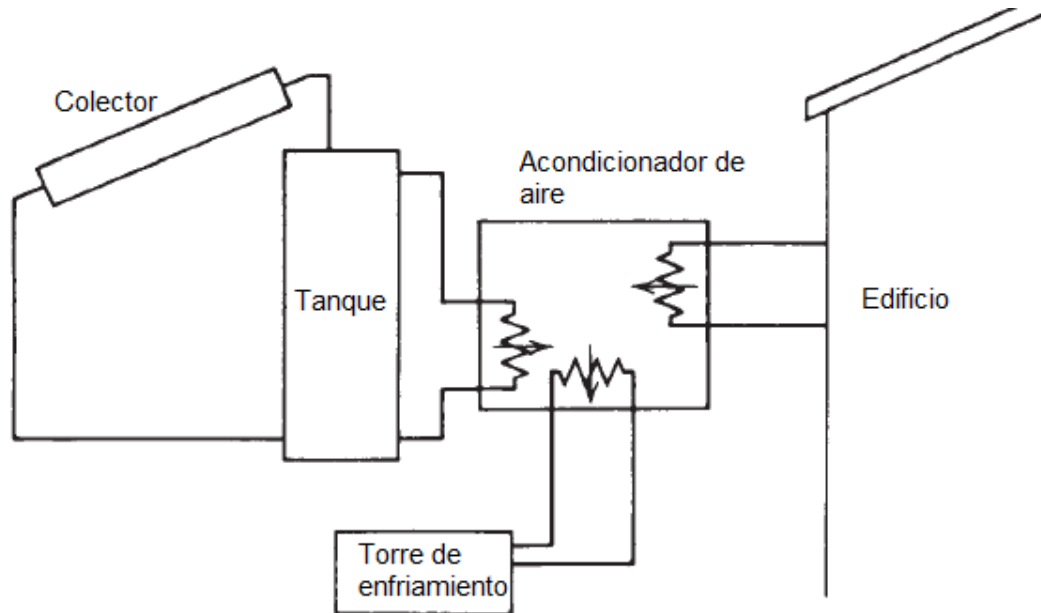


Figura IV.1. Esquema simplificado de un sistema solar de acondicionamiento de aire por absorción.  
Fuente: Ingeniería Solar de Procesos Térmicos, Duffie y Beckman.

El acondicionamiento de aire es compatible con la energía solar, ya que, una gran parte de la energía requerida es energía térmica a temperatura que actualmente colectores solares pueden proveer. Este ciclo de refrigeración solar ha sido objeto de estudio por algunos investigadores (Chinnappa y Wijesundera 1992; Kochhar 1982; Macriss y Zawacki 1989; Manrique 1991; Siddiqui 1993; Thombloom y Nimmo 1996). La figura IV.2 muestra detalladamente el arreglo para el ciclo de refrigeración solar.

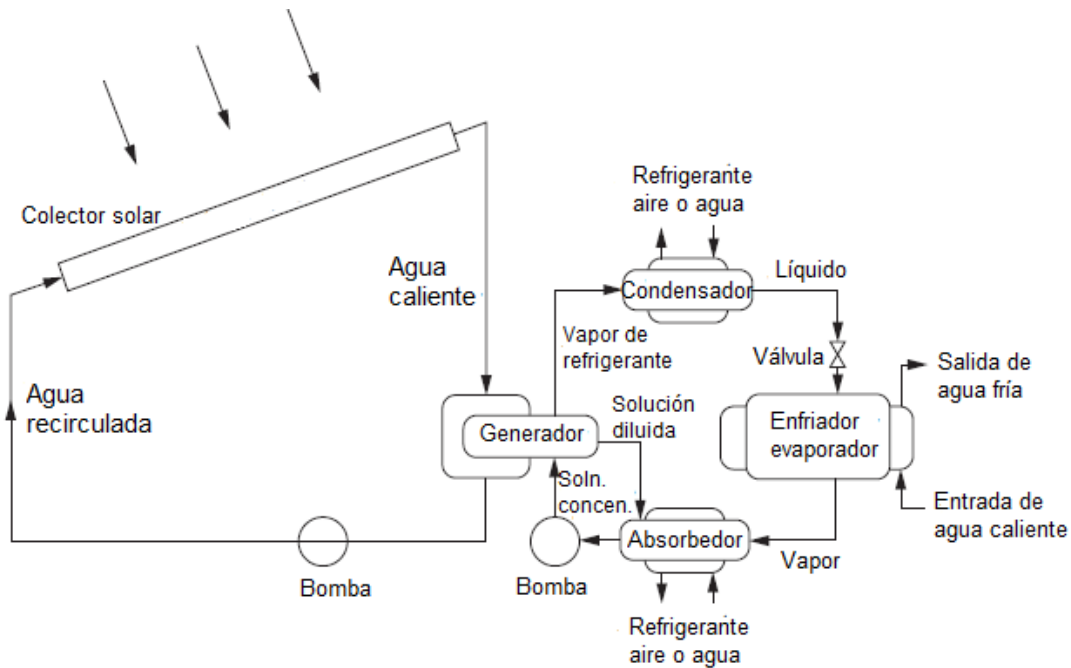


Figura IV.2. Esquema de sistema de refrigeración por absorción impulsado con energía solar.  
Fuente: Principios de Energía Solar, Yogi Goswami.

