

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Diseño de un equipo de refrigeración por absorción con energía termo solar, para dar una solución de enfriamiento en hoteles de la zona turística en Coveñas, Sucre.

Oscar Hernán Tobón Rivera
Diego Alejandro Echavarría Tobón
José Yovanny Barrientos Londoño

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniería Electromecánica

Asesor(es)
I.M. Adrián Felipe Martínez Pérez

Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento Electromecánica
Medellín, Colombia
2023

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

El presente trabajo contiene un estudio acerca del análisis del comportamiento de los equipos de refrigeración con el objeto de establecer un mecanismo que pueda disminuir los costos y generar refrigeración a través de energías limpias, para esto se presenta un contexto de la situación de la industria a nivel de la OCDE así como los diferentes tipos de energía solar que pueden ser susceptibles de ser generados los para disminuir costos en la producción de energía y por ende en la refrigeración. Así mismo se analizan los diferentes procesos de enfriamiento que existen y los sistemas de refrigeración por absorción y su respectivo funcionamiento, para luego hacer un análisis de la situación del recurso solar en Colombia y los diferentes coeficientes de funcionamiento para garantizar una mejor producción.

Gracias a esto se puede crear un sistema de refrigeración que permita abrir nuevos Campos a la investigación en esta materia específica y poder de esta manera experimentar para generar unos mayores aportes a la sociedad científica a la sociedad hotelera y al medio ambiente.

El presente proyecto pretende responder al panorama actual mediante el cual empieza hacer imperante una mejor relación con el medio ambiente a través de mecanismos como los 17 objetivos de desarrollo sostenible que plantea la ONU. Pero también se convierte en una herramienta que no solo sirve para aprovechar la energía solar, sino que genera mayor rentabilidad económica al interior de las empresas traduciéndose en estos beneficios ambientales y en beneficios económicos.

Palabras Clave: Refrigeración, Sistema, Energía Solar, Absorción, Proceso.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Principalmente, a Dios ya que gracias a él hemos alcanzado este gran logro.

A nuestros padres y que siempre han sido el soporte y la inspiración.

A nuestros hermanos que nos han apoyado en todos los momentos.

A nuestras compañeras que influyeron en gran manera en la formación como personas y profesionales.

Finalmente, gracias a todas las personas que siempre estuvieron apoyándonos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

A	Área de intercambio (m^2)
ABS	Absorbedor.
AHX	Absorber Heat Exchange.
H ₂ O	Agua.
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
NH ₃	Amoníaco.
LiBr	Bromuro de Litio.
CFC	Clorofluorocarbono.
COP	Coefficiente de Operación o de Rendimiento.
Q _H	Calor cedido por el condensador.
Q _L	Calor absorbido por el evaporador.
CHP	Cooling Heating and Power.
COND	Condensador.
C _p	Calor específico a presión constante (kJ/kg*K)
\dot{m}	Caudal másico (kg/s)
q	Calor específico (kJ/kg)
Q	Calor transferido (kJ)
U	Coefficiente global de transferencia de calor (W/m^2*K)
CO ₂ :	Dióxido de Carbono.
η_c :	Eficiencia o rendimiento del Compresor.
EVAP	Evaporador.
h	Entalpía específica (kJ/kg)
G	Generador.
GA	Generador de alta temperatura.
GB	Generador de baja temperatura.
GAX	Generador Absorber Exchange.
HCFC	Hidroclorofluorocarbono.
HFC	Hidrofluorocarbono.
HFC 134a	1,1,1,2 – tetrafluoroetano.
HFO	Hidrofluoroolefina.
HP	Horse Power.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
K	Grados Kelvin.
°C	Grados Celsius.
ODP	Agotamiento Capa de Ozono.
O ₂	Oxígeno.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

GWP	Potencial de Calentamiento Global.
P	Presión (bar, Pa)
Q'	Potencia calorífica (W)
RPM	Revoluciones por minuto.
R	Recuperador de calor.
RA	Recuperador de calor de alta temperatura.
RB	Recuperador de calor de baja temperatura.
SGA	Separador de gotas de alta temperatura.
SGB	Separador de gotas de baja temperatura.
SUB	Subenfriador.
T	Temperatura (°C)
x	Título o calidad.
w_c	Trabajo específico interno de compresión.
v	Volumen específico (m ³ /kg)

Simbología griega:

Γ	Flujo másico por el perímetro mojado (kg/m*s).
δ	Espesor cinematográfico (m).
ΔT_{ln}	Diferencia de temperatura media logarítmico (LMTD) (K).
ΔT_2	Diferencia de temperatura entre el fluido caliente y frío a la entrada (K).
ΔT_1	Diferencia de temperatura entre el fluido caliente y frío a la salida (K).
ρ	Densidad (kg/m ³).
ρ_L	Densidad del líquido (kg/m ³).
ρ_V	Densidad del vapor (kg/m ³).
μ	Viscosidad dinámica (N*s/m ²) $\mu = \nu\rho$
μ_L	Viscosidad absoluta del líquido (N*s/m ²).
ν	Viscosidad cinemática (m ² /s).
Δ	Incremento.
Σ	Sumatoria.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.	11
1. OBJETIVOS.	12
1.1. Objetivo General.	12
1.2. Objetivos Específicos.	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. La oportunidad de los países de la OCDE.	13
2.2. Antecedentes.	14
2.3. Tipos de energía solar.	16
2.3.1. Qué son y cómo son los paneles solares.	17
2.3.2. Colectores solares planos.	17
2.3.3. Colectores solares planos de vacío.	18
2.3.4. Tubos de vacío.	19
2.3.5. Colectores cilíndricos parabólicos.	20
2.3.6. Colectores lineales Fresnel CLF.	21
2.4. Procesos de enfriamiento.	22
2.4.1. Métodos de producción de frío.	22
2.4.2. Despliegue de la energía solar térmica.	24
2.5. Sistemas de refrigeración por absorción.	26
2.5.1. Sustancias de trabajo en sistemas de refrigeración por absorción.	26
2.5.2. Características termodinámicas de los fluidos de trabajo.	27
2.5.3. Los componentes de un sistema de refrigeración por absorción.	30
2.5.4. Producción de frío con energía solar.	32
2.6. Disponibilidad del recurso solar en Colombia.	35
2.7. Ciclo invertido de Carnot.	36
2.8. Coeficiente de Funcionamiento (COP).	38
2.9. Procesos y operación de equipos de un sistema de refrigeración por absorción.	39
2.9.1. Ciclo de absorción sin intercambiador de calor.	39
2.9.2. Ciclo de absorción con intercambiador de calor.	41

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3.	METODOLOGÍA	43
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1.	Proceso de cálculos para el sistema.	47
4.2.	Descripción y cálculos de variables en cada proceso de refrigeración.	47
4.2.1.	Proceso de evaporación.	47
4.2.1.1	Análisis del balance de masa y de energía en la evaporación.	48
4.2.2.	Proceso de absorción.	48
4.2.2.1	Análisis del balance de masa y de energía en la absorción.	49
4.2.3.	Proceso de estrangulamiento.	49
4.2.3.1	Análisis del balance de masa y de energía en la válvula de estrangulamiento.	50
4.2.4.	Proceso del intercambiador de calor.	50
4.2.4.1	Análisis del balance de masa y de energía en el intercambiador de calor.	50
4.2.5.	Proceso de generación.	51
4.2.5.1.	Análisis del balance de masa y de energía de generación.	52
4.2.6.	Proceso de condensación.	52
4.2.6.1.	Análisis del balance de masa y de energía de condensación.	53
4.2.7.	Coefficiente de rendimiento.	53
4.2.8.	Fuente de energía.	54
4.2.9.	Diseño de intercambiador de calor para el absorbedor.	55
4.2.9.1.	Definición del tubo para el absorbedor.	55
4.2.9.2.	El análisis teórico del absorber de tubo vertical es el siguiente.	55
4.2.10.	Diseño del intercambiador de calor del evaporador.	56
4.2.11.	Diseño del intercambiador de calor para el condensador.	56
4.3.	Resúmenes completos de valores, datos y cálculos para los cinco intercambiadores de calor.	57
4.4.	Análisis térmico de una torre de enfriamiento.	59
4.5.	Resumen completo de valores, datos y cálculos para la torre de enfriamiento.	60
4.6.	La cristalización en los equipos de refrigeración.	62
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	64

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

6. REFERENCIAS	66
7. ANEXO	69

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de radiación solar en Colombia.	16
Figura 2: Colectores solares planos, equipos y el tanque de almacenamiento.....	18
Figura 3: Colectores solares planos de vacío.	19
Figura 4: Colectores solares de tubos de vacío.	20
Figura 5: Colectores cilíndricos parabólicos.	21
Figura 6: Colectores lineales Fresnel CLF.....	22
Figura 7: Procedimientos de producción de frío.	23
Figura 8: Comparación entre compresor térmico y compresión mecánica.....	30
Figura 9: Ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco.....	31
Figura 10: Territorio Colombiano la incidencia de la radiación solar.	35
Figura 11: Ciclo invertido de Carnot.	37
Figura 12: Esquema del ciclo teórico de absorción con una solución LiBr-H ₂ O.	40
Figura 13: Esquema general de los componentes del ciclo de absorción.	40
Figura 14: Esquema de flujo en una unidad de absorción de un solo paquete.....	41
Figura 15: Esquema de un ciclo teórico de absorción con intercambiador de calor recuperativo para una solución de LiBr-H ₂ O.	42
Figura 16: Esquema general del sistema de refrigeración por absorción.....	46
Figura 17: Diagrama de flujos en el evaporador.	48
Figura 18: Diagrama de flujos en el absorbedor.	49
Figura 19: Esquema de la válvula de estrangulamiento en la solución de LiBr.	50
Figura 20: Esquema de la válvula de estrangulamiento en el refrigerante.....	50
Figura 21: Diagrama de flujos en el intercambiador de calor.	51
Figura 22: Diagrama de flujos en el generador.	52
Figura 23: Diagrama de flujos en el condensador.....	53
Figura 24: Esquema general de torre de enfriamiento.	60

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Capacidad instalada de colectores solares por tipo de tecnología a nivel mundial al cierre de 2019.	25
Tabla 2: Sustancias de trabajo en sistemas de absorción y adsorción.	27
Tabla 3: Clasificación de tecnologías de producción de frío con energía solar.	34
Tabla 4: Parámetros para el diseño.	47
Tabla 5: Resumen de datos para el sistema de refrigeración de simple efecto con LiBr-H ₂ O.	54
Tabla 6: Flujos de energía en los diferentes componentes del sistema.	54
Tabla 7: El rango de valores típicos para la determinación del coeficiente global de transmisión de calor “U”.	57
Tabla 8: Resumen de los datos y cálculos de los intercambiadores de calor (I.Q.) en los equipos del ciclo de refrigeración por absorción por LiBr-H ₂ O.	58
Tabla 9: Rango permitido para la torre de enfriamiento.	61
Tabla 10: Resumen de los datos y cálculos de la torre de enfriamiento.	61

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

INTRODUCCIÓN.

En vista de la inminente escasez de recursos energéticos amigables con el medio ambiente, aun cuando no son política y económicamente los más deseados, es prioridad mundial recurrir a fuentes energéticas gratuitas o renovables que permitan revertir la grave situación ambiental, aprovechando los convenios internacionales dirigidos a invertir en su desarrollo.

Como resultado es evidente, la posibilidad de disminuir notablemente el consumo eléctrico, en el área de refrigeración y aire acondicionado, sin afectar los grandes beneficios y confort que estas tecnologías proporcionan a la humanidad, aun cuando la mejor opción sea mejorar la eficiencia de los equipos, los avances alcanzados en los últimos años con nuevas sustancias limitan su desarrollo, por otro lado el uso de energías gratuitas, tales como la energía térmica suministrada por radiación solar resulta ser mucho más interesante.

La variedad de fuentes energéticas, nuevos desarrollos tecnológicos y crecimiento de la eficiencia energética, son opciones viables para suplir la alta demanda de energía eléctrica, y son posibles de implementar en el sector del aire acondicionado y refrigeración, para esto es necesario la inclusión de políticas y garantías que permitan a las instituciones y empresas nacionales, desarrollar proyectos e investigaciones priorizadas por su potencial ambiental y no solo el económico.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. OBJETIVOS.

1.1. Objetivo General.

Realizar estudio del diseño de un equipo de refrigeración por absorción con energía termo solar, para dar una solución de enfriamiento en la zona hotelera de Coveñas con la capacidad de refrigeración según las condiciones ambientales del lugar establecido.

1.2. Objetivos Específicos.

- ✓ Establecer condiciones de incidencia de la radiación solar para la zona hotelera de Coveñas, datos para la generación de energía térmica.
- ✓ Documentar la demanda térmica promedio de refrigeración generada en la zona hotelera de Coveñas.
- ✓ Identificar características de los equipos de absorción con potencial para su implementación y su relación con las condiciones estudiadas.
- ✓ Seleccionar el equipo para la implementación según la capacidad determinada por los requerimientos específicos de la zona hotelera de Coveñas y el potencial energética de su ubicación geográfica.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

Este proyecto tiene como finalidad mejorar la calidad de vida a la población de la zona hotelera del municipio de Coveñas Sucre, mediante la implementación de un sistema de refrigeración por absorción con energía termo solar. Así la calidad de vida para la población hotelera es mejor en cuanto a la seguridad, economía y calidad del servicio energético con un aporte al medio ambiente.

2.1. La oportunidad de los países de la OCDE.

En la edición 2014 de la OCDE se abordan nuevos aspectos, tales como cambio climático y el valor agregado del comercio. En el espectro internacional, los estados no socios de la OCDE poseen más gasto energético para su industria.

Como resultado de los procesos de relocalización industrial, donde cada vez más las industrias intensivas en energía se ubicarán en países emergentes, se espera que para el año 2040 el 73% del consumo energético del sector se encuentre en estos países. Sin embargo, la intensidad energética del sector industrial de los países fuera de la OCDE es más alta que la de su contraparte. (CONNUE, 2018)

Lo anterior revela, por un lado, las diferencias entre el tipo de industria y, por otro lado, la oportunidad para mejorar la eficiencia de los procesos y el aprovechamiento de fuentes renovables con menores costos en comparación con fuentes tradicionales. (Plantas de refrigeración solar, 2021)

El uso de energía en la industria es ampliamente variado en el contexto internacional, puede ser utilizada para los procesos de fabricación y ensamble, para la generación de vapor y cogeneración, para calentamiento y enfriamiento de equipos, iluminación, así como acondicionamiento de espacios. A pesar de los diversos usos finales, el uso de energía en el sector industrial se puede categorizar en dos grandes tipos, el eléctrico y térmico. (Dossat, 2001)

El desarrollo tecnológico de la refrigeración y el aire acondicionado solar podrían tener un impacto importante sobre el desarrollo social y económico en Colombia, ofreciendo un recurso energético confiable que permita la conservación de los productos alimentarios y el acondicionamiento de recintos para brindar un confort. (Murcia, 1993)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Se pretende estudiar un diseño de un sistema de refrigeración por absorción impulsado inicialmente con energía térmica solar, donde la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4,0 y 4,5 kWh/m² por día, con estos valores se puede tener una capacidad establecida de refrigeración, para operar como un sistema de refrigeración en las edificaciones hoteleras de Coveñas y ser más amigable con el medio ambiente. (IDEAM, 2020)

2.2. Antecedentes.

En la región caribe colombiana, se destacan otros destinos de sol y playa con gran demanda en el mercado turístico nacional, como es el caso de Tolú y Coveñas, ubicados en el departamento de sucre, sobre el mar Caribe. Estos dos municipios, próximos geográficamente, poseen una infraestructura de alojamiento representativo en cabañas y hoteles de baja capacidad, así como un sistema de playas de arena blanca y agua cristalina que los hace apetecibles para turistas del centro y norte del país. Sin embargo, desde un punto de vista integral, los municipios carecen de una política de competitividad y de inversión que potencialicen sus capacidades territoriales y sectoriales para un confort de las habitaciones hoteleras, que impacten en el desarrollo sostenible de la región. En la actualidad la energía solar se utiliza para diferentes aplicaciones tales como el calentamiento del agua, la construcción de calefacción-refrigeración, cocción, potencia y refrigeración. En los últimos años, muchos países se han enfrentado a dificultades con el asunto de los sistemas de refrigeración. Es decir, la demanda de aire acondicionado tanto para los edificios comerciales y residenciales durante el verano está cada vez más en aumento.

Parece ser un dato curioso constatar que la máquina frigorífica de absorción, introducida por el Francés Ferdinand Carre, con agua y amoniaco, a pesar de que su concepción, su cálculo y su explotación eran sensiblemente más complejos que los de la máquina a compresión, pudo ser inmediatamente fabricada y difundida. En las últimas décadas se tienen sistemas integrados con paneles solares térmicos para impulsar ciclos de absorción con un COP entre 0,72 y 1,08. (Catota Ocapana & Tonato, 2015)

El conocimiento de la distribución espacial y temporal del potencial energético solar es necesario para facilitar la identificación de regiones estratégicas en donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas.

En la mayor parte del territorio colombiano la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4,0 y 5,0 kWh/m² por día, los valores más altos (superiores a los 5,5 kWh/m²

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

por día) se presentan en sectores norte de Colombia. Las zonas con menor intensidad de radiación solar global con promedios inferiores a los 3,5 kWh/m² por día, se presentan en el occidente, suroriente y oriente de Colombia. Para el presente trabajo la posición geográfica es favorable, el municipio de Coveñas se encuentra en la costa norte de Colombia, porque tiene una gran disponibilidad del recurso solar, (IDEAM, 2020).

En la actualidad es posible sustituir los equipos de refrigeración por dispositivos en los que el consumo eléctrico sea reemplazado por el calor. Este calor proviene de fuentes diversas, en las que podemos incluir alguna instalación térmica. La refrigeración mediante calor se consigue gracias a las máquinas de enfriamiento por absorción, además, un ciclo termodinámico de enfriamiento por absorción 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, (Petukhov, Irvine, & Hartnett, 1970).

Consiste en la disponibilidad de sus recursos renovables y facilita la identificación de regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población. El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, y como fuente directa de producción de biomasa.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La siguiente [Figura 1](#), ilustra la Irradiación global en Colombia.