### IV.2.1 Ciclos continuos de absorción

La mayor parte de los equipos de producción de frío, basados en el principio del ciclo de refrigeración por absorción, operan en ciclos continuos; es decir, el refrigerante circula de forma constante a través de cada uno de los equipos, sufriendo cambios de fase entre líquido y vapor, mezclándose o separándose de la solución absorbente-refrigerante; para finalmente regresar al estado inicial. Estos ciclos deben poseer un dispositivo de bombeo que garantice la circulación del fluido de trabajo por todo el sistema, lo que implica en la mayoría de los casos, un consumo de energía eléctrica para accionar la bomba.

Una alternativa al uso de la bomba mecánica para recirculación son los sistemas de refrigeración por absorción con auto recirculación de LiBr/H<sub>2</sub>O o de difusión (H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>), en donde la energía primaria del sistema de refrigeración a absorción es exclusivamente en forma de calor. En estos sistemas el fluido de trabajo circula de manera natural por medio del efecto de termosifón, conocido con el nombre de bomba de burbujas. Usando agua como refrigerante la presión diferencial entre el condensador y el receptor es muy baja y se puede mantener usando el principio de la cabeza hidrostática. La solución del receptor puede circular al generador por una bomba de burbujas. Con el efecto de bomba de burbujas la solución es calentada y bombeada al mismo tiempo y la solución débil regresa por gravedad al receptor.

La operación continúa a pesar de ser más compleja, ya que requiere la adición de otros elementos (bomba, rectificador y receptor), es un tanto más eficiente que los sistemas intermitentes, porque se pueden mantener niveles de concentración estables en el proceso de desorción y por lo tanto flujos de calor constantes, obteniendo de esta forma un rendimiento más elevado y uniforme.

#### **IV.2.2 Ciclos intermitentes de absorción**

Los ciclos intermitentes están principalmente relacionados con sistemas sólido-gas; esto es debido a la dificultad mecánica asociada al transporte del sólido de un equipo a otro. Sin embargo, también se presenta en sistemas de absorción líquido-gas en donde no se desea la utilización de una bomba mecánica. En ciclos intermitentes el receptor y el generador son el mismo, e intercambian sus funciones de forma periódica.

En el ciclo intermitente el período de generación-condensación del refrigerante y el período de evaporación-absorción se efectúan en tiempos diferentes. En un primer tiempo la solución concentrada contenida en el generador, se calienta provocando la separación de los vapores del refrigerante, liberando el refrigerante a alta presión sin necesidad de bombas o compresores, posteriormente el refrigerante puro continua hacia el condensador en donde se licua y se almacena en un recipiente de condensados. En otro tiempo, se deja enfriar la solución diluida que quedó en el generador hasta que alcance la presión y la temperatura necesarias para que el refrigerante sea absorbido por la solución diluida. Una vez logrado lo anterior se hace pasar el refrigerante líquido a través de una válvula de expansión hacia el evaporador, en donde se procede a su vaporización a baja presión, produciendo una baja temperatura. El refrigerante en forma de vapor regresa al generador que ahora tiene la función de receptor y es reabsorbido, para iniciar un nuevo ciclo.

En el generador, también llamado reactor, existe una relación de equilibrio de fases que gobierna los fenómenos de reacción físicoquímica, transferencia de calor, presión y temperatura de operación. Gracias a esta característica, estos sistemas son mucho más simples y pueden operar sin necesidad de bombas para la circulación del fluido de trabajo, por lo tanto están libres de los requerimientos de energía eléctrica. Sin embargo, la eficiencia en los ciclos intermitentes puede ser menor a la de los ciclos continuos, debido a los requerimientos energéticos necesarios para calentar y enfriar en generador-receptor en cada uno de los tiempos de proceso.

## **IV.3 Sistema completo de refrigeración, Planta HOLCIM-APASCO Hermosillo**

### **IV.3.1 Descripción de los equipos componentes**

#### **a) Equipo de absorción**

Equipo *CARRIER – SANYO Modelo 16LJ* de 75 toneladas de refrigeración. Usa agua caliente como fuente de energía para su operación sin necesidad de consumir energía eléctrica salvo para la utilización de una bomba interna y su propio equipo electrónico; este equipo consume menos del 10% de energía eléctrica al compararse con un equipo convencional de la misma capacidad de enfriamiento. Los meses de más calor (verano) también son los meses de mayor radiación, lo que hace que tengamos más agua caliente para consumo de la máquina. El agua caliente proviene de los concentradores solares instalados en la azotea del edificio, estos, elevan la temperatura del agua hasta 95°C para inyectarla al equipo que después la regresa al sistema a 84°C, formando un circuito cerrado. Es un dispositivo de enfriamiento de agua que usa tres circuitos:

#### **b) El circuito de agua caliente**

Se usa como fuente de energía para que la máquina de absorción pueda llevar a cabo su trabajo que es el de enfriar el agua helada de 8°C a 4°C. Esto se consigue mediante un intercambiador de calor en el que se utiliza el agua caliente proveniente de los colectores solares y Bromuro de Litio. El Bromuro de Litio al ser calentado, se expande, y en ese proceso, mediante un segundo intercambiador de calor, enfría el agua helada.

#### **c) El circuito de agua helada**

Es la que se aprovecha para obtener el aire acondicionado en el edificio. El agua helada se hace pasar por las manejadoras de aire de manera que por un lado fluye el agua helada a 4°C y por el otro sale a una temperatura de 8°C. El aire entra a las manejadoras de aire a la temperatura ambiente del edificio y sale enfriado a la temperatura de confort. Una vez que el agua helada aumento su temperatura a 8°C retorna a la Máquina de Absorción para volver a enfriarse según el procedimiento descrito.

#### **d) El circuito de la torre de enfriamiento**

Se encarga de sacar el calor absorbido por el agua helada en las manejadoras de aire (de 4°C a 8°C) y mandarlo al exterior regresando el agua a la máquina de absorción.

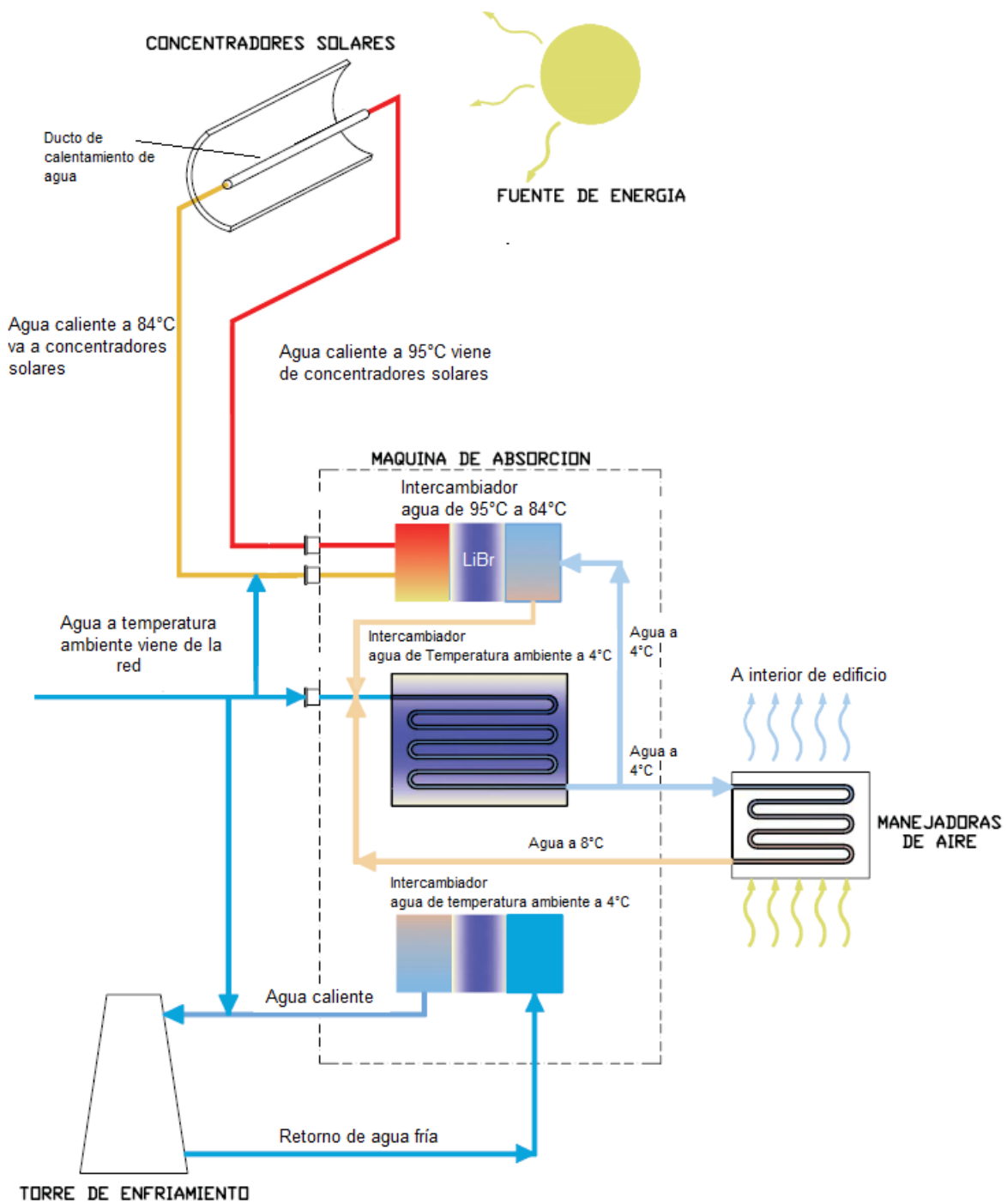


Figura IV.3. Esquema del sistema de enfriamiento con máquina de absorción Chiller 16LJ. Edificio Administrativo Planta de Cemento HOLCIM-APASCO, Hermosillo.



### **IV.3.2 Descripción de la operación del sistema**

#### **a) Puesta en marcha para el campo de colectores por la mañana**

El controlador del campo de colectores contiene un software que usa latitud, longitud y tiempo de entrada al día para hacer que los colectores sigan al sol. La bomba de circulación del campo de colectores se encenderá cuando los receptores alcancen una temperatura deseable del Fluido de Alta Temperatura (High Temperature Fluid, HTF) programada para evitar un choque térmico en el sistema (usualmente igual a la temperatura de la parte superior del tanque de almacenamiento térmico). El controlador del campo continuará siguiendo al sol y operando la bomba de circulación mientras haya ganancia positiva de calor a la temperatura deseada de operación.