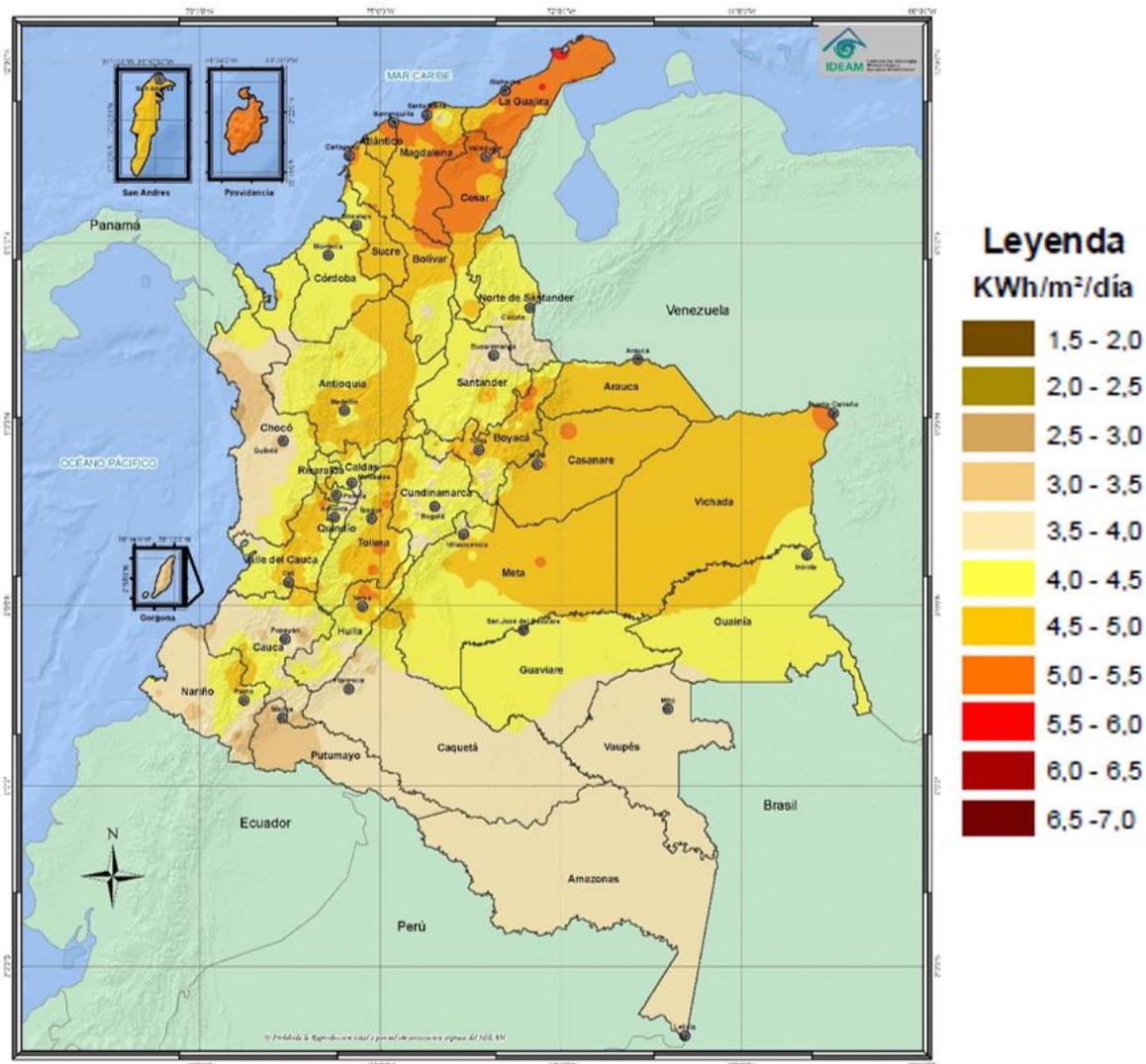


Figura 1: Mapa de radiación solar en Colombia.
Fuente: (IDEAM, 2020)

2.3. Tipos de energía solar.

Existen tres tecnologías principales para el aprovechamiento de la energía solar:

- La energía solar fotovoltaica, que convierte la luz del sol en energía.
- La energía solar concentrada, que aprovecha el calor del sol para impulsar motores térmicos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- La energía térmica solar (energía termo-solar) y frío solar, que usa la energía solar para proveer de agua caliente o acondicionar el aire refrescándolo. (Solar Celsia & Energía solar Colombia, 2021)

2.3.1. Qué son y cómo son los paneles solares.

Los paneles solares son módulos fotovoltaicos individuales que captan la energía que proporciona el sol convirtiéndola en electricidad. Están formados por celdas solares que a su vez contienen células solares individuales hechas de materiales semiconductores como el silicio (cristalino y amorfo) que transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones).

Cuando hay luz solar, una célula solar se comporta casi como una batería. La luz solar recibida separa los electrones de modo que forman una capa de carga positiva y una de carga negativa en la célula solar; esta diferencia de potencial genera una corriente eléctrica.

Estos paneles se conectan a su vez a una batería que almacena la electricidad generada y es esta carga la que se utiliza. Los paneles solares se componen de células fotovoltaicas (PV), que convierten la luz solar en electricidad de corriente continua (DC) durante las horas del día. (Solar Celsia & Energía solar Colombia, 2021)

La penetración de calentadores solares se ha concentrado hasta ahora principalmente en el sector residencial. Se estima que a finales de 2015 el número de sistemas solares térmicos de agua en operación fue de aproximadamente 108 millones en el sector antes mencionado. (Mauthner, Weiss, & Spörk-Dür, 2019)

De acuerdo con su uso final, el 63% de la capacidad instalada corresponde a sistemas de pequeña escala instalados en hogares, 28% a sistemas con una escala mayor instalados principalmente en escuelas, hoteles y departamentos, el 6% de estos sistemas fue utilizado para el calentamiento de piscinas y, por último, los sistemas combinados (agua caliente doméstica y calefacción de espacios) representaron el 2% de la capacidad instalada. El 1% restante tuvo aplicaciones como redes de calefacción urbana, procesos industriales y aplicaciones térmicas de enfriamiento solar. (Mauthner, Weiss, & Spörk-Dür, 2019)

2.3.2. Colectores solares planos.

Los colectores solares planos, *Figura 2*, son diseñados para aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de este tipo de colectores difícilmente pasa los 100°C. (Beckman & Duffie, 1991)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las ventajas que se obtienen de este tipo de colectores son que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. (Beckman & Duffie, 1991)

Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos. (Plantas de refrigeración solar, 2021)

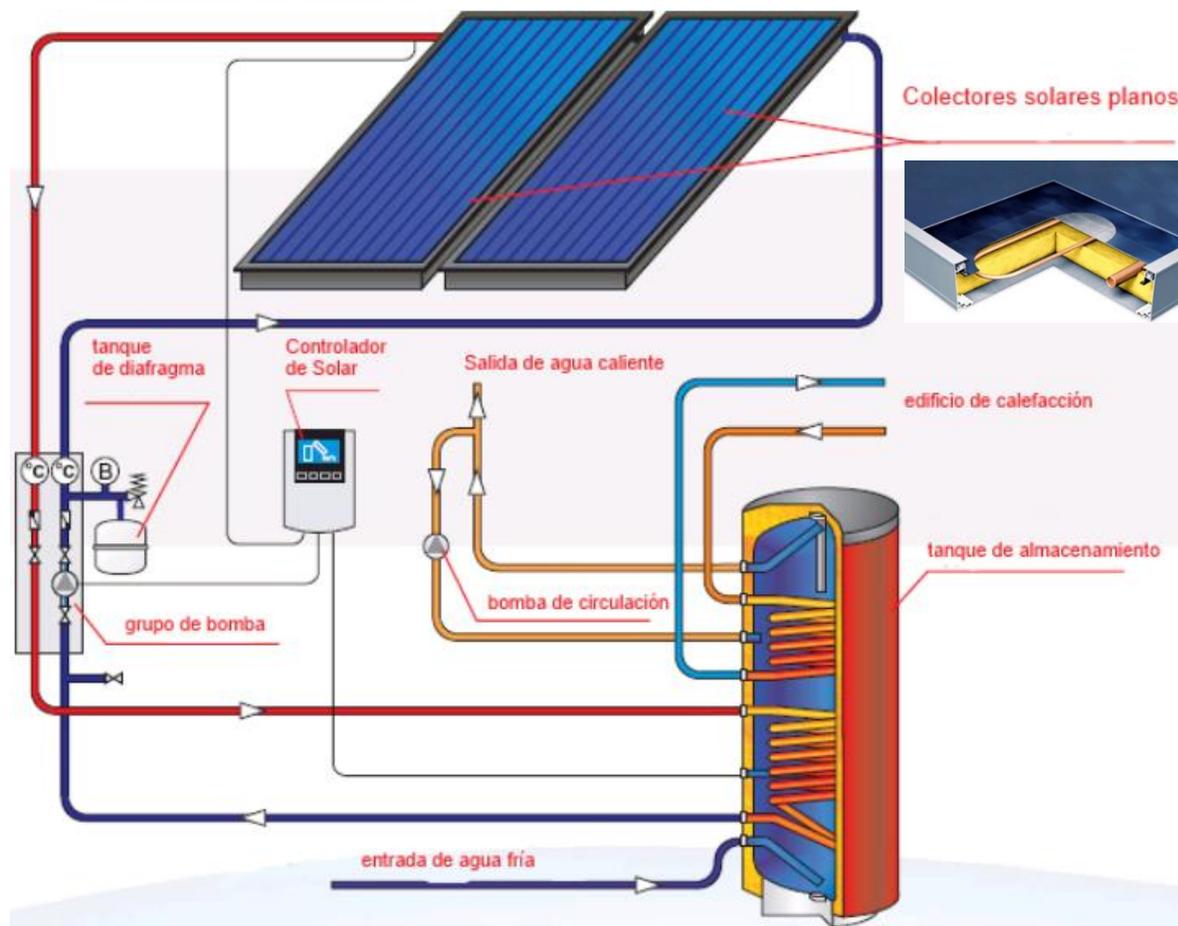


Figura 2: Colectores solares planos, equipos y el tanque de almacenamiento.

Fuente: (Individual Solar Energy, 2021)

2.3.3. Colectores solares planos de vacío.

El colector plano de vacío posee un diseño muy similar al colector plano convencional, pero fabricado con materiales que obtienen altos rendimientos, y que poseen características especiales, tales como superficies selectivas, es decir, materiales que absorben ciertas

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

frecuencias como los infrarrojos, pero que apenas los emiten, permitiendo absorciones del orden del 95%. Además, las pérdidas de convección están minimizadas al máximo mediante el vacío de la caja, que aumenta el rendimiento considerablemente. Con este sistema pueden alcanzarse temperaturas de hasta 120 °C. La desventaja de este sistema radica en el empleo de materiales más costosos y el delicado proceso de vacío. (Colector solar plano de vacío, 2021)



Figura 3: Colectores solares planos de vacío.
Fuente: (Individual Solar Energy, 2021)

2.3.4. Tubos de vacío.

Los colectores de tubo de vacío colocan en el interior del tubo una plancha de material absorbente adecuado, que hace las veces de absorbedor transformando la radiación solar en calor. El absorbedor es recorrido en su superficie por un tubo con flujo directo en el que circula un fluido que eleva su temperatura en contacto con él. (Colector de tubos de vacío, 2021)

La ventaja que posee este tipo de colectores es de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical sin mermar su rendimiento, ya que el tubo puede rotar sobre su eje, inclinándose el absorbedor de la manera más adecuada. Además de ser utilizable en áreas frías ya que permite usar las estrategias contra la congelación de uso general en la energía solar térmica. (Colector de tubos de vacío, 2021)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



Figura 4: Colectores solares de tubos de vacío.

Fuente: (Individual Solar Energy, 2021)

2.3.5. Colectores cilíndricos parabólicos.

Se componen, básicamente, por espejos cilíndricos parabólicos que refleja la radiación solar directa, concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada provoca que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente, transformando así la radiación solar en energía térmica en forma de calor sensible del fluido. (Colector cilíndrico parabólico, 2021)

Los colectores cilindro parabólicos (CCP) resultan idóneos para trabajar dentro del rango de temperaturas 125 °C – 400 °C. Gracias a la concentración de la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del captador, se consigue de forma eficiente elevar la temperatura del fluido de trabajo hasta valores del orden de los 425 °C, pudiendo alimentar procesos industriales dentro del rango de la media temperatura, convirtiéndolo en un captador ideal para acoplarlo a una gran diversidad de procesos industriales. (Colector cilíndrico parabólico, 2021)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

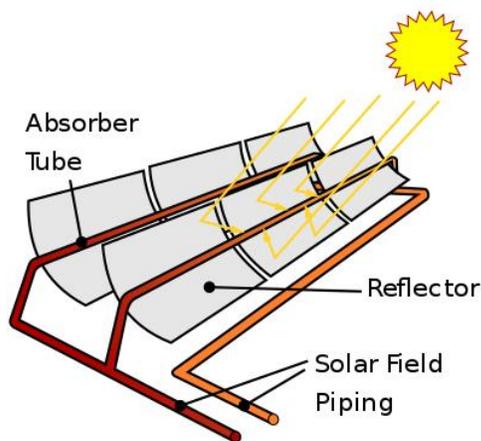


Figura 5: Colectores cilíndricos parabólicos.
Fuente: (Colector cilíndrico parabólico, 2021)

2.3.6. Colectores lineales Fresnel CLF.

Este tipo de colector utiliza espejos planos o ligeramente curvados, los cuales reflejan el sol hacia el absorbedor (situado por encima de ellos), calentando el agua en torno a los 450 °C – 500 °C.

Poseen un sistema que les permite seguir el Sol en todo momento por lo que siempre optimizan la radiación procedente de él. Además, su montaje es sencillo y precisa de un mantenimiento básico por lo que los costes se reducen comparándolos con los CCP. (Colector lineal Fresnel, 2021)

El principio operativo del CLF consiste en captar y redireccionar hacia la cavidad la radiación solar incidente sobre el área de apertura de los espejos curvos. Una fracción de la energía concentrada que atraviesa la cubierta de vidrio de la cavidad es redireccionada por el concentrador secundario tipo CPC, el cual se encarga de hacerla incidir sobre el absorbedor tubular donde es atrapada por una superficie selectiva de alta absorbancia. La energía solar atrapada por el absorbedor se transmite a un fluido caloportador que circula por la parte interna del tubo, obteniéndose como calor útil, el cual será aprovechado para el suministro de energía térmica a un sistema de aire acondicionado solar. (Lara, Velázquez, Saucedo, & Acuña, 2013)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

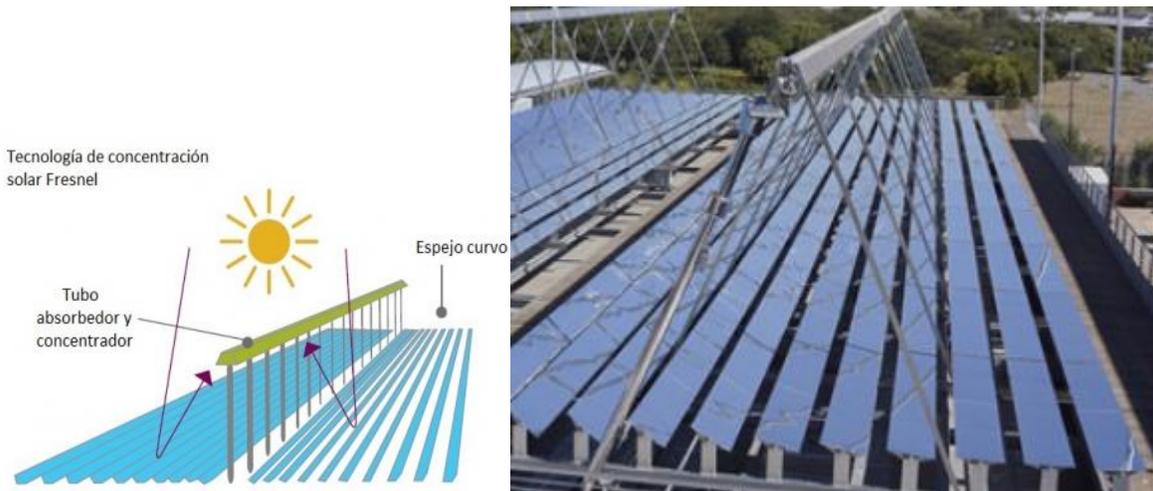


Figura 6: Colectores lineales Fresnel CLF.
Fuente: (Lara, Velázquez, Saucedo, & Acuña, 2013)

2.4. Procesos de enfriamiento.

Todo proceso de enfriamiento en el cual el calor absorbido tiene un efecto sobre el refrigerante puede clasificarse como sensibles o latentes. Cuando hay un aumento de la temperatura del refrigerante debido al calor absorbido se lo denomina proceso de enfriamiento sensible, mientras exista un cambio en el estado físico del refrigerante ya sea una condensación o vaporización debido al calor absorbido, se dice que el proceso de enfriamiento es latente. (Dossat, 2001)

2.4.1. Métodos de producción de frío.

En la naturaleza el calor fluye de un medio de mayor temperatura a un medio de menor temperatura, para realizar lo contrario es necesario la ayuda de una máquina que aporte trabajo, como un refrigerador o una bomba de calor, los cuales son dispositivos cíclicos que extraen calor por medio de un refrigerante, (Pilatosky, 2004)

En la siguiente *Figura 7*, para realizar la producción de frío, los refrigerantes pasan por una serie de cambios de estado debido a los ciclos de refrigeración. Las diversas formas de producir frío se pueden agrupar observado en el siguiente esquema.