#### **b) Puesta en marcha del enfriador por la mañana**

El enfriador se iniciará en la mañana cuando el suministro de agua caliente proveniente del tanque de almacenamiento térmico haya alcanzado la temperatura apropiada (82.22°C). El controlador activará la bomba de circulación de agua caliente entre el enfriador y el tanque de almacenamiento. Los controladores del enfriador determinarán la temperatura solar del HTF requerida para operar el enfriador a la carga deseada.

#### **c) Operación durante el día**

El controlador del enfriador modulará la válvula de control del agua caliente, con el fin de controlar el calor solar al enfriador, para que coincida la capacidad del enfriador con la carga de refrigeración del edificio. Para una capacidad nominal de 75 toneladas, es necesaria agua a 95°C. Si la carga de refrigeración decae mientras los recursos solares se mantienen altos, la temperatura del tanque de almacenamiento térmico aumentará. Si la temperatura de la parte superior del tanque de almacenamiento alcanza un valor alto preestablecido (98.88°C), los controladores del campo de colectores moverán los canales ligeramente fuera del foco para permitir que la temperatura del tanque de almacenamiento descienda a un valor más bajo, después de eso el seguimiento solar puede reanudarse.

La bomba de circulación de los colectores, continuará operando tanto como el campo de colectores siga ganando calor. Los controles del campo moverán los canales a una posición de estiba y asegurarán la bomba de circulación si no hay ganancia de calor. El enfriador continuará operando hasta que la temperatura del tanque de almacenamiento decline hasta un valor bajo preestablecido (79.44°C) después del cual el enfriador será asegurado (apagado).

#### **d) Condiciones de alarma**

**d.i)** Si el enfriador es asegurado durante el día por cualquier razón, y la energía solar es todavía colectada, los canales deberán ser movidos a la posición de estiba y la bomba de circulación del campo deberá ser asegurada después de que la temperatura del tanque de almacenamiento alcanza un valor alto preestablecido.

**d.ii)** Si por alguna razón, la temperatura del HTF excede un cierto valor preestablecido (digamos 98.88) entonces el controlador del campo dirigirá los receptores fuera del foco hasta que la temperatura del HTF disminuya.

**d.iii)** Si una línea individual de receptores excede un cierto valor preestablecido, (115.55°C), entonces el controlador del campo deberá dirigir los receptores a la posición de estiba y asegurar la bomba de circulación. Esta condición requerirá una inspección visual del campo de colectores para determinar qué causó el exceso de temperatura.

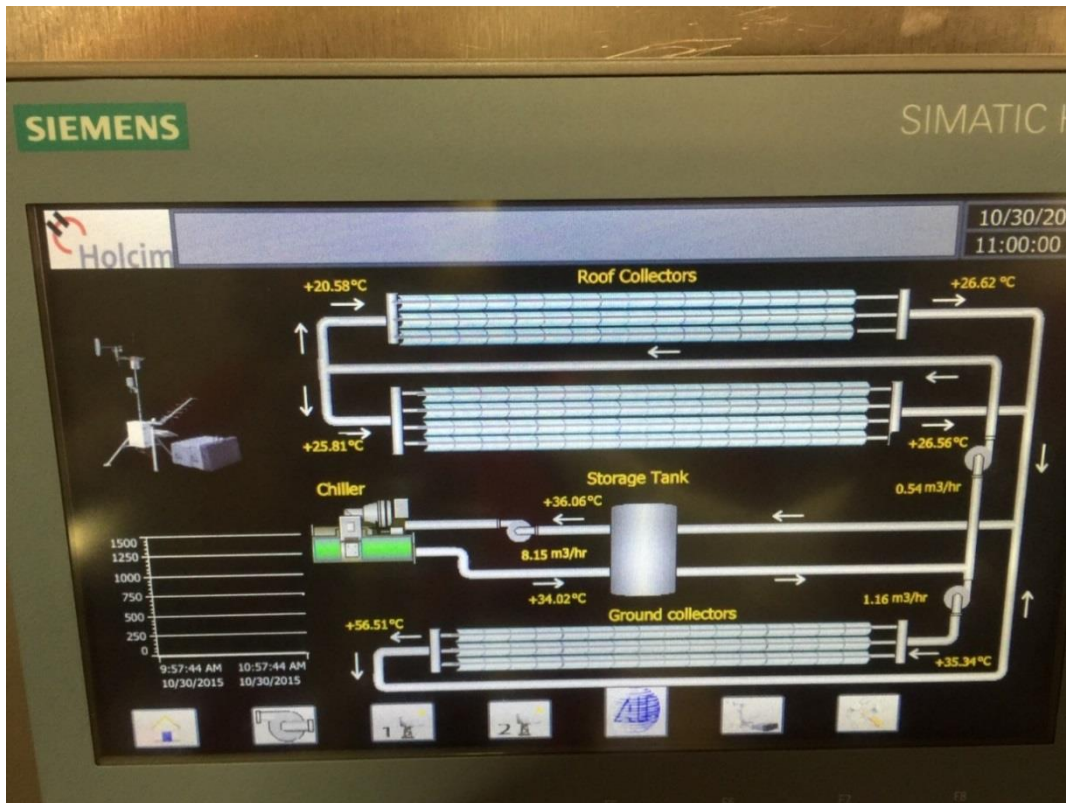
**d.iv)** Si la bomba de circulación del campo pierde potencia, una fuente de energía ininterrumpida de emergencia (Uninterruptible Power Supply, UPS) moverá los colectores a la posición de estiba.

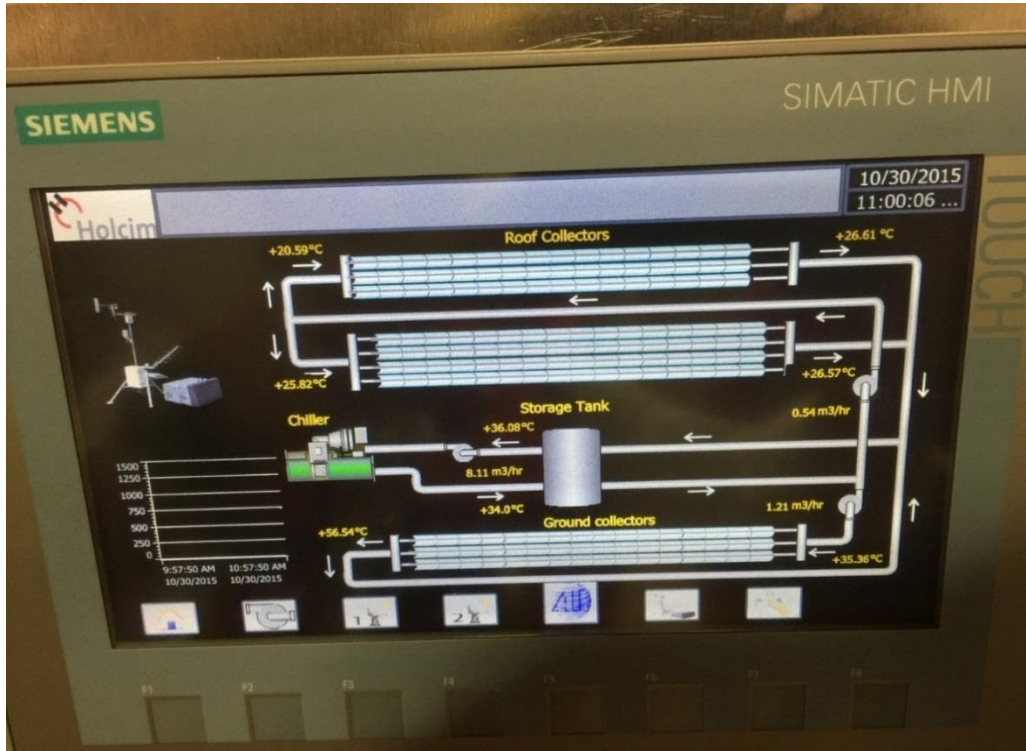
# Capítulo V

## V.1 Cálculos y Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de la corrida experimental que se realizó en las instalaciones de HOLCIM-APASCO, planta Hermosillo.

Las figuras V.1 y V.2 muestran los paneles de monitoreo de los campos solares, tanto del techo como del suelo, así como del equipo enfriador, tanque de almacenamiento y equipo auxiliar. Los datos necesarios de la corrida fueron extraídos de la pantalla de monitoreo y fueron recopilados en la tabla V.1, la cual contiene: flujo másico de agua proveniente del tanque de almacenamiento, temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo en las tuberías de los colectores, así como temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo en el enfriador. La corrida del sistema de refrigeración data del día 30 de Octubre del 2015, con una primera captura a las 11:00:00 a.m. y una segunda a las 11:00:06 a.m.





Figuras V.1 y V.2. Captura del monitor de control del sistema campo solar-enfriador, para el día 30 de Octubre del 2015.

Para obtener la eficiencia del campo solar, fue necesario primeramente, tomar en cuenta el marco teórico establecido en el capítulo II, sección II.9, y calcular el calor útil ganado por el fluido de trabajo, para la cual se utilizó la ecuación 2.18, y cuyo valor se muestra en la tabla V.1 en W y kW.

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (2.18)$$

| 30/10/2015 |             |                |                        |                        |                       |                        |
|------------|-------------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| HORA       | M<br>[KG/S] | CP<br>[J/KG°C] | T <sub>i</sub><br>[°C] | T <sub>o</sub><br>[°C] | Q <sub>U</sub><br>[W] | Q <sub>U</sub><br>[KW] |
| 11:00      | 0.32        | 4,184.00       | 35.34                  | 56.51                  | 28,344.09             | 28.34                  |
| 11:00:06   | 0.34        | 4,184.00       | 35.36                  | 56.54                  | 30,129.82             | 30.13                  |

Tabla V.1. Datos de entrada y salida del sistema, para el día 30 de octubre del 2015.

Segundo, el área total del campo solar, se obtuvo a partir del dato de área por colector de la tabla II.1 (5.21 m<sup>2</sup>), que como ya se mencionó en el capítulo II, está distribuido en 6 líneas de 8 colectores cada una, dando un total de 48 colectores, el área total del campo es de 250.08 m<sup>2</sup>.