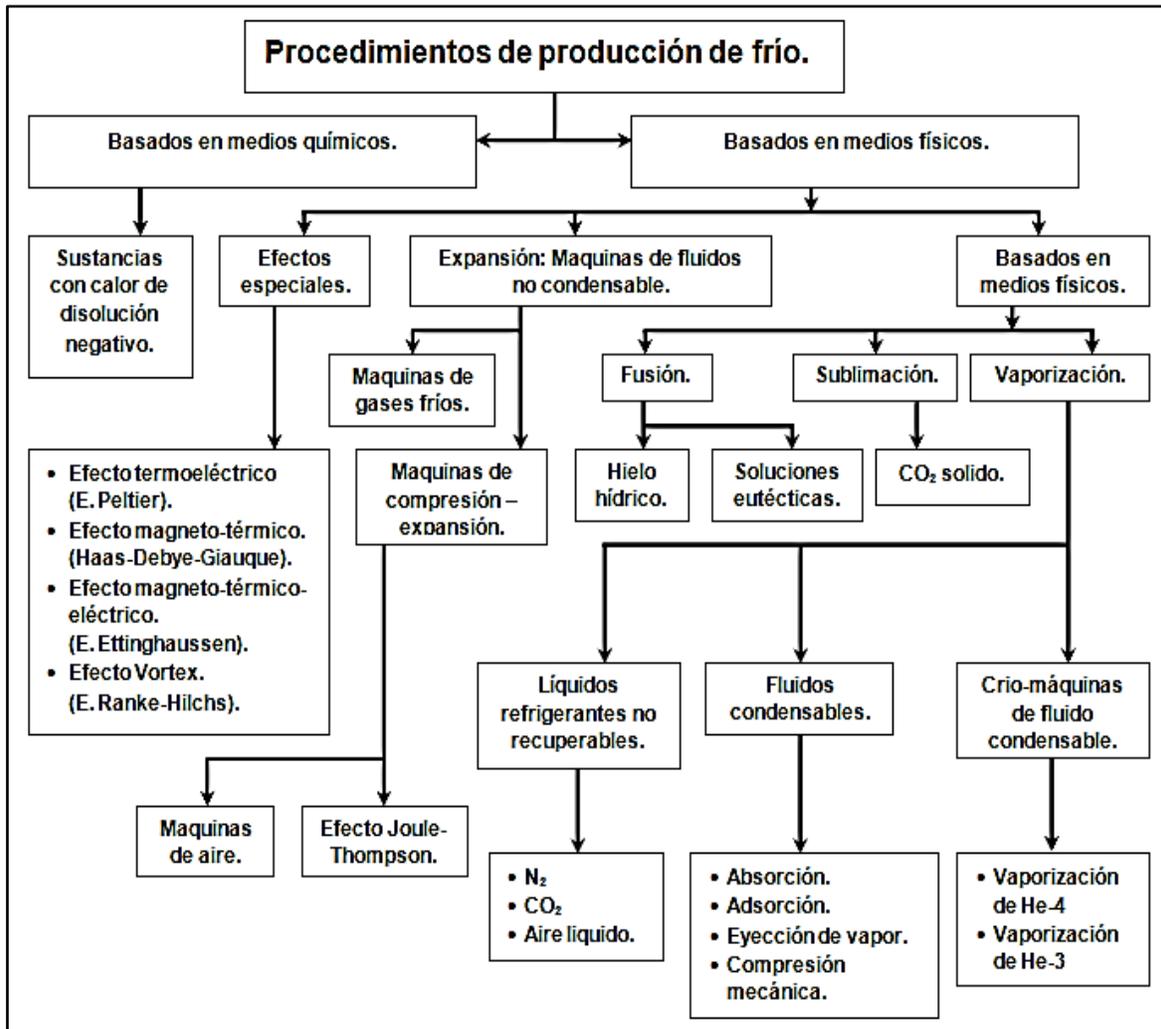


Figura 7: Procedimientos de producción de frío.

Fuente: (Pilatowsky Figueroa, 2004)

Evaporación de un líquido: Se basa en el cambio de estado de un líquido a vapor al suministrarle una cierta cantidad de calor. Se pueden distinguir tres métodos:

✓ **Sin recuperación del gas producido.**

Un líquido con un muy bajo punto de ebullición a presión atmosférica es vaporizado aprovechando su calor latente de vaporización y el gas producido se elimina a la atmósfera.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Para este método se utiliza el nitrógeno líquido y el CO₂ líquido y se suelen emplear para congelación, transportes frigoríficos y cirugía, (Lee, Digulio, & Jeter, 1990).

✓ **Con recuperación del gas producido.**

A comparación del método anterior, aquí el gas que se produce es recuperado para ser utilizado posteriormente. Los procesos para la reutilización del gas requieren de un aporte externo de energía. De acuerdo al sistema utilizado para la recuperación del gas, se puede distinguir:

- **Instalaciones de absorción:** en las que los vapores que se forman añadiendo calor al sistema, son absorbidos y recuperados mediante un absorbente líquido. Se suele utilizar mezclas de amoníaco-agua o bromuro de litio-agua.
- **Instalaciones de adsorción:** la adsorción es la propiedad de ciertas sustancias de retener vapores que las rodean; esta retención es básicamente superficial. Para este método suele utilizarse combinaciones de sílice gel con vapor de SO₂.
- **Instalaciones de eyección de vapor:** este fenómeno se produce al pasar vapor de agua a gran velocidad por un eyector, lo que genera una baja presión en un costado de la misma en comparación con la presión que se consigue en el extremo de la tubería. Las velocidades de flujo de vapor utilizadas son aproximadamente de $1200 \frac{m}{s}$.
- **Instalaciones de compresión mecánica:** en este método, que es el más utilizado por su bajo costo inicial, fiabilidad y eficiencia con la entrada de los CFC, los vapores son tanto aspirados como comprimidos por una bomba o un compresor y enviados a un condensador. El decrecimiento del volumen específico del refrigerante ocasiona varios problemas, uno de ellos es que la energía necesaria para operar el ciclo debe ser proporcionada como trabajo mecánico y este trabajo debe proveerse en grandes cantidades.

✓ **Vaporización de crió-fluidos.**

En este método, se licua el aire y otros gases como el He-3 y He-4, para que posteriormente se expanden en recintos con vacío de hasta 0.12 mmHg (16 Pa), con lo cual se logran temperaturas de hasta 0,4 K; que se utilizan únicamente a nivel de laboratorio, (Murcia, 1993).

2.4.2. Despliegue de la energía solar térmica.

Las enfriadoras de absorción accionadas por agua caliente de origen solar permiten obtener agua refrigerada a temperatura de entre 3,5°C y 15,0°C para instalaciones de climatización u otros usos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La técnica utilizada para enfriar el circuito de agua refrigerada es el ciclo de absorción de LiBr-H₂O accionando el generador con agua caliente procedente de los captadores solares térmicos, a una temperatura nominal de 88°C, aunque ya se logra el efecto frigorífico con agua caliente a partir de 70°C. La capacidad frigorífica depende de la temperatura de entrada del agua caliente, siendo mayor cuanto más elevada sea esta. (Mauthner, Weiss, & Spörk-Dür, 2019)

Aunque es necesario realizar un cálculo preciso en función de la ubicación del campo solar y las características de los paneles utilizados, para una primera aproximación, utilizando agua caliente a 88°C puede considerarse que se necesita un entorno de 2,5 a 3 m² de superficie de captación por cada kW de capacidad frigorífica para el sistema de absorción.

También es necesario instalar uno o más depósitos acumuladores de agua caliente para reservar en ellos, la diferencia de aportaciones de calor, cuando la insolación excede la demanda de la enfriadora, y de una manera que se pueda utilizarla después de la demanda, cuando la aportación sea deficitaria frente a la demanda. Para estimar el volumen que se va acumular, se deberá calcular con la mayor precisión posible con respecto a la curva horaria de demanda y compararla con la de insolación. (Mauthner, Weiss, & Spörk-Dür, 2019)

La mayor cantidad de colectores solares utilizan la tecnología colectores de tubos evacuados (CTE) con el 71,6% de la capacidad instalada, seguido de la tecnología de colectores planos (CP) que ocupa la segunda posición con el 21,9% y, por último, entre las tecnologías de calentamiento de agua, se encuentran los colectores sin cubierta con el 6,2% de la capacidad instalada. Por su parte, los colectores solares de aire utilizados para calentamiento de espacios y procesos de secado en la industria apenas representan el 0,3% de la capacidad térmica solar [Tabla 1](#).

Tabla 1: Capacidad instalada de colectores solares por tipo de tecnología a nivel mundial al cierre de 2019.

TECNOLOGÍA	CAPACIDAD INSTALADA (GW _t)	SUPERFICIE INSTALADA (MILLONES DE m ²)	% DE SUPERFICIE INSTALADA
COLECTORES SOLARES DE AGUA			
Colectores planos	95,7	136,7	21,9
Colectores de tubos evacuados	312,0	445,8	71,6
Colectores sin cubierta	26,9	38,5	6,2
COLECTORES SOLARES DE AIRE			
Con y sin cubierta	1,1	1,6	0,3
Total	435,9	622,7	100,0

Fuente: (Mauthner, Weiss, & Spörk-Dür, 2019)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la refrigeración por absorción la energía necesaria para mantener el ciclo proviene de una fuente calorífica más económica, en este caso energía solar térmica. Los aparatos generadores por absorción son más voluminosos y requieren inmovilidad lo que es muy adecuado para viviendas, aplicaciones industriales, pero no permite su utilización en automóviles, lo que sería muy conveniente como ahorro de energía puesto que el motor tiene grandes excedentes de energía térmica, disipada en el radiador. (Individual Solar Energy, 2021)

2.5. Sistemas de refrigeración por absorción.

“En la naturaleza el calor fluye de un medio de mayor temperatura a un medio de menor temperatura, para realizar lo contrario es necesario la ayuda de una máquina que aporte trabajo, como un refrigerador o una bomba de calor, los cuales son dispositivos cíclicos que extraen calor por medio de un refrigerante”, (Murcia, 1993).

La energía termo solar consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstica, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción o para producción de energía mecánica y a partir de ella energía eléctrica.

Adicionalmente puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío.

2.5.1. Sustancias de trabajo en sistemas de refrigeración por absorción.

En la refrigeración por absorción se tienen dos componentes: el refrigerante y el absorbente, los cuales, a las presiones y temperaturas utilizadas en el ciclo de refrigeración. Existe una gran posibilidad de combinaciones posibles entre el refrigerante y el absorbente que se pueden usar en la industria del frío.

La evaporación del refrigerante a partir de una solución líquida se puede reemplazar por evaporación a partir de una concentración sólida. El par comúnmente usado, y sobre lo que se ha estudiado ampliamente y mayor información se posee, es el Amoniaco – Agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) y el Bromuro de Litio – Agua ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$). Sin embargo, otros pares son considerados porque en ciertos casos se requieren condiciones de operación, de construcción y técnicas, entre otras; que no es posible obtener con los sistemas convencionales. (<http://www.mundohvacr.com.mx>, 2020).

En la [Tabla 2](#), se presentan los principales pares refrigerantes usados en diferentes tecnologías de absorción, donde se incluyen además las temperaturas típicas de generación y

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

evaporación, lo que permite tener una idea aproximada de la fuente de energía adecuada y su aplicación, (<http://www.mundohvacr.com.mx>, 2020).

Tabla 2: Sustancias de trabajo en sistemas de absorción y adsorción.

Refrigerante	Absorbente		Temperatura (°C)	
Absorción Gas – Líquido			Evaporación	Generación
Amoníaco	Agua NaSCN LiNO ₃	NaNO ₃ KBr	< 0	120 – 200
Agua	LiBr _ LiCl		> 0	80 – 200
Monometilamina	Agua		> 0	60 – 150
Absorción Gas – Sólido			Evaporación	Generación
Amoníaco	MnCl ₂ SrBr ₂ CdCl ₂ CaCl ₂ SrCl ₂ ZnCl ₂ CuCl ₂ CnCl ₂	PbCl ₂ LiCl ₂ BaCl ₂ FeCl ₂ CoCl ₂ NiCl ₂ MgCl ₂	< 0	120 – 150
Monometilamina	Lic., CaCl ₂		> 0	60 – 150
Absorción Gas – Sólido			Evaporación	Generación
Amoníaco	Zeolita		< 0	120 – 200
Agua	Zeolita, Alumina, Silica gel.		> 0	70 – 150
Metanol	Zeolita, Carbón activado.		> 0	70 – 150
Hidrogeno	MHHP		> 0	60 – 200

Fuente: (<http://www.mundohvacr.com.mx>, 2020).

2.5.2. Características termodinámicas de los fluidos de trabajo.

El rendimiento de un sistema de refrigeración por absorción está estrechamente relacionado con las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo. Para el caso de los sistemas de absorción líquido-gas, un requerimiento fundamental de la combinación del absorbente-refrigerante es que, en la fase líquida, estos deben poseer un margen de solubilidad en el rango de operación del ciclo. La mezcla debe ser químicamente estable, no tóxica y no explosiva. A continuación, se listan las características adicionales más deseables:

- ✓ La diferencia entre el punto de ebullición del refrigerante puro y el de la mezcla a la misma presión, debe ser lo más grande posible.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- ✓ El refrigerante debe poseer un alto calor de vaporización y alta relación de concentración en el absorbente, con el fin de mantener una baja rata de circulación entre el generador y el absorbedor por unidad de capacidad de enfriamiento.
- ✓ El absorbente debe ser menos volátil que el refrigerante, para facilitar su separación en el generador. Si esto no es posible, se requerirá la integración de un rectificador para llevar a cabo esta separación en forma de vapor.
- ✓ Las propiedades de transporte relacionadas con la transferencia de masa y calor, tales como viscosidad, conductividad térmica y coeficiente de difusión deben ser favorables.
- ✓ Tanto el refrigerante como el absorbente no deben ser corrosivos, ambientalmente amigables y de bajo costo.

Al revisar las características que debe reunir la mezcla ideal, se observa que es difícil encontrar un par que reúna las propiedades deseables, y por ello, resulta práctico optimizar la selección en función de las condiciones de operación (calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, entre otros), (Incopera & Dewitt, 1999).

a) **Fluido de trabajo.**

El fluido de trabajo utilizado en un sistema de refrigeración por absorción es una solución binaria que consiste en un refrigerante y un absorbente. Los dos pares o mezclas más habituales refrigerante-absorbedor es el Amoniaco-Agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) empleado para refrigeración para temperaturas hasta $-60\text{ }^\circ\text{C}$ y el Bromuro de Litio – Agua ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) empleando para aire acondicionado o climatización donde la temperatura es mayor a $0\text{ }^\circ\text{C}$. (Quintanilla P, 2011)

Se consideran que el rendimiento de los sistemas de refrigeración por absorción depende en gran medida de las propiedades químicas y termodinámicas del fluido de trabajo. Sin embargo, un requisito fundamental de la combinación refrigerante-absorbente es que, en fase líquida, deben tener un margen de miscibilidad dentro del intervalo de temperatura de funcionamiento del ciclo. (Srikhirin, Aphornratana, & Chungpaibulpatana, 2000.)

Mezcla Amoniaco – Agua ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$)

Este tipo de mezcla es muy utilizado en el sector industrial, donde la temperatura del evaporador es cero o menor, además tiene excelentes propiedades térmicas que lo convierten en un refrigerante ideal para instalaciones frigoríficas. Está compuesto químicamente de un 18 % de hidrogeno y un 82 % de nitrógeno.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Ventajas:

- ✓ El amoniaco tiene buenas características para la transferencia de calor.
- ✓ Se lo puede aplicar a temperaturas muy bajas de hasta -60 °C.
- ✓ Excelentes propiedades térmicas y de transmisión de calor que posee el amoníaco como refrigerante.
- ✓ No presenta problemas de cristalización.
- ✓ Disponibilidad y bajo costo de la mezcla amoniaco-agua en comparación con otras mezclas.

Desventajas:

- ✓ El amoniaco es tóxico en altas concentraciones.
- ✓ Entre sus principales desventajas; es la necesidad de rectificación debido a que cuando el refrigerante sale del generador este contiene pequeñas cantidades de vapor de agua, además que necesitan tuberías más gruesas debido a la presión que genera el refrigerante. (Catota Ocapana & Tonato, 2015)

Mezcla Bromuro de Litio – Agua (LiBr-H₂O).

Esta mezcla se utiliza mucho en los sistemas de aire acondicionado y por lo tanto su principal uso es en el acondicionamiento calorífico de viviendas y edificios. Las temperaturas que se puede obtener en el evaporador no pueden estar por debajo de los 4°C debido a que en este caso el fluido refrigerante es el agua y el absorbedor el bromuro de litio. El punto de ebullición normal del agua es de 100°C y su calor de vaporización de 972 BTU/Lb. Las temperaturas requeridas en el generador para separar el agua de la solución concentrada son de alrededor de los 100°C, por lo que el uso de colectores planos se da sin ningún problema. (Kalogirou, Florides, & Tassou, 2001)

El Bromuro de Litio es una sal sólida en forma de cristales. En presencia del vapor de agua, el Bromuro de Litio puede absorber el vapor y convertirse en una solución líquida. La temperatura y la concentración de la solución alteran la presión de vapor de agua.

En máquinas de absorción de una etapa y con bromuro de litio, no superan un COP's de 0,70, en máquinas de doble etapas se alcanzan valores que pueden ser hasta 1,5 veces a los esperables en una etapa, es decir de hasta 1,20 esto significa que las máquinas de doble etapa aprovechan mejor la energía que las de etapa simple. Actualmente, las máquinas de absorción comerciales de LiBr-H₂O y de simple efecto tienen un COP en condiciones nominales de 0,65 a 0,75 aproximadamente, (ASHRAE (American Society of Heating, 1997).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.5.3. Los componentes de un sistema de refrigeración por absorción.

El ciclo de refrigeración por absorción es similar al del ciclo de vapor-compresión, donde el compresor mecánico es reemplazado por un compresor térmico formado por dos intercambiadores de calor y masa que son un generador y un absorbedor, un recuperador de calor, una bomba y una válvula de expansión, este ciclo realiza la misma función que el ciclo de compresión de vapor como se muestra en la [Figura 8](#). (Marcos del Cano, 2008)

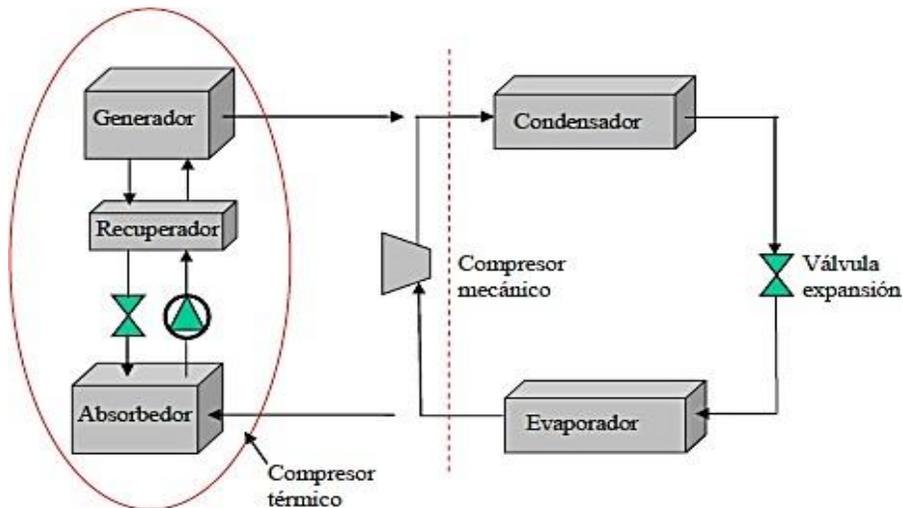


Figura 8: Comparación entre compresor térmico y compresión mecánica.
Fuente: Tesis Doctoral. (Marcos del Cano, 2008)

Un sistema de refrigeración por absorción está estrechamente relacionado con las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo y está compuesto por los siguientes equipos. (Conlisk, 1992)

- ✓ El **Generador** es el encargado de generar calor para separar el refrigerante de la solución proveniente del absorbedor.
- ✓ El **Rectificador** es el equipo de la cantidad de vapor de agua que deje pasar.
- ✓ El **Condensador** uno de los elementos que más influyen en el funcionamiento y el coeficiente de un sistema de refrigeración.
- ✓ Los **dispositivos de expansión** son los que permiten pasar de la zona de alta presión a la de baja, pasando el refrigerante del estado de líquido saturado con alta temperatura (alta presión) a una evaporación parcial con baja temperatura (baja presión).
- ✓ El **Evaporador** es uno de los elementos también importantes de un sistema de refrigeración.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- ✓ El **Absorbedor** este equipo se propicia una reacción exotérmica entre el refrigerante y el transporte, mediante la extracción de calor. El absorbedor es uno de los componentes principales de un refrigerador que trabaje por ciclo de sorción.
- ✓ La **bomba** incluye una técnica de producción de frío mediante el proceso de absorción se utiliza este equipo.
- ✓ EL **Regenerador** realiza la transferencia de calor entre dos corrientes que es transportada por el paso alternado de fluidos calientes y fríos a través de un lecho de sólidos, el cual tiene una apreciable capacidad de almacenamiento de calor.