Lo siguiente fue hacer un promedio de la radiación directa normal, cuyos datos fueron adquiridos a través de la Estación Solarimétrica de la Plataforma Solar de Hermosillo, Sonora y que se muestran en la tabla V.2. Esto con la finalidad de comprobar que no hubiera variaciones significativas de radiación durante la corrida.

| <b>30/10/2015</b> | <b>RADIACIÓN DIRECTA</b> |
|-------------------|--------------------------|
| <b>HORA</b>       | <b>NORMAL</b>            |
|                   | <b>[W/M<sup>2</sup>]</b> |
| 10:50             | 922.745168               |
| 10:51             | 922.506649               |
| 10:52             | 921.283771               |
| 10:53             | 921.284804               |
| 10:54             | 920.996834               |
| 10:55             | 921.522759               |
| 10:56             | 922.995619               |
| 10:57             | 923.549042               |
| 10:58             | 926.556677               |
| 10:59             | 927.541726               |
| 11:00             | 927.050533               |

Tabla V.2. Radiación directa Normal para el día 30 de Octubre del 2015, para un lapso de 10 minutos (10:50 a.m.-11:00 a.m.).

El promedio de la radiación directa normal es 923.098 W/m<sup>2</sup>. La gráfica V.3 muestra la variación de la radiación directa normal en el lapso de dos horas, desde las 10:00 a.m. hasta las 12:00 p.m., siendo un comportamiento casi constante.

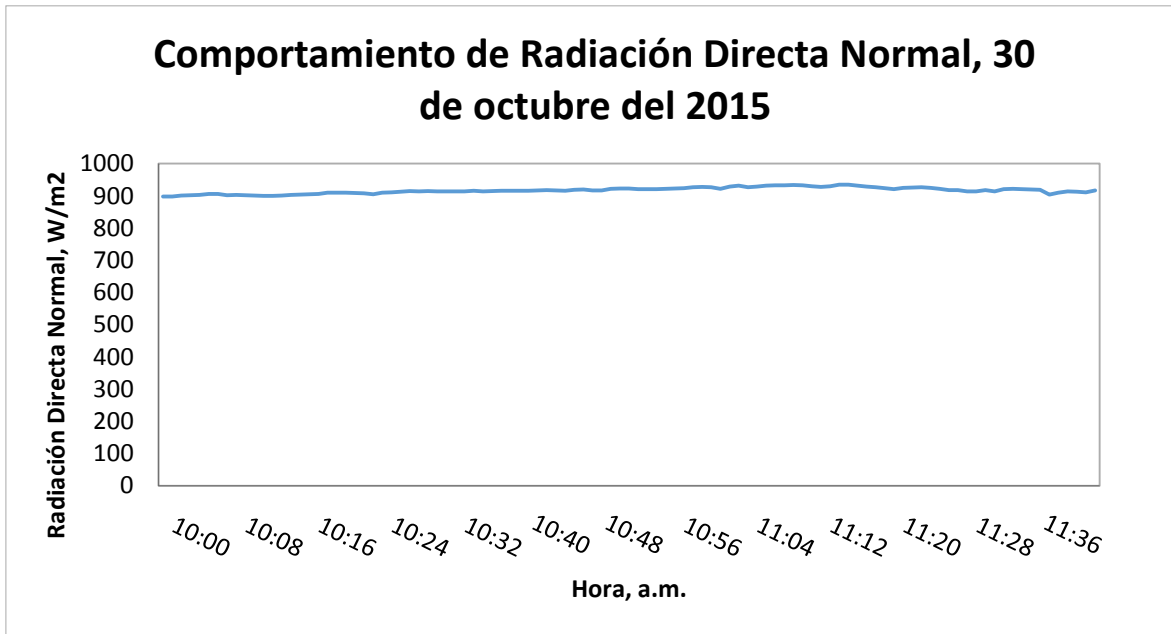


Figura V.3 Gráfica de radiación directa Normal para el día 30 de octubre del 2015, 10:00a.m-12:00p.m.

Es necesario obtener el calor total ganado por el campo solar, a partir del promedio de la radiación directa normal y el área total del campo solar, siendo 230,848.85 W.

Finalmente, la eficiencia es calculada con la ecuación 2.16

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_b A_c} \quad (2.16)$$

| Hora     | $Q_u$ [kW] | $G_b A_c$ [kW] | Eficiencia | Ef %   |
|----------|------------|----------------|------------|--------|
| 11:00    | 28.34      | 230.85         | 0.12       | 12.28% |
| 11:00:06 | 30.13      | 230.85         | 0.13       | 13.05% |

Tabla V.3. Eficiencia del campo solar, 30 de Octubre del 2015.

La eficiencia resultante arroja un valor de alrededor del 12%, de la cual cabe recordar es una eficiencia puntual, que se obtuvo para sólo una determinada hora del día 30 de octubre del 2015 (11:00 a.m.), y no es una eficiencia que se pueda tomar como general en el desempeño del campo solar de la empresa.

Una eficiencia global puede ser calculada si se consideran más factores y condiciones de operación, como lo son las pérdidas térmicas por convección y radiación, pérdidas ópticas, cálculo de calor acumulado para intervalos diferentes de tiempo y a diferentes horas del día, obtención de valores de pérdidas por extremos, etcétera. Según lo reportado en otras bibliografías, la eficiencia de los concentradores de canal parabólico puede alcanzar desde un 30 al 60%.