En la [Figura 9](#), se muestra componentes de un sistema de refrigeración por absorción.

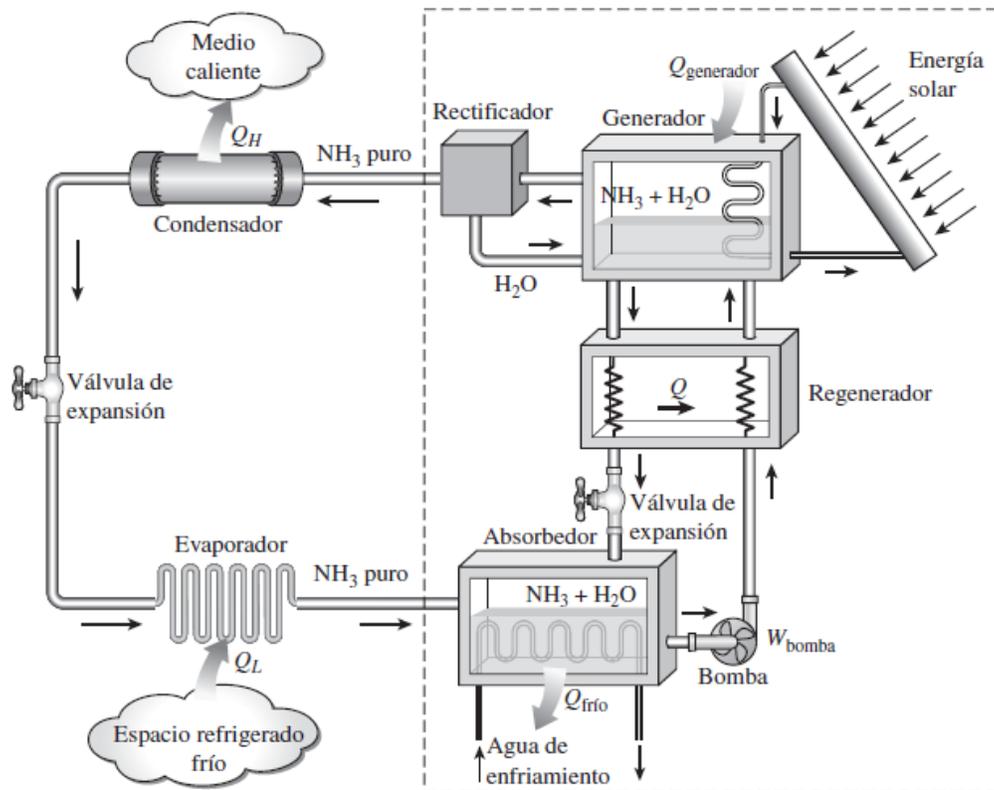


Figura 9: Ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco.

Fuente: Libro de Termodinámica de Çengel y Boles. (Çengel & Boles, 2012)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.5.4. Producción de frío con energía solar.

La energía solar térmica o energía termo solar consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción o para producción de energía mecánica y a partir de ella energía eléctrica.

En la actualidad se han realizado varias investigaciones relacionadas con los diferentes métodos de refrigeración solar y sus diferentes tecnologías de captación solar, que permiten aprovechar la energía térmica que se adquiere para la producción de frío. Por tal motivo estos prototipos de sistemas son una alternativa para reducir el consumo de energía eléctrica.

La refrigeración por termo solar ofrece una infinidad de técnicas de enfriamiento, que son alimentadas por ciclos accionados térmicamente por un colector solar y sistemas de enfriamiento basados en energía fotovoltaica, dependiendo del modo de conversión solar y la naturaleza del proceso de enfriamiento, existen una amplia variedad de sistemas acoplados para la refrigeración. (Sarbu & Sebarchievici, 2013)

Adicionalmente puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío.

Se tienen tres variantes:

- ✓ **Centrales de torre:** Espejos planos concentran la luz solar en un punto de la torre donde calienta un fluido que acciona a la turbina.
- ✓ **Discos parabólicos:** Usados individualmente para accionar un motor térmico, o colectivamente para accionar un motor térmico o turbina central.
- ✓ **Cilindros parabólicos:** Concentran la luz solar sobre un eje por donde circula un fluido que se dirige a la zona de generación, donde calienta agua hasta producir vapor para el accionamiento de una turbina, (<http://recursostic.educacion.es>, 2020).

Las principales aplicaciones de la energía solar térmica son:

- ✓ **Agua caliente sanitaria (ACS) y precalentamiento de agua de proceso:** se emplean instalaciones simples por lo que es muy rentable.
- ✓ **Calefacción:** apoyando a las calderas de los edificios, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles (gasóleo, carbón...).
- ✓ **Refrigeración:** se aprovecha que las épocas de demanda coinciden con las de mayor radiación solar. Para producir frío se emplea las máquinas de absorción cuyo funcionamiento se explica en este documento.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- ✓ **Climatización de piscinas:** el agua es calentada a través de captadores solares simples, baratos ya que la temperatura que tiene que alcanzar el agua se sitúa entre los 30 a 35 °C.

El uso de la energía solar térmica reduce eficazmente las emisiones de CO₂, en función de la extensión de los captadores solares y del combustible a sustituir.

La [Tabla 3](#), se presenta algunos métodos para la generación de frío que utilizan como fuente de energía la proveniente del sol se representaran de una forma esquemática a continuación y a su vez se resumirá las conversiones fotovoltaicas y foto-térmicas de la energía solar.

Tabla 3: Clasificación de tecnologías de producción de frío con energía solar.

R E F R I G E R A C I Ó N S O L A R	Con vers ión Fot otér mic a	Termo mecánicos		Rankine Eyecto – Compresión	Continuos	Líquido – Vapor	Refrigeración	Agua Freones	
		T é r m i c o s	Absorción	Cerrados	Continuos Intermedios	Líquido Vapor	Refrigeración Hielo	Amoníaco – Agua	
						Líquido Vapor	Refrigeración Congelación	Amoníaco – Agua	
							Aire Acondicionado	Amoníaco – Agua Bromuro de Litio – Agua	
				Abiertos	Continuos	Sólido Vapor	Refrigeración Hielo	Cloruro de Calcio – Amoníaco Cloruro de Litio – Amoníaco	
				Abiertos	Continuos	Líquido Vapor	Aire Acondicionado	Bromuro de Litio – Agua Ácido sulfúrico – Agua	
			Absorción difusión	Cerrados	Continuos	Líquido Vapor	Refrigeración Hielo	Amoníaco – Agua Hidrogeno	
			Absorción	Cerrados	Intermitentes	Sólido Vapor	Aire Acondicionado Hielo	Zeolita – Agua Carbón – Agua	
		Abiertos		Intermitentes Continuos	Sólido Vapor	Aire Acondicionado	Silicagel – Agua Carbón – Agua Zeolita – Agua		
		Con vers ión Fot ovol taic a	Termoeléctricos		Refrigeración Aire Acondicionado				
			Electro – Mecánicos		Cerrados	Compresión de Vapor	Refrigeración Aire Acondicionado	Freones	

Fuente: (Pilatosky Figueroa, 2004).

2.6. Disponibilidad del recurso solar en Colombia.

El conocimiento de la distribución espacial y temporal del potencial energético solar es necesario porque facilita la identificación de regiones estratégicas en donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas.

En parte del territorio colombiano la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4,0 y 5,0 kWh/m² por día, especialmente sobre gran parte de la Amazonía y la región Andina, así como en sectores de la región Pacífica y la Orinoquía, Colombia debido a su posición geográfica es favorecida con una gran disponibilidad del recurso solar, (IDEAM, 2020).

En la [Figura 10](#), se muestra el territorio colombiano con la incidencia de radiación solar global por la posición geográfica.

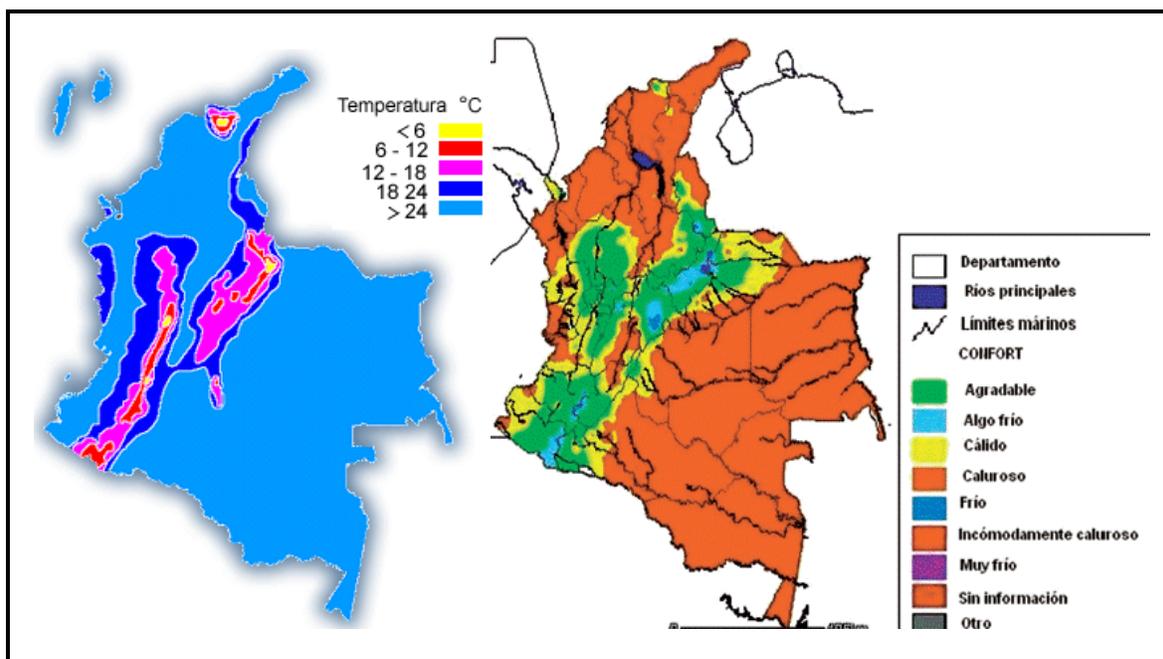


Figura 10: Territorio Colombiano la incidencia de la radiación solar.

Fuente: (IDEAM, 2020).

La recolección de la información meteorológica (radiación solar, brillo solar, temperatura, humedad relativa) medida por el IDEAM como institución encargada de la medición de estas variables y de la vigilancia del medio ambiente en el orden nacional. Igualmente, el IDEAM recopiló información proveniente de instituciones de carácter privado como CENICAFÉ y CENICAÑA, que disponen de redes meteorológicas propias para sus investigaciones en café y caña de azúcar, respectivamente. En el caso del ozono, la información base se obtiene directa mente de la base de datos publicada por la Agencia Norteamericana para la Aeronáutica y el Espacio, NASA, de su misión de vigilancia del ozono TOMS II. La

información de radiación ultravioleta es tomada de la red latitudinal de estaciones UV del país.

Por la posición geográfica la región caribe de Colombia cuenta con un punto estratégico para la explotación de este recurso renovable y 100% amigable con el medio ambiente. Se tiene una radiación solar entre los 5.0 y 6.0 kWh/m² en un promedio de 7 a 8 horas diarias. Lo que nos brinda una excelente fuente de explotación energética mediante celdas fotovoltaicas.

Cuando la radiación solar está por debajo de los 4.5 kWh/m² la eficiencia del sistema se ve afectado en más de un 50%, por lo que requeriríamos de mayor cantidad de celdas para recolectar energía solar. Y si pasa de 6.5 kWh/m² el rendimiento de las placas fotovoltaicas se verían comprometidas por sobrecalentamiento.

2.7. Ciclo invertido de Carnot.

El ciclo invertido de Carnot es un ciclo reversible de refrigeración, que, aunque es ideal el concepto termodinámico es muy útil por lo que tiene dos características muy importantes, (Çengel & Boles, 2012)

- ✓ Ningún ciclo de refrigeración tiene más alto coeficiente de funcionamiento (COP) que el de Carnot, operando entre las mismas temperaturas de fuente y sumidero.
- ✓ Todos los ciclos de refrigeración reversibles que operan entre las mismas temperaturas de fuente y sumidero tienen los mismos COP.

El coeficiente de funcionamiento (*Coefficient Of Performance, COP*) es, (ASHRAE (American Society of Heating, 1997)):

$$COP = \frac{\text{Refrigeración}}{\text{Trabajorealizado}} = \frac{Q_A}{W} \quad (01)$$

En la [Figura 11](#), muestra el ciclo invertido de Carnot que consiste en dos procesos isotérmicos y dos isentrópicos.

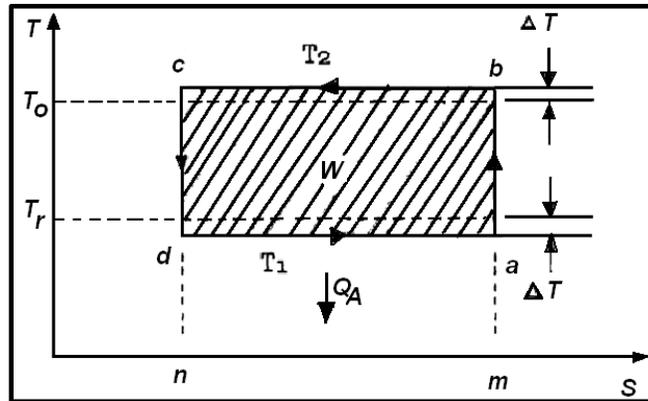


Figura 11: Ciclo invertido de Carnot.
Fuente: (Murcia, 1993)

En un ciclo utilizado para refrigeración, el refrigerante es comprimido isentrópicamente desde **ab** y desde una temperatura de enfriamiento T_1 a una temperatura T_2 en un poco menor que la temperatura de un sumidero natural T_0 . El refrigerante luego descarga calor a la temperatura constante T_2 a lo largo de **bc**. En el estado **c** existe una expansión isentrópica desde **cd** bajando la temperatura a T_1 que es menor que la temperatura de la habitación refrigerada T_r , el refrigerante recibe el calor a lo largo de la ruta **da** desde donde se repite el ciclo, (Murcia, 1993).

El trabajo realizado en el ciclo es:

$$W = (T_2 - T_1)(\Delta S) \quad (02)$$

Dónde:

$$\Delta S = S_a - S_d = S_b - S_c \quad (03)$$

Debido a que lo que se espera del ciclo de la refrigeración es el efecto refrigerante, el calor añadido al sistema desde el cuarto frío que es el área dentro del perímetro **ndam**.

El calor añadido al sistema es:

$$Q_A = T_1 * \Delta S = T_1(S_a - S_d) \quad (04)$$

El coeficiente de funcionamiento es:

$$COP = \frac{\text{Refrigeración}}{\text{Trabajorealizado}} = \frac{Q_A}{W} \quad (05)$$

En forma general, para un ciclo de Carnot es:

$$COP = \frac{Q_A}{W} = \frac{T_1(S_a - S_d)}{(T_2 - T_1)(S_a - S_d)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (06)$$

Este valor de COP es el valor más alto posible para todos los ciclos que operan entre las temperaturas T_1 y T_2 . Ciclos irreversibles ideales tendrán menor valor de COP.

2.8. Coeficiente de Funcionamiento (COP).

El concepto de COP (*Coefficient Of Performance*) en refrigeración, es sinónimo de Eficiencia Energética en el evaporador. El COP se define “oficialmente” como: “*La cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración (ASHRAE: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers)*”. En este cómputo no se incluyen los consumos auxiliares de energía eléctrica necesarios para el funcionamiento de bombas y ventiladores, (ASHRAE (American Society of Heating, 1997)

En el **COP o el rendimiento del ciclo** hay que considerar el aporte de calor en el generador, se desprecia la energía mecánica (bombas y ventiladores).

$$COP = \left| \frac{\text{Efecto del refrigerante}}{\text{Entrada de calor}} \right| = \frac{T_{Evap}}{T_{Cond} - T_{Evap}} = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{\dot{Q}_{Gen}} \quad (07)$$

El **rendimiento total** es el de la producción del frío por el de la de calor.

$$\eta_{Frio} = \eta_{Carnot} = \left(\frac{T_{Evap}}{T_{Cond} - T_{Evap}} \right) \left(\frac{T_{Gen} - T_{Cond}}{T_{Gen}} \right) \text{ con } [T \equiv K] \quad (08)$$

- Si la temperatura aumenta en el generador aumenta la eficiencia.
- Si la temperatura aumenta en el condensador y absorbedor disminuye la eficiencia.

Los COP's esperables en los ciclos de absorción son también muy bajos comparados con los de los ciclos de compresión mecánica. Actualmente, las máquinas de absorción comerciales de LiBr-H₂O y de simple efecto tienen un COP en condiciones nominales de 0,65 a 0,75 aproximadamente, (Lee, Digulio, & Jeter, 1990)

Por el contrario, en los equipos de compresión mecánica de gran cantidad de volumen como los compresores centrífugos y de tornillo que se consiguen en la actualidad con un rendimiento frigorífico entre 4,5 a 5,5 kW/kW (COP's en el evaporador de 4,5 a 5,5). A igualdad de costo de las energías consumibles, estas diferencias tan espectaculares habrían convertido a las máquinas de absorción, hace mucho tiempo, en piezas de museo o “curiosidades tecnológicas”, (<http://www.mundohvacr.com.mx>, 2020)

2.9. Procesos y operación de equipos de un sistema de refrigeración por absorción.

2.9.1. Ciclo de absorción sin intercambiador de calor.

La [Figura 12](#), muestra un esquema de un ciclo teórico de absorción con una solución LiBr-H₂O. El absorbente no se vaporiza en el generador y solamente el refrigerante fluye a través del condensador y el evaporador. El vapor que abandona el evaporador es absorbido por la solución débil en el absorbedor, donde la mezcla rechaza calor. La solución enriquecida con el refrigerante es bombeada a alta presión al generador, aquí el vapor refrigerante abandona la solución por el calor ganando mientras la solución débil retorna al absorbedor haciendo pasar por un intercambiador de calor, (Catota Ocapana & Tonato, 2015)

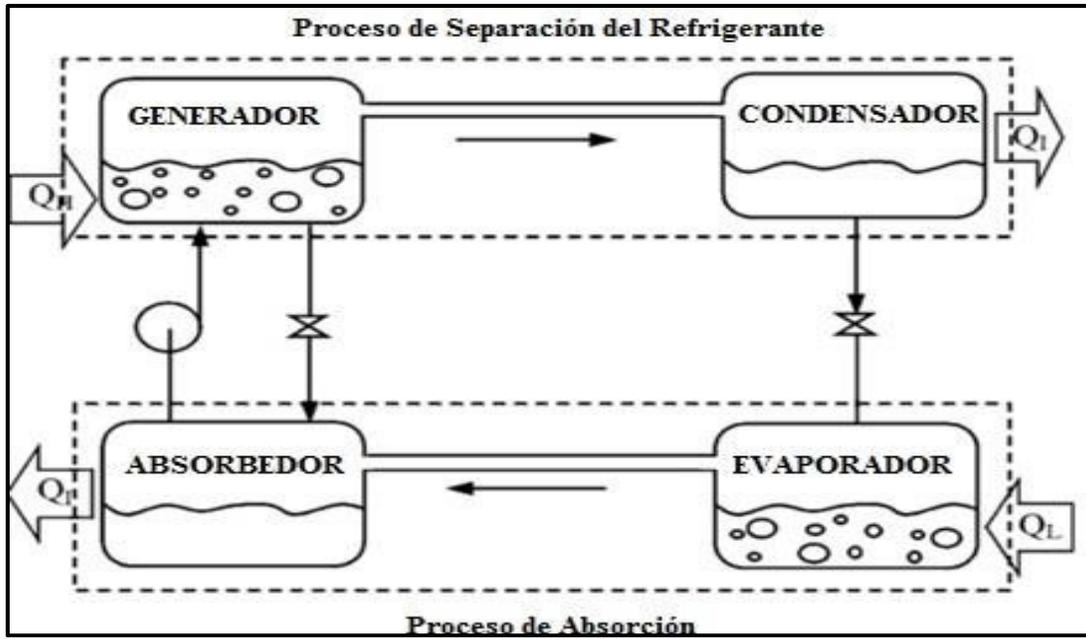


Figura 12: Esquema del ciclo teórico de absorción con una solución LiBr-H₂O.
Fuente: (Marcos del Cano, 2008)

Las [Figura 13](#) y [Figura 14](#), se representan unos esquemas más ilustrativos real, donde se muestran las relaciones entre los principales componentes del ciclo de absorción.

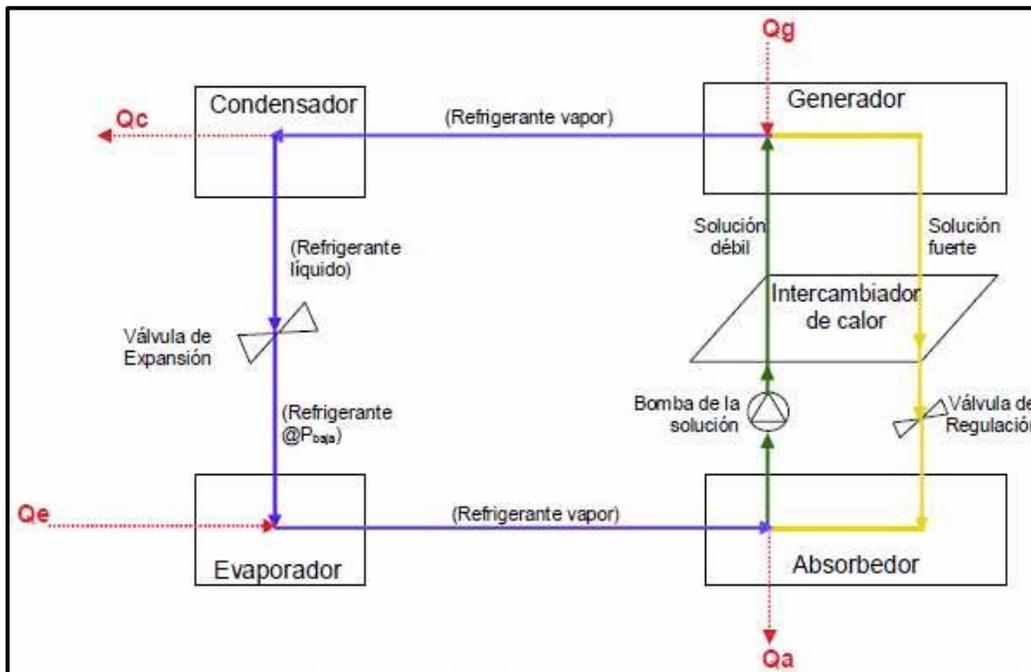


Figura 13: Esquema general de los componentes del ciclo de absorción.
Fuente: (Plantas de refrigeración solar, 2021)

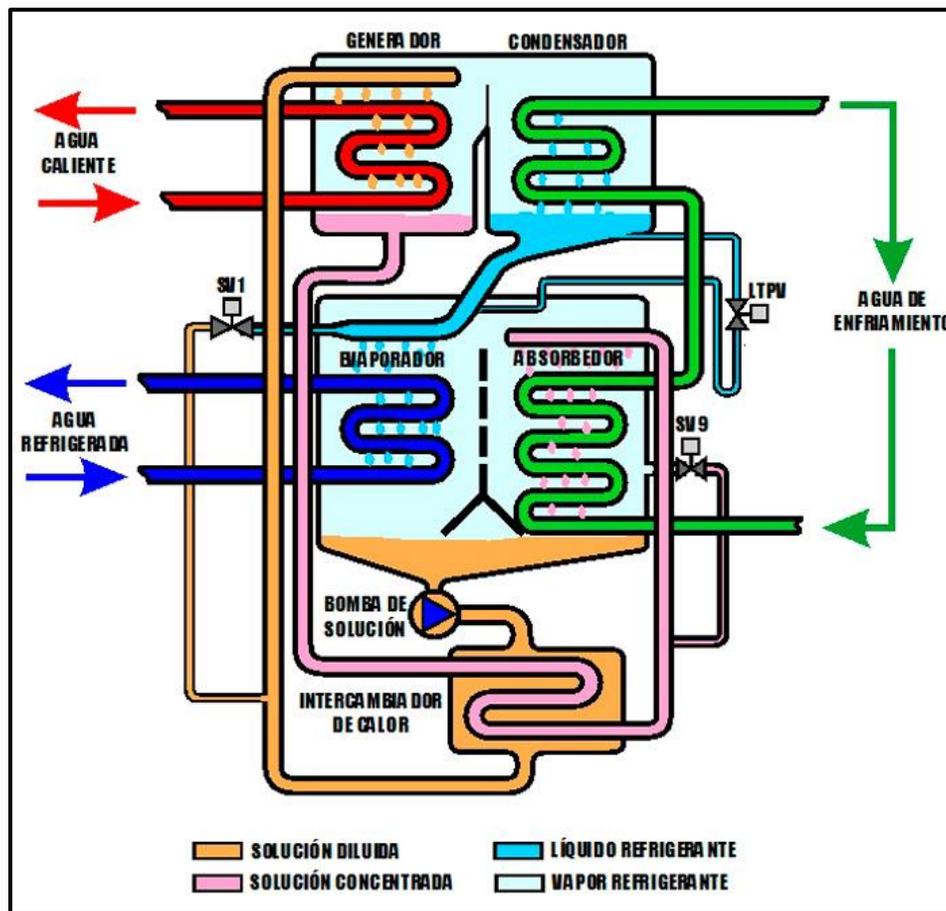


Figura 14: Esquema de flujo en una unidad de absorción de un solo paquete.
Fuente: (Catota Ocapana & Tonato, 2015)

2.9.2. Ciclo de absorción con intercambiador de calor.

El intercambiador de calor recuperativo no es más que un Inter enfriador que trasfiere calor entre la solución caliente que abandona el generador y la solución de menor temperatura que sale del absorbedor, disminuyendo así los requerimientos de energía de todo el ciclo, y aumentando su eficiencia, también disminuye el calor que tiene que ser removido por el agua en enfriamiento en el absorbedor.

En la **Figura 15**, se incluye un intercambiador de calor al ciclo antes explicado.

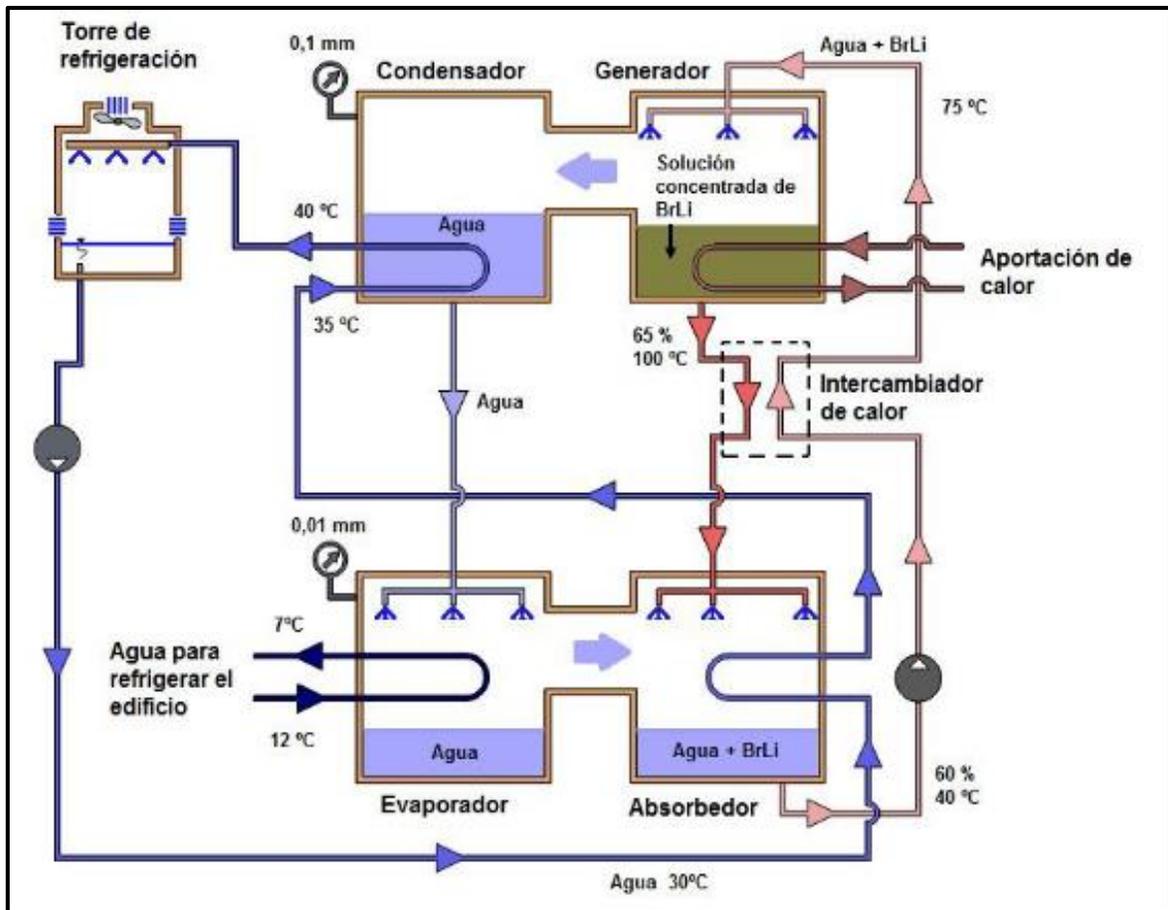


Figura 15: Esquema de un ciclo teórico de absorción con intercambiador de calor recuperativo para una solución de LiBr-H₂O.

Fuente: (Marcos del Cano, 2008)

En el **COP** o el **rendimiento del ciclo** hay que considerar el aporte de calor en el generador, se desprecia la energía mecánica (bombas y ventiladores), (ASHRAE (American Society of Heating, 1997)).

$$(COP)_{ciclo} = \frac{Q'_E}{Q'_G + W'_P} \approx \frac{Q'_{Evap}}{Q'_{Gen}} \quad (09)$$

Para este caso el diseño se escogerá un ciclo o sistema con intercambiador de calor recuperativo para disminuir así los requerimientos de energía de todo el sistema, y aumentar la eficiencia del equipo.

3. METODOLOGÍA

Establecer condiciones de incidencia de la radiación solar para la zona hotelera de Coveñas, datos para la generación de energía térmica.

Inicialmente se realizó una búsqueda en las bases de datos del IDEAM y de la UPME, se centró en la búsqueda del mapa de radiación solar de los últimos 5 años, donde se determinó el potencial en la zona hotelera de Coveñas, con estos datos se documentó la demanda promedio de la radiación obtenida en la investigación y evaluación de los equipos solares por medio de absorción con las condiciones establecidas, para realizar los balances de masa y de energía en cada uno de los componentes, donde se procederá a realizar un diseño detallado de cada uno de los componentes, teniendo en cuenta la flexibilidad del funcionamiento de cada equipo y la facilidad en su construcción.

Esto se da mediante un proceso de investigación, análisis, intervención y adecuación de condiciones que permitan la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población. Mediante un proceso articulado, interdisciplinar y práctico que permita facilitar el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil.

Para lograr el desarrollo del presente proyecto, se tuvo diferentes etapas:

- Primero, momento de la planeación y planificación de la propuesta a través de palpar la necesidad de obtener energía de maneras más amigables con el medio ambiente, que sirviera para la economía de la región y que utilizara como fuente primaria la energía térmica, de esta manera se busca dinamizar la economía de la zona hotelera, así como el impacto en la economía y cuidado del medio ambiente.
- Segundo se dispuso de apertura de los conocimientos técnicos al respecto con el objeto de elaborar un procedimiento que permita elaborar un diseño de un equipo que responda a estas necesidades.

Para cumplir los objetivos se pretende lo siguiente:

Mitigar el impacto ambiental, buscando que la generación de energía convencional en la región sea remplazada por la absorción de energía solar para la consolidación de hoteles que tengan equipos que permitan dicho aprovechamiento.

Mejorar las economías de la región hotelera y que esta, a la postre, beneficien a la comunidad en general adoptando medidas que permitan el uso de energías aprovechables y que inciden en los costos del hogar o comercio respectivo.

Integrar el conocimiento de personas interesadas en mejorar las condiciones de aprovechamiento de energía solar como una forma de emprendimiento local.

En ese sentido, se optó por clasificar de la siguiente manera la trazabilidad seguida para el desarrollo del proyecto.

Identificar características de los equipos de absorción con potencial para su implementación y su relación con las condiciones estudiadas.

La elaboración del presente trabajo se comprenderá de las variables termofísicas indispensables para seleccionar la información pertinente y necesaria para realizar el estudio que se muestra en este proyecto, que tiene por objeto un sistema de refrigeración por absorción con energía termo solar.

En el estudio de la refrigeración existen categorías generales de aplicación tales como:

Comercial, se refiere a las unidades de refrigeración tales como refrigeradores de supermercados, restaurantes, hoteles, morgues, hospitales, florerías y otros.

Acondicionamiento de aire, involucra el control de la temperatura, humedad, movimiento de aire, filtrado y limpieza que es de acuerdo al confort o en ocasiones para uso industrial.

Seleccionar el equipo para la implementación según la capacidad determinada por los requerimientos específicos de la zona hotelera de Coveñas y el potencial energética de su ubicación geográfica.

El diseño se tendrá en cuenta las condiciones de trabajo más extremas a las que podrá estar expuesto el equipo y además con los adecuados balances tanto de masa como energía se dimensionará cada uno de sus componentes.

El equipo se dimensionará para trabajar con Bromuro de litio-agua como un par refrigerante primario, debido a sus propiedades particulares y a las condiciones de presión y temperatura de trabajo requeridas.

El modelo matemático a utilizar para el diseño del sistema de refrigeración con LiBr-H₂O con energía solar en edificaciones colombianas, para esto se requiere de los conocimientos de diversas áreas como son la termodinámica, transferencia de calor, transferencia de masa, mecánica de fluidos, materiales de ingeniería y conocimientos de ingeniería en general para el cálculo, para el dimensionamiento y diseño de los diversos componentes. Y finalmente se proyectará la inversión de los equipos en el diseño establecido en la zona hotelera de Coveñas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al consultar el mapa de radiación se pudo obtener los indicadores para los últimos cinco años y representado en la *figura 10* donde se evalúa la radiación, obteniendo los siguientes datos:

- El consumo de energía en los hoteles en la región de Coveñas.
- Los nuevos índices de consumo energético para los hoteles de la región.

Para este proceso de cálculo se aplica para cada uno de los componentes principales del sistema de refrigeración con LiBr-H₂O a partir de una fuente de **energía solar** (evaporador, condensador, absorbedor, generador y la unidad hotelera), dando dimensiones generales y parámetros de funcionamiento, tales como presión, temperatura, concentración, flujos, entalpías, longitud, diámetros, etc.

Al realizar las estimaciones de un equipo que se clasifica según el tamaño y la evaluación del simple efecto de funcionamiento en un ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción, se deben tener unas consideraciones y suposiciones básicas para unos valores de entrada a partir de la *Figura 16*.