Además de las pérdidas térmicas, las pérdidas ópticas no fueron calculadas en este trabajo, no obstante, están íntimamente relacionadas con la razón de la baja eficiencia obtenida por los concentradores CCP. Para aclarar mejor esta parte, se presenta lo siguiente:

$$\eta_0 = \rho\tau\alpha\gamma \quad (2.8)$$

Donde,

| PARÁMETRO                        | VALOR |
|----------------------------------|-------|
| Reflectancia, $\rho$             | 0.7   |
| Transmitancia, $\tau$            | 0.88  |
| Absortancia, $\alpha$            | 0.8   |
| Factor de intercepción, $\gamma$ | 0.92  |

Los valores presentados en la tabla son solamente propuestos. De esta manera tenemos que,

$$\eta_0 = 0.45$$

Este valor indica un 45% de pérdida de eficiencia de un colector, lo que no es despreciable. Una explicación a este resultado es la imperfección de la superficie reflectora, el vidrio que cubre al receptor no es totalmente transparente, la geometría del concentrador parabólico no es perfecta, etcétera. La figura V.4 da una idea de dónde actúan estos parámetros en el equipo solar.

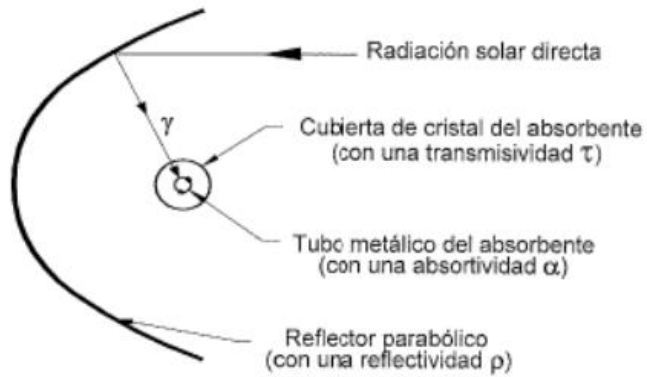


Figura V.4. Factores ópticos sobre concentrador de canal parabólico.

Presentada la importancia del cálculo de pérdida óptica, se puede decir que de igual manera otras condiciones deben ser tomadas en cuenta al momento de estar en operación tanto el campo solar, como el equipo de enfriamiento, para que se pueda asegurar un óptimo funcionamiento del sistema.



# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

La tecnología de concentrador solar parabólico permite alcanzar temperaturas moderadas ( $80 < T < 350$  °C) que posibilitan la utilización de calor solar en algunos procesos que requieren funcionar en este rango de temperaturas. Las aplicaciones principales son en la generación de energía eléctrica, la generación de calor industrial (sustituyendo calderas), fuente térmica para refrigeración solar, entre otros.

Los concentradores solares de canal parabólico tienen un gran potencial en calor de proceso y se espera puedan en un futuro ser una tecnología accesible para las industrias.

Los equipos de refrigeración por absorción son comerciales y se les puede adquirir en compañías especializadas, esto significa que esta tecnología ya es madura y su comercialización es un hecho. Estos equipos normalmente requieren de una fuente de calor y temperaturas por arriba de 80°C para su funcionamiento.

El acoplamiento de un sistema de refrigeración por absorción y un sistema de calentamiento solar presenta un reto técnico que se está en proceso de mejorar, ya que la intermitencia de la radiación solar disponible es un factor importante a la hora de diseñar (calcular) la capacidad de entrega de calor de un campo solar.

En este estudio se pudo evaluar la eficiencia instantánea del campo solar conformado por 48 colectores de canal parabólico instalados en un arreglo que se describe en los capítulos anteriores, la eficiencia obtenida es de alrededor de 12%.

La baja eficiencia que presentan estos colectores puede ser debida a varios factores como se analizó en los capítulos anteriores, ya sea por baja reflectancia de la superficie reflectora, errores geométricos de la parábola, errores de seguimiento solar, suciedad de las superficies (tanto reflectora como receptora), además de las pérdidas de calor al ambiente ya sea por convección o radiación desde el tubo receptor.

Mayores estudios son requeridos para evaluar la variación de la eficiencia con el tiempo y distintas temperaturas de operación.

## Recomendaciones

Como punto final, se hacen las recomendaciones sobre la base del presente trabajo de investigación:

- Se recomienda mantener limpieza de la superficie de los espejos reflectores en los canales parabólicos, así como en los tubos de vidrio que conforman los receptores, ya que como se mostró en la discusión de resultados, las pérdidas ópticas resultan ser un factor que influye notablemente en el resultado de la eficiencia de un concentrador.
- Atendiendo el punto anterior, se recomienda crear un programa de limpieza para las superficies reflectoras de los concentradores y la cubierta del receptor, de tal manera que se puedan monitorear la eficiencia óptica y térmica una vez realizado el mantenimiento, y así realizar mejoras dependiendo de los resultados obtenidos. La frecuencia de limpieza puede ser entre una y dos veces a la semana, o variar dependiendo del criterio del responsable de área de la empresa.
- Se recomienda realizar una inspección minuciosa en los receptores de los concentradores teniendo en cuenta que, la expansión térmica del vidrio y de los tubos de metal, puede provocar que las juntas entre ellos se debiliten y haya una pérdida de vacío, sin el cual la eficiencia de los equipos se ve comprometida. Debido a que en el receptor recae el rendimiento global del concentrador de canal parabólico, problemas relacionados al alineamiento de receptores y sombreado han de ser considerados.
- Ampliar el campo solar de la empresa, con el fin de obtener mayor recepción de radiación solar con la cual se pueda operar el sistema de refrigeración en su capacidad total. Esto se puede lograr implementando distintos dispositivos concentradores, ya sean tubos evacuados, reflectores Fresnel, etcétera. La ampliación puede considerarse como una instalación extra o bien, de sustitución completa, a los concentradores dañados del techo (como se mencionó en parte de la justificación).
- Se recomienda realizar inspecciones una vez a la semana en el funcionamiento del software de controladores, para evitar tener pérdidas por deficiencia en el seguimiento solar.