Con la referencia a las figuras anteriores, las suposiciones básicas son:

- ✓ El refrigerante primario en estado estable es el agua pura.
- ✓ No hay presión que cambia o no son tan significativo, excepto a través de los restrictores de flujo y las bombas.
- ✓ Los puntos 01, 04, 09 y 12, hay sólo líquido saturado, para el punto 10 se concentra un 3% del vapor saturado, esta fracción es debido por el cambio de temperatura que hay en el líquido saturado primario.
- ✓ El punto 08, hay sólo vapor saturado de agua a baja presión.
- ✓ Los restrictores de flujo son adiabáticos (válvulas de expansión).
- ✓ “Las bombas tienen funcionamientos isentrópicos.”
- ✓ No hay ninguna pérdida de calor por la coraza por ser herméticamente.

ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN PARA ESTE INFORME FINAL.

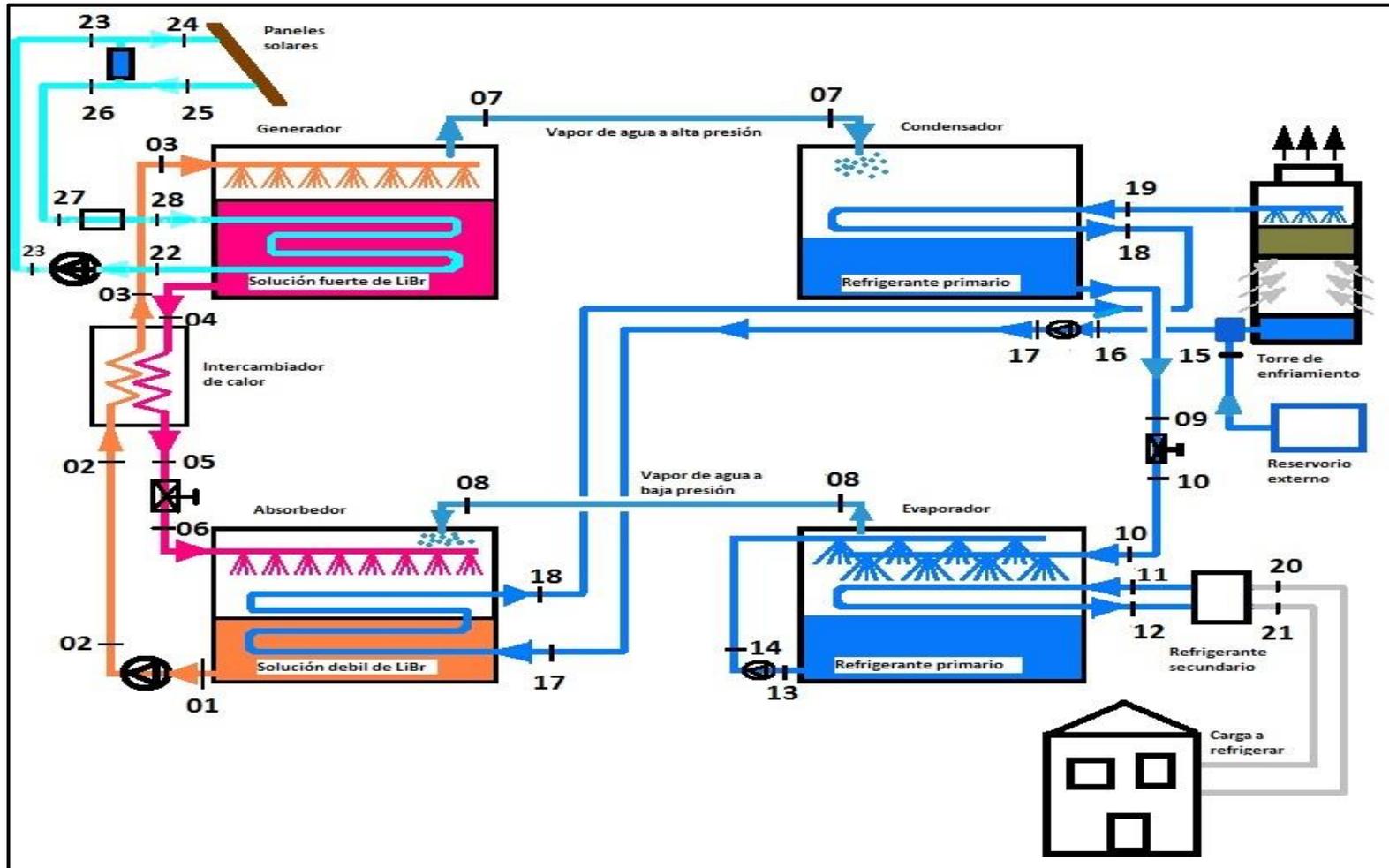


Figura 16: Esquema general del sistema de refrigeración por absorción.

Fuente: Propia de los autores.

4.1. Proceso de cálculos para el sistema.

Los parámetros para el diseño considerados se listan en la siguiente tabla, estos parámetros de diseño son para un simple efecto del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

Tabla 4: Parámetros para el diseño.

Parámetros	Símbolo	Valor
La capacidad o la carga del aire acondicionado.	\dot{Q}_E	3 TR
Temperatura de salida del vapor en el evaporador.	T ₀₈	4°C
Temperatura de salida de la solución en el generador.	T ₀₄	94°C
Fracción de masa de la solución débil.	X ₀₁	55%LiBr
Fracción de masa de la solución fuerte.	X ₀₄	60%LiBr
Temperatura de salida en el intercambiador de calor.	T ₀₃	65°C
Temperatura de salida del vapor de agua del generador	T ₀₇	90°C
Porcentaje de vapor concentrado en el evaporador	\dot{m}_{10}	3% \dot{m}_{08}

Fuente: Propia de los autores.

Nota: Los subíndices son tomados del esquema general (*Figura 16*) y algunos datos se definen a medidas del desarrollo de los cálculos.

4.2. Descripción y cálculos de variables en cada proceso de refrigeración.

4.2.1. Proceso de evaporación.

Este equipo es un intercambiador de calor en el cual el refrigerante cambia de fase y enfría el espacio a refrigerar. La salida del evaporador es un vapor ligeramente sobrecalentado que se alimenta en cantidades pequeñas para asegurar la vaporización completa al final del equipo.

El líquido refrigerante secundario desde la unidad del aire acondicionado regresa a 13°C (55°F) y es enfriado a 4°C (40°F) en el evaporador principal, luego es bombeado a su origen donde vuelve a ganar calor en el espacio a enfriar. La bomba para bombear el agua de enfriamiento es externa a la máquina refrigerante.

El H₂O es el refrigerante primario, el R-134a es el refrigerante secundario y el LiBr es el absorbente (T_{Evap} > 0°C, entre 4 y 10°C).

El análisis de los cálculos se realiza a partir del evaporador, ya que se tiene los datos de este equipo como son la potencia o la carga del aire acondicionado (lugar a refrigerar) y la temperatura en este equipo.

4.2.1.1 Análisis del balance de masa y de energía en la evaporación.

En la [Figura 17](#), se representa esquemáticamente el evaporador del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

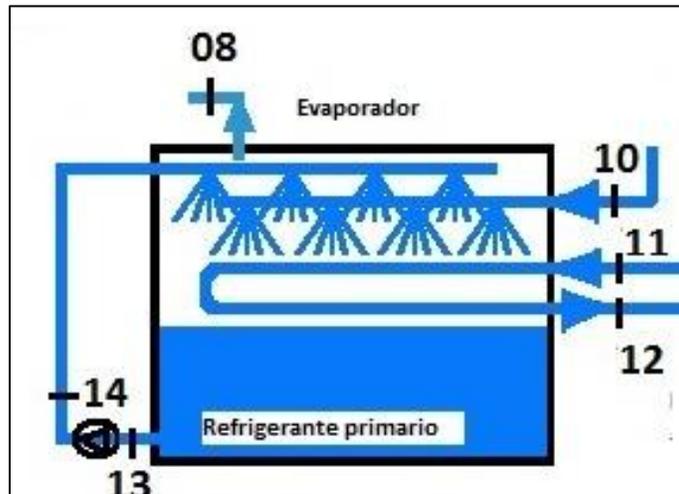


Figura 17: Diagrama de flujos en el evaporador.
Fuente: Propia de los autores.

Por definición del proyecto, el evaporador tiene una capacidad de tres toneladas de refrigeración (3 TR), el refrigerante secundario que es propilenglicol (C₃H₈O₂) (técnicamente glicol) tiene una temperatura de salida (T₁₂) de 4°C y una temperatura de entrada al evaporador (T₁₁) de 13°C.

4.2.2. Proceso de absorción.

El refrigerante se dirige hacia el absorbedor para cerrar la línea de baja presión. Para ello se ponen en contacto el refrigerante (vapor de agua) y la solución concentrada que proviene del generador. La solución concentrada absorbe el vapor de agua diluyéndose la solución, volviendo a las condiciones de partida. Dicho proceso de mezcla es exotérmico, por lo que es necesario evacuar el calor generado para que dicho calor no eleve la temperatura del absorbedor y se ralentice el proceso de mezcla. Para ello se emplea una corriente auxiliar de agua que evacua dicha energía y posteriormente la disipa en la torre de refrigeración, (ASHRAE. American Society of Heating, 1997).

4.2.2.1 Análisis del balance de masa y de energía en la absorción.

En la *Figura 18* se representa esquemáticamente el absorbedor del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

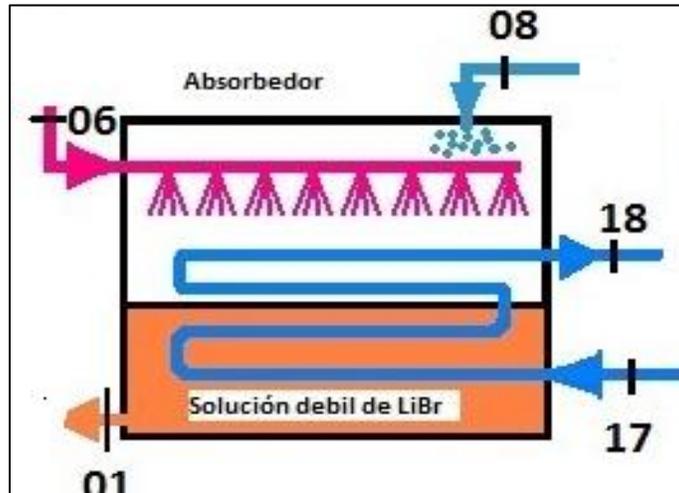


Figura 18: Diagrama de flujos en el absorbedor.

Fuente: Propia de los autores.

En el absorbedor hay tres cantidades de calor que son rechazadas:

- ✓ El calor de condensación del vapor hacia la solución con el absorbente.
- ✓ El calor de dilución, ya que el vapor se diluye dentro del absorbente.
- ✓ El calor sensible.

Para remover este calor total y mantener constante la temperatura del absorbedor, la solución fuerte absorbente cae sobre un serpentín de enfriamiento en forma de *spray* en el interior del absorbedor. Si estas tres cantidades de calor no son removidas, la temperatura y la presión del absorbedor se elevarían lo cual el flujo del evaporador se detendría. Después de todo esto la solución del refrigerante y el absorbente caen hasta el fondo de la coraza del absorbedor, (ASHRAE. American Society of Heating, 1997).

4.2.3. Proceso de estrangulamiento.

Ocurre en el orificio regulable que se conoce también como válvula de estrangulamiento, produciéndose una expansión a entalpia constante, bajando la temperatura del refrigerante. Aquí ocurre un “enfriamiento”.

4.2.3.1 Análisis del balance de masa y de energía en la válvula de estrangulamiento.

En las Figuras 19 y 20 representan esquemáticamente las válvulas de estrangulamiento del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

Diagrama de flujos en las valvulas de estrangulamiento:

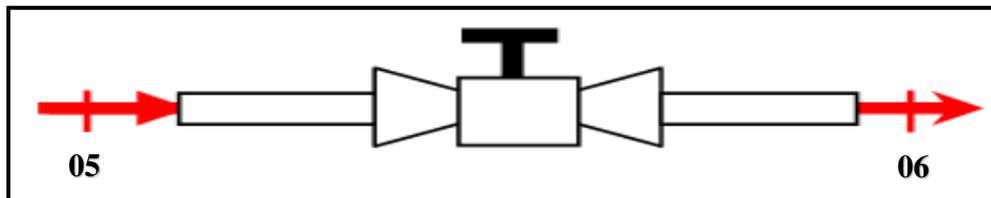


Figura 19: Esquema de la válvula de estrangulamiento en la solución de LiBr.
Fuente: Propia de los autores.

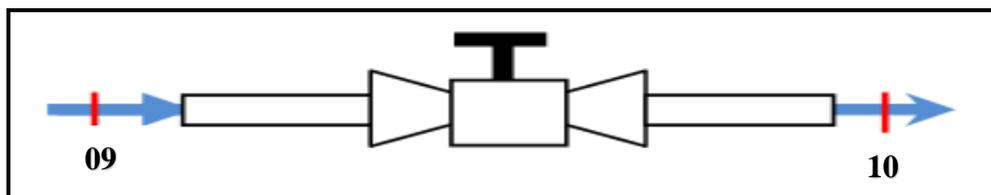


Figura 20: Esquema de la válvula de estrangulamiento en el refrigerante.
Fuente: Propia de los autores.

4.2.4. Proceso del intercambiador de calor.

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto. Son parte esencial de los dispositivos de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

El funcionamiento de los intercambiadores de calor se basa en la transferencia de energía en forma de calor de un medio (aire, gas o líquido) a otro medio.

4.2.4.1 Análisis del balance de masa y de energía en el intercambiador de calor.

Antes de llegar al generador, la solución pasa por un intercambiador de calor donde entra en contacto (indirecto) con la solución concentrada que proviene del generador y se dirige al absorbedor, disminuyendo la temperatura de ésta, y aumentando la suya. Con esto se consigue

disminuir las necesidades de refrigeración del absorbedor (ya que al ingresar en él la corriente de solución concentrada a menor temperatura hay que evacuar menos energía) y también disminuye el aporte energético necesario a realizar en el generador (ya que la solución de partida ingresa en el generador a mayor temperatura).

En la *Figura 21* se representa esquemáticamente el intercambiador de calor del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

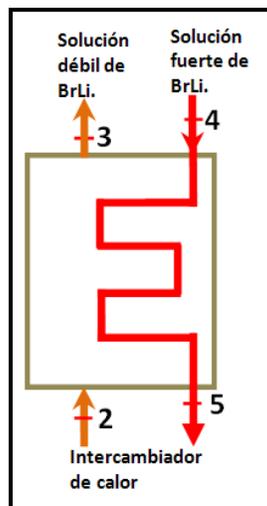


Figura 21: Diagrama de flujos en el intercambiador de calor.

Fuente: Propia de los autores.

4.2.5. Proceso de generación.

Llamado también de concentración, funciona cuando la bomba del concentrador toma la solución fuerte del absorbedor y la envía a través de un intercambiador de calor y una cámara para reservorio instantáneo (“*flash chamber*”) hacia el generador. Aquí el serpentín de vapor o agua caliente suministra el calor necesario para evaporar el refrigerante de la solución, dejando el absorbente concentrado en el fondo del concentrador. La solución es llamada “concentrada” de ahí el nombre de concentrador, llamado también generador porque “genera” vapor refrigerante para el ciclo de refrigeración, (ASHRAE. American Society of Heating, 1997).

El generador nunca llega a una temperatura suficientemente alta como para evaporar el absorbente. En el sistema de bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), en el generador se tendrá una temperatura de 100 °C como máxima.

4.2.5.1. Análisis del balance de masa y de energía de generación.

En la *Figura 22* se representa esquemáticamente el generador del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

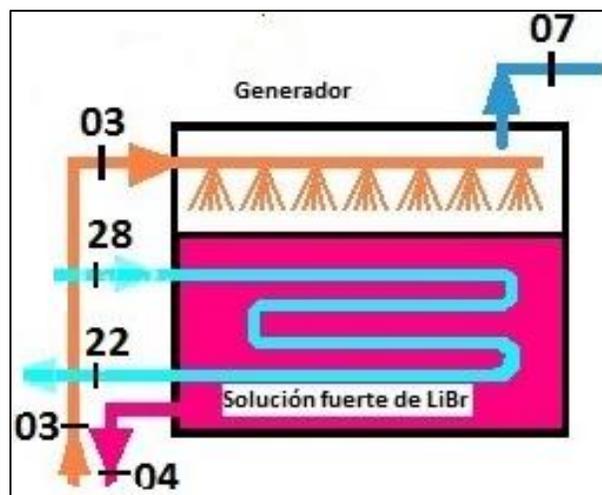


Figura 22: Diagrama de flujos en el generador.
Fuente: Propia de los autores.

4.2.6. Proceso de condensación.

En el condensador el vapor refrigerante procedente del generador se condensa en un intercambiador de calor, y es recogido por la parte inferior donde con una válvula de se descarga en el evaporador. Normalmente el sistema de enfriamiento de agua está conectado a una torre de refrigeración.

El vapor de agua cede su calor latente y se condensa. Normalmente la condensación del vapor de agua se realiza mediante otra corriente de agua, que circula por el lado de los tubos, por lo que es necesario enviar esta corriente de agua a una torre de refrigeración para evacuar dicha energía, si bien hay algunos equipos (pero pocos) que condensan con aire. La presión de trabajo del condensador varía mucho en función del refrigerante que se esté empleando, (ASHRAE. American Society of Heating, 1997).

El vapor refrigerante de la solución en el concentrador fluye hacia el condensador. Aquí entra en contacto con un serpentín de agua de enfriamiento. La tubería del serpentín debe contener un *by-pass* para propósitos de control. Esto permitirá ajustar el flujo de agua a través del condensador para obtener la temperatura óptima del condensador y lograr la más alta eficiencia de operación. El vapor refrigerante se condensa y gotea al fondo del condensador de donde fluirá al evaporador a través de un orificio.

4.2.6.1. Análisis del balance de masa y de energía de condensación.

En la *Figura 23* se representa esquemáticamente el condensador del ciclo de LiBr-H₂O para la refrigeración por absorción.

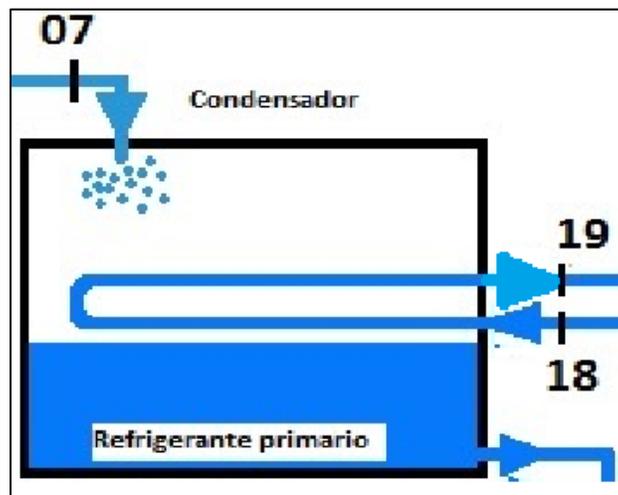


Figura 23: Diagrama de flujos en el condensador.
Fuente: Propia de los autores.

4.2.7. Coeficiente de rendimiento.

El COP como: “*La cantidad de refrigeración obtenida de una máquina dividida entre la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración*”. En este cómputo no se incluyen los consumos auxiliares de energía eléctrica necesarios para el funcionamiento de bombas y ventiladores, (ASHRAE. American Society of Heating, 1997).

Un resumen de las entalpías, flujos máscicos, presiones, temperaturas, fracciones de la solución de LiBr y los flujos de energías, en los diferentes componentes del sistema, se muestran en las siguientes *tablas 5 y 6*.

Tabla 5: Resumen de datos para el sistema de refrigeración de simple efecto con LiBr-H₂O.

Punto	h (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	X (%BrLi)	Comentarios
1	77,12	0,050652	0,82	32	55	Solución débil BrLi
2	77,12	0,050652	12,30	32	55	Solución débil BrLi
3	145,38	0,050652	12,30	65	55	Solución débil BrLi
4	220,28	0,046431	12,30	94	60	Solución fuerte BrLi
5	145,81	0,046431	12,30	65	60	Solución fuerte BrLi
6	145,81	0,046431	0,82	39,5	60	Solución fuerte BrLi
7	2676,11	0,004221	12,30	90		Vapor sobrecalentado
8	2508,76	0,004221	0,82	4		Vapor saturado
9	207,51	0,000127	12,30	49,6		Agua líquida saturada
10	207,51	0,000127	0,82	25		Agua líquida saturada
11	2524,80	0,000797	1,49	13		Aire acondicionado
12	2508,06	0,000797	0,81	4		Aire acondicionado

Fuente: Propia de los autores.

Tabla 6: Flujos de energía en los diferentes componentes del sistema.

Descripción	Símbolo	kW
Capacidad del evaporador.	\dot{Q}_E	10,55
Trabajo mínimo de entrada en la bomba.	W_P	0,00036
Calor del absorbedor, rechazado al ambiente.	\dot{Q}_A	13,45
Calor que entra al generador.	\dot{Q}_G	14,16
Calor del condensador, rechazado al ambiente.	\dot{Q}_C	11,27
Coefficiente de rendimiento.	COP	0,745

Fuente: Propia de los autores.

4.2.8. Fuente de energía.

La fuente de calor que alimenta la máquina de absorción puede tener diferente origen y distintos niveles de temperatura. Puede ser agua caliente procedente de captadores o paneles solares, o procesos industriales con excedentes de agua caliente. También se puede obtener de gas natural, o de gases licuados del petróleo contenidos en depósitos. De procesos industriales con excedentes de vapor de agua o agua sobrecalentada, y también de gases de escape procedentes de motores, o procesos industriales. Dependiendo de si existe o no un intercambiador de calor entre la fuente y el generador, el modo de alimentación se dice que es indirecto y directo respectivamente, (Central solar de torre central, 2022).

La mayor cantidad de paneles solares utilizan la tecnología colectores de tubos evacuados con el 71,6% de la capacidad instalada, seguido de la tecnología de colectores planos que ocupa la segunda posición con el 21,9% y, por último, entre las tecnologías de calentamiento

de agua, se encuentran los colectores sin cubierta con el 6,2% de la capacidad instalada. Por su parte, los paneles solares de aire utilizados para calentamiento de espacios y procesos de secado en la industria apenas representan el 0,3% de la capacidad térmica solar.

Para este proyecto se tiene en las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos, *Figura 2*. (Plantas de refrigeración solar, 2021)

4.2.9. Diseño de intercambiador de calor para el absorbedor.

4.2.9.1. Definición del tubo para el absorbedor.

Para este diseño, la película de solución puede circular hacia abajo sobre la línea horizontal o sobre los tubos verticales.

La construcción del absorbente de tubo horizontal podría ser más costosa debido a la longitud grande de soldaduras, que puede presentar problemas con mantener un vacío. Para esta razón, un diseño alternativo con tubos verticales, alojado en una carcasa cilíndrica, se podría estar empleado.

4.2.9.2. El análisis teórico del absorbente de tubo vertical es el siguiente.

En el caso de este diseño, el vapor de agua producido en el evaporador es el flujo de absorbente de la solución de LiBr-H₂O y no es directamente condensado en los tubos del intercambiador de calor. Por consiguiente, el diseño del intercambiador de calor se usa de material de acero puro y requiere los valores para el calor y los coeficientes de transferencia de masa.

Varios investigadores han estudiado la absorción de vapor de agua en películas cayendo de las soluciones de LiBr-H₂O. Morioka, (MORIOKA , KIYOTA, & NAKAO, 1993.) dirigió los experimentos sobre la absorción de vapor por películas que fluyen hacia abajo en tubo vertical. La media absorción de flujo de masa (kg/m²s) es comparada con los resultados numéricos derivados de un flujo laminar del modelo teórico.

Grossman, (GROSSMAN, 1983) describió un análisis teórico para el calor combinado y el proceso de transferencia de masa en la absorción de gas o vapor en una película líquida

laminar. Se describen las ecuaciones simultáneas que dan la temperatura y variaciones de la concentración a la interfaz de líquido-gas y a la pared. Se considerará una temperatura constante y un caso de la pared adiabático.

Se encontraron los números de Nusselt y Sherwood para depender de los números de Peclet y Lewis, así como en las características de equilibrio de los fluidos activos.

4.2.10. Diseño del intercambiador de calor del evaporador.

Para facilitar la construcción, del intercambiador de calor del evaporador puede construirse de una manera similar al intercambiador de calor del absorbedor. El líquido que pasa los tubos del evaporador proporciona el calor requerido para evaporar la película cayendo del agua alrededor de cada tubo.

Una búsqueda de la literatura ha mostrado que el método de la construcción preferido es permitir que el líquido entrar dentro de un tubo. El fluido interior del tubo es calentado por la velocidad de fluido en la superficie exterior del tubo, para que ocurra la vaporización progresiva. El coeficiente de transferencia de calor de entrada aumenta con la distancia, desde que el calor se agrega continuamente al fluido. Es imposible predecir todas las características de este proceso cuantitativamente debido al gran número de variables en que el proceso depende y la complejidad de los dos modelos de flujo de fase que ocurren como la calidad de la mezcla de vapor-líquido que aumenta durante la vaporización (GROSSMAN, 1983).

Para el intercambiador de calor del evaporador es de cobre, donde las conductividades térmicas k se pueden encontrar en libros de transferencia de calor, para este caso la referencia (Incopera & Dewitt, 1999).

4.2.11. Diseño del intercambiador de calor para el condensador.

El coeficiente global de transferencia de calor se da por la ecuación 38, para esta ecuación, el valor de los factores de suciedad (F_i , F_o) al interior y exterior de las superficies del tubo puede tomarse como **0.09 m²K/kW**, (HOWELL, SAUER, & COAD, 1998).

Para el intercambiador de calor del condensador es de cobre, donde las conductividades térmicas k se pueden encontrar en libros de transferencia de calor, en nuestro caso la referencia (Incopera & Dewitt, 1999).

Para las ecuaciones anteriores se tiene la *tabla 8* es el resumen completo de valores, y la *tabla 7* los rangos de datos y finalmente los cálculos para los cinco intercambiadores de calor en cada equipo del ciclo de refrigeración por absorción.

4.3. Resúmenes completos de valores, datos y cálculos para los cinco intercambiadores de calor.

En la siguiente *tabla 7* están los rangos de valores típicos para la determinación del coeficiente global de transmisión de calor para cada una de las velocidades de circulación de los fluidos, además el valor calculado debe estar dentro del rango para que cumpla.

Tabla 7: El rango de valores típicos para la determinación del coeficiente global de transmisión de calor “U”.

EQUIPOS	FLUIDOS	ACCIÓN	RANGO DE VALORES
Generador	Vapor-Líquido	Recalentador de vapor de salmuera.	0,283 a 1,136 $\left[\frac{kW}{m^2 * K}\right]$
Condensador	Vapor-Líquido	Condensador de refrigeración.	0,456 a 1,419 $\left[\frac{kW}{m^2 * K}\right]$
Evaporador	Líquido-Líquido	Enfriador de agua.	0,283 a 1,136 $\left[\frac{kW}{m^2 * K}\right]$
Absorbedor	Líquido-Líquido	Intercambiador de salmuera.	0,169 a 0,853 $\left[\frac{kW}{m^2 * K}\right]$
Intercambiar de calor.	Líquido-Líquido	Intercambiador de salmuera.	0,130 a 1,136 $\left[\frac{kW}{m^2 * K}\right]$

Fuente: Propia de los autores.

Los datos de la *tabla 7* son adquiridos de las tablas originales que están en el anexo o al final del proyecto.

Además, en las tablas originales están en las siguientes unidades: MJ/(h*m²*°C), para la conversión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\left[\frac{MJ}{h * m^2 * K}\right] = \frac{5}{18} (Valor de rango) \equiv \left[\frac{kW}{m^2 * K}\right] \quad ()$$

Tabla 8: Resumen de los datos y cálculos de los intercambiadores de calor (I.Q.) en los equipos del ciclo de refrigeración por absorción por LiBr-H₂O.

Parámetros	Equipos donde están los I.Q.					
	Generador	Inter. De Calor		Absorbedor	Evaporador	Condensador
Fluido	Vapor-BrLi	BrLi-D	BrLi-F	Agua-BrLi	Agua-Agua	Agua-Vapor
Material	Acero	Acero		Acero	Cobre	Cobre
X _{Debil} [%]	55	55	60	55	0	0
X _{Fuerte} [%]	60			60	0	0
D _o [m]	0,053	0,041	0,041	0,041	0,032	0,050
D _i [m]	0,027	0,027	0,027	0,016	0,019	0,025
P [kPa]	12,3	12,3	12,3	0,813	0,820	12,3
T _s [K]	391	305	367	298	286	298
T _{Sat@P} [K]	328	328	328	277	278	328
T _f [K]	359,5	316,5	347,5	287,5	282	313
F _o [m ² K/kW]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
F _i [m ² K/kW]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
v _f [m ³ /kg]	0,0010			0,0010	0,0010	0,0010
v _g [m ³ /kg]	2,6450			69,7000	110,5000	18,9500
ρ _v [kg/m ³]	0,3781	1582,40	1674,50	0,0143	0,0090	0,0528
ρ _L [kg/m ³]	967,1180	1601,20	1694,20	1000,0000	1000,0000	992,0635
h _{fg} [kJ/kg]	2291,0000	205,50	219,90	2460,0000	2480,0000	2408,0000
C _{p,g} [kJ/kg*K]	1,9830	2,06	1,92			
C _{p,f} [kJ/kg*K]				4,1830	4,1900	4,1785
k _g [kW/m*K]	2,37E-05	5,09E-04	4,92E-04			
k _f [kW/m*K]				5,96E-04	5,88E-04	6,33E-04
k _{Acero} [kW/m*K]	0,0695	0,0695	0,0695	0,0695		
k _{Cobre} [kW/m*K]					0,393	0,393
μ _g [N*s/m ²]	1,15E-05					
μ _f [N*s/m ²]				1,10E-03	1,22E-03	6,50E-04
μ _{BrLi} [N*s/m ²]		1,61E-03	2,27E-03			
Pr [-]	0,96	1,50	1,50	7,56	8,95	4,30
g [m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Ja [-]	-0,0545	0,2302	-0,3398	-0,0357	-0,0135	0,0521
h' _{fg} [kJ/kg]	2206,05	237,67	169,09	2400,27	2457,21	2493,24
Re _D [-]	1754731,4	5090,6	6477,3	18835,2	16399,7	13701,5
f [-]	0,01059	0,03841	0,03569	0,00340	0,00390	0,02887
Nu _D [-]	2108,02	27,29	32,51	33,30	35,82	91,48
h _i [kW/m ² *K]	1,88	0,52	0,60	1,26	1,11	2,29
h _o [kW/m ² *K]	0,95	0,34	0,39	0,49	0,67	1,16
T _{H,1} [K]	391,00	367,00	367,00	312,50	286,00	363,00
T _{H,2} [K]	373,00	338,20	338,20	313,00	278,00	322,60
T _{C,1} [K]	338,00	305,00	305,00	298,00	277,00	298,00
T _{C,2} [K]	367,00	338,00	338,00	311,00	277,50	313,00
Q _i [kW]	15,06	3,68	3,68	13,98	10,00	11,08
m [kg/s]	0,42	0,05	0,07	0,26	0,30	0,18
U [kW/m ² *K]	0,42	0,17	0,19	0,23	0,33	0,57
Chequeo de U_{Min}	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Chequeo de U_{max}	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
ΔT ₁ [K]	53,0	62,0	62,0	14,5	9,0	65,0
ΔT ₂ [K]	6,0	0,2	0,2	2,0	0,5	9,6
ΔT _{mL, CF} [K]	21,6	10,8	10,8	6,3	2,9	29,0
R	0,6	0,9	0,9	0,0	16,0	2,7
P	0,5	0,5	0,5	0,9	0,1	0,2
F	0,93	0,85	0,85	0,98	0,80	0,95
ΔT _{mL} [K]	20,06	9,16	9,16	6,18	2,35	27,52
N [Nº de tubos]	2,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00
L [m]	5,4	9,4	8,2	19,4	32,3	2,3
A [m ²]	1,8	2,4	2,1	10,0	12,9	0,7

	Datos de tablas
	Datos de la solución BrLi calculados
	Datos de entrada supuestos y calculados
	Datos que determinan la dirección de los cálculos.
	Datos de entradas calculados
	Verificación de datos definidos según rangos
	Datos a considerar para el diseño de I.Q.

Fuente: Propia de los autores.

4.4. Análisis térmico de una torre de enfriamiento.

Existen condiciones estacionarias de operaciones y, por lo tanto, el flujo másico de aire seco permanece constante durante todo el proceso y la torre de enfriamiento se considerará adiabática, además el aire seco y el vapor de agua se consideran como gases ideales.

- ✓ El agua entra por la parte superior de la torre con una temperatura T_{19} , con un flujo másico \dot{m}_{19} y sale por el fondo de la torre con una temperatura T_{16} y un flujo másico \dot{m}_{16} .
- ✓ El aire entra no saturado por los costados de la torre con una humedad relativa Φ_{1a} , una temperatura T_{1a} y un flujo másico \dot{m}_{1a} y la sale saturado por la parte superior con una humedad Φ_{2a} , un flujo másico \dot{m}_{2a} y una temperatura T_{2a} .
- ✓ Con las temperaturas de entrada y salida del agua líquida saturada se puede encontrar las entalpías h_{19} y h_{16} .
- ✓ Con las temperaturas y la humedad relativa de entrada y salida del aire se encuentran las entalpías y humedades absolutas en la carta psicrométrica.
- ✓ Para el análisis se considera dZ la altura de una pequeña sección de torre, \dot{m}_L el flujo másico de líquido, T_L y T_a las temperaturas del agua y del aire.

La torre de enfriamiento ha sido diseñada para apreciar la construcción, diseño y características operativas de un sistema de enfriamiento evaporativo. La unidad consiste en la circulación de dos corrientes de fluido (agua y aire) y se opera un traslado de masa de una corriente a la otra.

Con la torre de enfriamiento *Figura 24* se obtienen balances de energía y de masa, y se puede investigar los efectos de: la proporción de circulación del aire, la medida de circulación del agua, la temperatura del agua y la carga de enfriamiento.

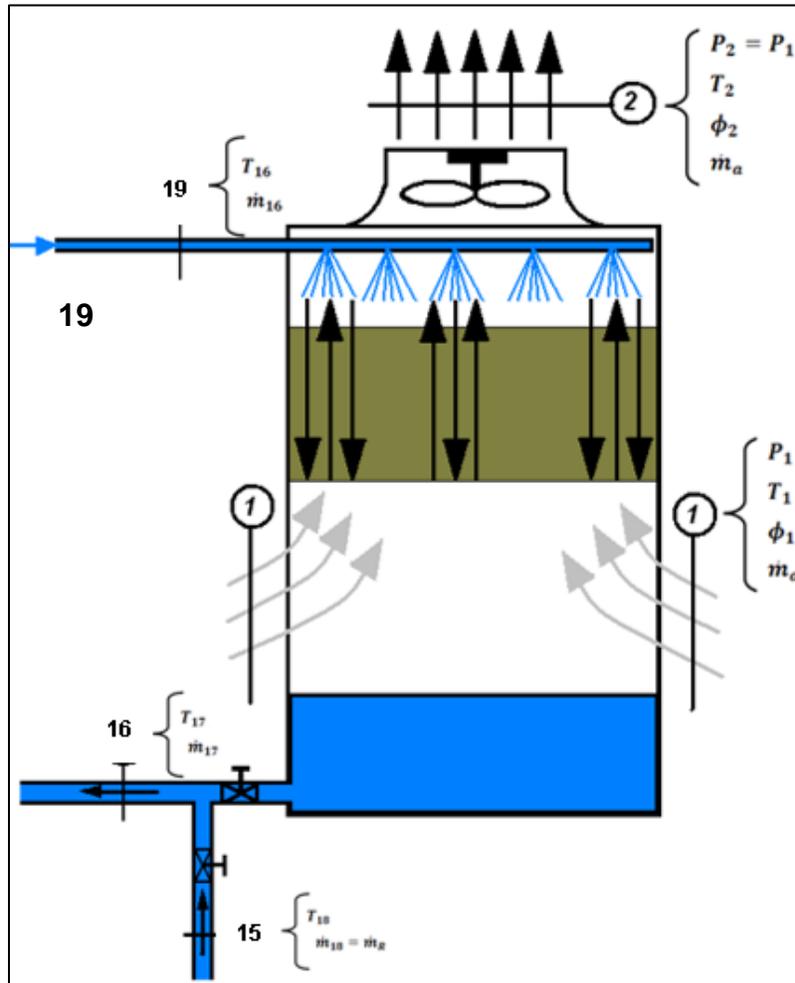


Figura 24: Esquema general de torre de enfriamiento.