- Recopilar una base de datos de reflectancia, transmitancia, absortancia, alineaciones, flujos máxicos, temperaturas de entrada y salida, tiempo de operación, etcétera, por lo menos durante mes, con el fin de ampliar el panorama del comportamiento de operación del sistema completo de refrigeración.
- Realizar corridas del sistema en verano, para calcular la eficiencia térmica de los colectores y eficiencia de enfriamiento, con objetivo de observar el comportamiento del sistema en temperaturas elevadas, que es cuando se tiene mayor necesidad de refrigeración.

# Bibliografía y Consultas Electrónicas

## Bibliografía

- [1] DUFFIE J., BECKMAN W., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2a Ed., Wiley-Interscience, 1991.
- [2] GOSWAMI Y., *Principles of Solar Engineering*, 3era Ed., CRC Press, 2015.
- [3] KALOGIROU S., *Solar Energy Engineering*, 2da. Ed., Academic Press, 2004.
- [4] CABANILLAS R., et.al., *Introducción a la Concentración Solar*, Textos Académicos UNISON, 2005.
- [5] De Winter F., *Solar Collectors, Energy Storage and Materials*, The MIT Press, 1990.
- [6] De Lucas A., *Termotecnia básica para Ingenieros Químicos: Procesos termodinámicos y Máquinas*, 1era. Ed., 2007, Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- [7] UNAM (México), 2005, *Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México*. Informe.
- [8] SENER (México), 2014, *Informe sobre la Participación de las Energías Renovables en la Generación de Electricidad en México*. Informe.
- [9] FIDE (México), CNEE (Guatemala), 2010, *Promotores de Ahorro y Eficiencia de Energía Eléctrica*. Curso-Taller.
- [10] IDAE (España), 2011, *Evaluación del Potencial de Climatización con Energía Solar Térmica en Edificios*. Estudio Técnico.
- [11] FENOSA (España), 2007, *Manual de Eficiencia Energética*. Manual.
- [12] GUANGDONG Z., LEWANDOWSKI A., 2012, *A New Optical Evaluation Approach for Parabolic Trough Collectors: First-Principle Optical Intercept Calculation*. National Renewable Energy Laboratory (Estados Unidos).
- [13] JARAMILLO O., 2011, *Energía Solar Térmica de Mediana Temperatura para Calor de Proceso*. Informe. UNAM (México).
- [14] DURÁN M.D, et.al., 2013, *Estudio del Acomplamiento de Diferentes Configuraciones de Ciclo Combinado con Planta Solar de Canal Parabólico*. Informe, UAEM (México).

- [15] CANO J.M., 2001, *Refrigeración por Absorción: Interés Energético e Impacto Ambiental*. Artículo Técnico. ATECYR (España).
- [16] ESQUIVEL, O. et. al., 2006, *Refrigeración solar mediante ciclo de amoniaco-agua acoplado a un concentrador solar*. Universidad Nacional del Nordeste.
- [17] PLACCO, C, et. al., 2007, *colectores solares para agua caliente*, INENCO (Argentina).
- [18] ISAZA C., et. al., 2010, *Análisis Termodinámico de un Sistema de Refrigeración Solar por Absorción Usando Soluciones de Monometilamina-Agua para la Conservación de Alimentos*. Artículo, Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia).
- [19] ENCISO E., et.al., 2012, *Aplicación del Software SOLEEC para Diseñar Colectores Solares de Canal Parabólico*. Artículo. IPN (México).
- [20] VENEGAS E., 2008, *Sistema para Generación y Almacenamiento de Calor de Proceso mediante un Concentrador Solar de Foco Puntual (COSPA-90)*. Tesis, M. en Ing., UNAM (México).
- [21] VIDRIALES E., L.G., 2007, *Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso*. Tesis, M. en Ing., UNAM (México).
- [22] LÓPEZ L., A., 2011, *Instrumentación y puesta a punto de un sistema de refrigeración solar por absorción intermitente*. Tesis, Lic. Ing. Mecánico Electricista, Universidad Veracruzana (México).
- [23] CEREZO J., 2006, *Estudio del Proceso de Absorción con Amoniaco-Agua en Intercambiadores de Placas para Equipos de Refrigeración por Absorción*. Tesis, D. en Ing. Quím., Universitat Rovira I Virgili (España).

### **Consulta Electrónica**

[1] Ciclos de refrigeración por absorción.

<http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion/>

[2] Principio y antecedentes históricos del ciclo de refrigeración por absorción.

<http://www.absorsistem.com/tecnologia/absorcion/principio-y-antecedentes-historicos-del-ciclo-de-refrigeracion-por-absorcion>

[3] National Renewable Energy Laboratory

<http://www.nrel.gov/>