Fuente: Propia de los autores.

4.5. Resumen completo de valores, datos y cálculos para la torre de enfriamiento.

La torre de enfriamiento ha sido diseñada para apreciar la construcción, diseño y características operativas de un sistema de enfriamiento evaporativo.

Con la torre de enfriamiento se obtienen balances de energía y de masa, y se puede investigar los efectos de: la proporción de circulación del aire, la medida de circulación del agua, la temperatura del agua y la carga de enfriamiento.

En la siguiente *tabla 9* están los rangos de valores típicos para la determinación del permitido para la torre de enfriamiento para cada uno de flujo másicos, además el valor calculado debe estar dentro del rango para que cumpla de la torre de enfriamiento en la *tabla 10*.

Tabla 9: Rango permitido para la torre de enfriamiento.

Flujo másico en un área	Rango permitido
$m_{\text{agua}}/\text{Área}$	0,7 a 3,5 [kg/s*m ²]
$M_{\text{Aire}}/\text{Área}$	1,6 a 2,8 [kg/s*m ²]

Fuente: Propia de los autores.

Tabla 10: Resumen de los datos y cálculos de la torre de enfriamiento.

Se diseña una Torre de Enfriamiento, la cual debe de enfriar agua de proceso desde 40 °C hasta 20 °C para un flujo másico de agua de 0,434 kg/s.			
m	0,434	kg/s	m 1562,4 kg/h
Dimensiones	[m]		Características Técnicas.
Altura Z	1,1		V _{aire} 1121,72 m ³ /h
Ancho	0,40		m _{agua} 1562,40 kg/h
Largo	0,40		d _{agua} 992,0 kg/m ³
Empaque			V _{agua} 1,575 m ³ /h
Altura Z _c	0,26		V _{agua} 6,9 GPM
Porosidad			Pot motor 3,94 kW
Superf espec			Pot motor 6 hp
F _{Emp}			Velocidades másicas
K _v *a [kg/s*m ³]	5,767		m _{agua} /Area 1995,838 lb/h*ft ²
			m _{aire} /Area 1647,254 lb/h*ft ²
Ubicamos los puntos 1 y 2 @ 1 atm.			
Punto 1	60%	Humedad relativa del aire %	
	20	Temperatura del Bulbo seco. °C	
Punto 2	100%	Humedad relativa del aire %	
	40	Temperatura del Bulbo seco. °C	
Se obtiene de la carta psicrométrica			
T _{BH}	19,5	Temperatura del Bulbo húmedo. °C	
h _{a1}	56,0	kJ/kg	Entalpía a T _{BS}
W _{a1}	0,0120	kg _{agua} /kg _{a.s}	Humedad absoluta.
V _{a1}	0,8620	m ³ /kg _{a.s}	Volumen específico.
h _{a2máx}	208,30	kJ/kg	a 40 °C y 100% de HR
W _{a2}	0,0572	kg _{agua} /kg _{a.s}	Humedad absoluta.
Línea de Operación			
(C _{p,agua} *(m _{agua} /m _{aire})) _{máx} =		(h _{a1} -h _{a2})/(T ₁₇ -T ₁₆)	
(C _{p,agua} *(m _{agua} /m _{aire})) _{máx} =		7,615	kJ/kg*°C
m _{aire}	859,68	kg/h	
m _{aire, operac} =	1,5*m _{aire} =	1289,519	kg/h
(C _{p,agua} *(m _{agua} /m _{aire, oper}))			Pendiente de la línea de operación
(C _{p,agua} *(m _{agua} /m _{aire, oper}))=		5,077	kJ/kg*°C
Calculamos el valor de entalpía en el punto 16			
h _{a16}	157,53	kJ/kg	
DISEÑO	Z=HTU*NTU		
HTU	Altura de una sección de empaque		
NTU	# de secciones de altura de empaque		
HTU=m _{aire} /k _v *a			
m _{aire} =m _{aire, oper} /Area		Area [m ²]	0,16
m _{aire} [kg/h*m ²]	8059,49		
HTU [m]	0,388		

Calculamos la altura de un plato o sección teórica, tenemos que determinar el número de secciones necesarias para el enfriamiento adecuado. Ese valor se logra calculando el NTU. Para determinar NTU es necesario aplicar un método matemático. Usamos el método de los Trapecios para el cálculo de la integral.

$$NTU = \frac{\Delta h_{aire}}{(h_i - h_{aire})}$$

$$NTU = (\Delta h) * (\sum R)$$

# de intervalos	20				
$\Delta h =$	5,08	5,26			
h_{aire}	h_i	$h_i - h_{aire}$	$1/(h_i - h_{aire})$		R
56,000	93,913	37,913	0,026		0,01319
61,077	99,172	38,096	0,026		0,02625
66,153	104,431	38,278	0,026		0,02612
71,230	109,690	38,460	0,026		0,02600
76,307	114,950	38,643	0,026		0,02588
157,533	199,095	41,562	0,024		0,01203
				$\sum R$	0,12947
NTU	0,7				

Altura de empaque necesaria Z			
Z	0,26	m	

ESTIMADO DE LA ALTURA DE LA TORRE TOTAL			
Z (Zona inf)	0,40	m	
Z (Zona sup)	0,40	m	
Z (Total)	1,06	m	

Flujo másico	Valor	Unidad	Rango permitido
$m_{agua}/Área$	2,71	kg/s*m ²	0,7 a 3,5 [kg/s*m ²]
$m_{aire}/Área$	2,24	kg/s*m ²	1,6 a 2,8 [kg/s*m ²]
El valor debe estar en el rango mostrado en la tabla.			
$m_{agua}/Área$	CUMPLE	CUMPLE	
$m_{aire}/Área$	CUMPLE	CUMPLE	
Flujo másico de aire m		1289,52	kg/h

Fuente: Propia de los autores.

4.6. La cristalización en los equipos de refrigeración.

El bromuro de litio es una sal, y en su estado sólido, tiene una estructura cristalina. Cuando LiBr se disuelve en el agua, hay una temperatura de la solución mínima específica para cualquier concentración de la sal dada. La sal empieza a dejar la solución y cristalizar por debajo de esta temperatura mínima.

En una máquina de absorción, si la concentración de la solución también es mayor o la temperatura de la solución está demasiado reducida, puede ocurrir la cristalización. Esto ocurre más probablemente en el intercambiador de calor de la solución, interrumpiendo el funcionamiento de la máquina. En tal caso, la temperatura de la solución concentrada necesita ser elevada a su punto de saturación para que los cristales de la sal retornen a la solución, liberando la máquina.

La causa más frecuente de la cristalización es el goteo aéreo en la máquina que produce la presión aumentada en el evaporador. Esto, a su vez, produce las temperaturas altas del evaporador y, por consiguiente, bajo las capacidades. En las máximas condiciones de carga, el sistema de mando aumenta el calor que entra al generador, produciendo concentraciones de la solución aumentadas al punto dónde puede ocurrir cristalización. Los gases no absorbibles, como el hidrógeno, producido por la corrosión, también puede estar presente, que reduce el funcionamiento del condensador y del absorbedor. Un método directo para guardar la presión requerida es evacuar el espacio de vapor periódicamente con una bomba de vacío.

Excesivamente el agua fría del condensador, emparejado con una condición de carga máxima, es otra causa para la cristalización. En los diseños modernos, la temperatura de agua de la torre de enfriamiento se permite flotar con las variaciones de carga y a la temperatura de aire libre. De esta manera, usando temperaturas de agua enfriada el funcionamiento de la unidad se mejora. Sin embargo, en el intercambiador de calor la solución baja a las condiciones máxima de carga, la temperatura de entrada de la solución diluida puede ser bastante baja para reducir la temperatura de la mayor solución concentrada que devuelve del generador al punto de la cristalización.

Una tercera razón es el fallo en la alimentación de corriente eléctrico. Durante el cierre normal, la máquina sufre un ciclo de la dilución que baja la concentración de la solución a lo largo de la máquina. En tal caso, la máquina puede enfriar a la temperatura ambiente sin que ocurra cristalización en las soluciones. La cristalización puede ocurrir probablemente cuando la máquina se detiene operando a la carga llena, cuando hay máxima concentración de soluciones y están presentes en el intercambiador de calor de la solución, (KALOGIROU, FLORIDES, & TASSOU, 2001).

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

El estudio de un equipo de refrigeración con energía termo solar, se hizo necesario desarrollar equipos que respondan ante estas necesidades no solo brindando beneficios al medio ambiente sino utilizando la energía del Sol, con las condiciones del territorio colombiano en los diferentes sectores tratando de proveer elementos que sean útiles para refrigerar y crear sistemas de aires acondicionados posibilitando entonces ser un motor de la economía del país haciendo que más empresas puedan servirse energéticamente mediante este tipo de tecnologías amigables con el medio ambiente y para dar una solución de enfriamiento a la zona hotelera de Coveñas con la capacidad de refrigeración según las condiciones ambientales del lugar establecido.

Teniendo en cuenta las condiciones de incidencia de la radiación solar para la zona hotelera de Coveñas mencionadas técnicas y métodos para la obtención de energía térmica, también para la utilización de los métodos de refrigeración y de enfriamiento, conociendo las ventajas y desventajas que cada uno de estos puede llevar, para de esta manera poder emplear y desarrollar con rigor técnico la generación de energía térmica, con la demanda térmica promedio de refrigeración generada en la zona hotelera.

Esto se convierte en un punto de partida para analizar las características de los equipos de absorción con potencial para su implementación del impacto que este tipo de tecnologías puedan brindar al desarrollo de la economía y convertirse en un sustituto a la par que no se utiliza energía eléctrica. Logrando tener una deficiencia sobre todo al aprovechar la alta oferta de energía solar con las condiciones que goza gran parte del país.

Para este caso se ha optado por desarrollar el equipo para la implementación según la capacidad determinada y específicos de la zona hotelera de Coveñas con el potencial energética de un sistema de intercambiador de calor recuperativo con objeto de disminuir los requerimientos de energía en todo el sistema y aumentar la eficiencia en el suministro, este tipo de dispositivos creados para la transferencia calórica entre dos o más elementos lo cual lo convierte en un circuito que permite el flujo de calor, estos tipos de servicios puede prestarse para diferentes casos que existen en las zonas mencionadas en el presente proyecto procurando la optimización de los recursos en negocios pequeños.

La tecnología se puede decir que son los más sencillos para el funcionamiento y los posibles daños que se pueden afectar así como se convierte en un elemento básico para cualquier tipo de instalación energética cuyo sistema contribuye a hacer más eficaz el consumo y suministro de energía.

RECOMENDACIONES

Este tipo de emprendimiento que tienden a desarrollar propuestas tecnológicas para disminuir el impacto del medio ambiente, requieren bastante tiempo para consolidarse en el mercado de muchas Industrias que puedan ser posibles beneficiarios de este tipo de herramientas donde no la toman su primera opción en el momento de instalar sus equipos puesto que este tipo de tecnología requiere muchos años para llegar a su verdadera eficacia y sobre todo para saber qué calidad tiene en el sentido que las empresas no pierdan dinero en este tipo de adquisiciones.

Hacer una medición radiométrica con estándares de calidad que garanticen la veracidad de la información y pueda estar ser el motor para desarrollar una industria de abastecimiento de este tipo de tecnologías en las zonas consideradas potentes para la realización de la obtención de la energía solar.

TRABAJO A FUTURO

Quiero que este tipo de propuestas desde las universidades pueda generar algún tipo de sinergia entre la empresa y la universidad, para de esta manera desarrollar proyectos conjuntos que permitan la vinculación del saber universitario y académico con las prácticas empresariales y de esta manera promover economías solidarias que puedan desarrollar a través de la energía solar en el mejoramiento de las condiciones ambientales y la repercusión que la industria puede tener en los lugares donde se desarrolla, aprovechando al máximo los recursos existentes y tratando de eliminar menos contaminación al ambiente.

Además con los futuros gobiernos en el mundo que desarrollan programas paralelos a la obtención de energía convencional ese tipo de propuesta se puede desarrollar en otras naciones sobre todo teniendo en cuenta que muchas de ellas le están apostando formas más limpias de producción y por lo tanto las alianzas a nivel público privado es universidades y empresas puede traer sinergias como la proyección de los aprendizajes obtenidos en Colombia gracias a la implementación de estos elementos y poder llevar esta experiencia muchos otros países de la región y el mundo.

6. REFERENCIAS

- ASHRAE (American Society of Heating, R. a.-C. (1997). *Fundamentals of Refrigeration Handbook, Absorption Cooling, Heating and Refrigeration Equipment*. Atlanta (Georgia): ASHRAE.
- Barragán Escandón, E., Zalamea León, E., Terrados Cepeda, J., & Vanegas Peralta, P. (2019). Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad. *SciELO Analytics, EURE*, 4 (262).
- Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1991). <http://www.quimica.urv.es/~w3siiiq/DALUMNES/99/siiiq51/Colc.html>. (S. E. processes, Productor) Recuperado el 15 de 03 de 2021
- Catota Ocapana, P. C., & Tonato, Q. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de refrigeración solar por absorción mediante par amoniaco-agua, para la conservación de alimentos*. Especial.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *TERMODINÁMICA* (Séptima edición ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Colector cilíndrico parabólico. (15 de 03 de 2021). <http://www.psa.es/webesp/areas/cilindroparabolica/general.html>.
- Colector de tubos de vacío. (15 de 03 de 2021). <http://www.sitiosolar.com/colectores%20de%20tubo%20de%20vacio.htm>.
Obtenido de http://www.thermoquest.cl/index.php?p=1_21.
- Colector lineal Fresnel. (15 de 03 de 2021). <http://www.renewables-made-in-germany.com/es/pagina-de-inicio/energia-solar/centrales-termicas-solares/general.html>. Obtenido de http://www.shp-europe.com/docs/mstpp_sp.pdf.
- Colector solar plano de vacío. (15 de 03 de 2021). http://www.natureduca.com/energ_alternat_colectsolar2.php. Obtenido de <http://materiasprimass.blogspot.com/2009/01/energia-solar-termica-y-fotovoltaica.html>.
- Central solar de torre central. (Consultado el 02 de octubre del 2022). Disponible en: http://recursostic.educacion.es/eda/web/eda2010/newton/materiales/ruiz_perales_francisco_p3/fuentes_solartermica.html.
- Conlisk, A. (1992). *Falling film absorption on a cylindrical tub*. AICHE J.
- Dossat, R. J. (2001). *Principios de Refrigeración* (Vigésima ed.). México, D.F.

- <http://recursostic.educacion.es>. (25 de 11 de 2020).
http://recursostic.educacion.es/eda/web/eda2010/newton/materiales/ruiz_perales_franccisco_p3/fuentes_solartermica.html. Recuperado el 25 de 11 de 2020, de
http://recursostic.educacion.es/eda/web/eda2010/newton/materiales/ruiz_perales_franccisco_p3/fuentes_solartermica.html:
http://recursostic.educacion.es/eda/web/eda2010/newton/materiales/ruiz_perales_franccisco_p3/fuentes_solartermica.html
- <http://www.mundohvacr.com.mx>. (24 de septiembre de 2020). *Sustancias de Trabajo en Sistemas de Refrigeración por Absorción*. (S. d. Absorción, Productor) Obtenido de <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/09/ciclos-de-refrigeracion-por-absorcion/>.
- IDEAM, C. (15 de octubre de 2020). <https://energiasolarcolombia.co/mapa-radiacion-solar-colombia/>.
- Incopera, F. P., & Dewitt, D. P. (1999). *Fundamentals of transfer of Heat*. México: Four Edition, Prentice Hall.
- Individual Solar Energy, I. (03 de 04 de 2021). <https://solar-pellets.com/es/>. Obtenido de <https://solar-pellets.com/es/>
- Kalogirou, S., Florides, G., & Tassou, S. (2001). *Design and construction of a lithium bromide water absorption refrigerator*. In: *Proceedings of CLIMA 2000*. Naples: International Conference on CD-ROM.
- Lara, F., Velázquez, N., Saucedo, D., & Acuña, A. (2013). Optimización de un Concentrador Lineal Fresnel. *Información tecnológica*.
- Lee, R. J., Digulio, R. M., & Jeter, S. M. (1990). *Properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures and concentration* (Vol. II. Density and viscosity). EE.UU.: ASHRAE.
- Marcos del Cano, J. D. (2008). *Prototipo de máquina frigorífica de absorción de LiBr / H2O de doble efecto condensada por aire*. Madrid: TESIS DOCTORAL.
- MORIOKA I, KIYOTA M, NAKAO R. Absorption of water vapor into a film of aqueous solution of LiBr falling along a vertical pipe. *JSME Int. J, Ser B* 1993.
- Mauthner, F., Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2019). *Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends, Detailed Market Figures, Gleisdorf*. Austria: Institute for Sustainable Technologies - IEA Solar Heating & Cooling Programme.
- Murcia, C. O. (1993). *Nuevo Curso de Ingeniería del Frío*. Madrid Vicente, Colombia: 2 Ed. Madrid.

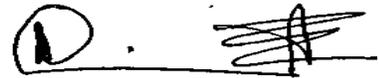
- Petukhov, B. S., Irvine, T. F., & Hartnett, J. P. (1970). *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6. New York: Academic Press.
- Pilatowsky Figueroa, I. (2004). Tecnologías de enfriamiento. En U. N. México, *Tecnologías de enfriamiento* (pág. 48). México: s e.
- Plantas de refrigeración solar. (15 de 03 de 2021). <http://www.accion-solar.org/accion-solar/adjuntos/contenido-565-archivo.pdf>.
- Quintanilla P, R. (2011). *Replanteo de instalaciones solares térmicas*. Málaga: MF00601_2.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2013). Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy Build*, 67, 286–297.
- Servicio Bloomberg Professional. (21 de 03 de 2021). <https://www.bloomberg.com/latam/blog/la-energia-solar-y-eolica>. Obtenido de <https://www.bloomberg.com/latam/blog/la-energia-solar-y-eolica>
- Solar Celsia, & Energía solar Colombia. (03 de 04 de 2021). <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>. Obtenido de <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>
- Srihirin, P., Aphornratana, S., & Chungpaibulpatana, S. (2000.). A review of absorption refrigeration technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 43–372.

7. ANEXO

FIRMA ESTUDIANTES:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Duan', written over a horizontal line.

José Yovaní Barrientos Londoño

A handwritten signature in black ink, consisting of a circled letter 'A' followed by a series of horizontal strokes, written over a horizontal line.

FIRMA ASESORES:

Adrián F. Martínez

FECHA ENTREGA: 01-marzo 2023