

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Eduar Ernesto Pérez Rojas		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Mecánica		
DIRECTOR	Carlos Javier Noriega Sánchez		
TÍTULO DE LA TESIS	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR		
RESUMEN			
(70 palabras aproximadamente)			
<p>La propuesta plantea el diseño y construcción de un sistema de refrigeración por adsorción química a partir del uso de energía solar como contribución al estudio del arte de los sistemas de refrigeración por sorción, la cual nace de la necesidad de sistemas que contribuyan con el mejoramiento de la calidad de vida de las personas que se encuentran en zonas remotas donde no hay la posibilidad de sistemas de refrigeración convencionales por la falta de interconectividad eléctrica, lo que no permite la conservación de alimentos y medicamentos en estas zonas. Es por ello que se plantea como solución a ello el diseño y construcción del prototipo para así evaluar la pasibilidad de brindarles a estas personas la posibilidad de contar con un sistema de refrigeración.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 83	PLANOS: 2	ILUSTRACIONES: 23	CD-ROM: 1



VÍA ACOLSURE, SEDE EL ALGODONAL. OCAÑA N. DE S.
 Línea Gratuita Nacional 018000 121022 / PBX: 097-5690088
www.ufp-o.edu.co



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR
ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR**

EDUAR ERNESTO PÉREZ ROJAS

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA
OCAÑA
2014**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR
ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR**

EDUAR ERNESTO PÉREZ ROJAS

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director:
CARLOS JAVIER NORIEGA SÁNCHEZ
M. Sc. Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA
OCAÑA
2014**

*A mi madre
Mildred Rojas Madariaga.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi familia, mis hermanos Jhon Danilo y Alver José quienes me apoyaron desde el comienzo de mi formación y supieron alentarme para seguir adelante.

A Johanna Carolina Picón Pérez, mis amigos y todas las personas que han hecho que este sueño haya sido posible.

A los profesores Carlos Javier Noriega Sánchez, Alfredo Bohórquez Niño, Eder Flores Solano, Leonardo Navarro Torrado, María Angélica Acosta, Jaidier vergel Pabón por todo su apoyo durante mi formación como persona y profesional.

Al TecnoParque SENA nodo Ocaña quienes brindaron toda su infraestructura y talento humano para la realización de este proyecto.

A mis amigos Fabián vega Torres, Ricardo García, Wilmar Montejo quienes fueron parte de este proyecto y me ayudaron desinteresadamente en su construcción.

CONTENIDO

	pág.
<u>INTRODUCCIÓN</u>	15
<u>1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR.</u>	16
<u>1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.</u>	17
<u>1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.</u>	17
<u>1.3 OBJETIVOS.</u>	17
1.3.1 Objetivo general.	17
1.3.2 Objetivos específicos.	17
<u>1.4 JUSTIFICACIÓN.</u>	18
<u>1.5 DELIMITACIÓN.</u>	18
1.5.1 Geográfica.	18
1.5.2 Conceptual.	18
1.5.3 Operativa.	18
1.5.4 Temporal.	19
<u>2. MARCO REFERENCIAL.</u>	19
<u>2.1 MARCO HISTÓRICO.</u>	19
2.1.1 Marco histórico mundial.	19
2.1.2 Marco histórico nacional.	19
2.1.3 Marco histórico departamental.	21
2.1.4 Marco histórico local.	21
<u>2.2 MARCO CONCEPTUAL.</u>	21
<u>2.3 MARCO TEÓRICO.</u>	24
2.3.1. Ciclo de refrigeración por adsorción y sus componentes.	25
2.3.2. Tipos de diseño del reactor.	26
<u>2.4. MARCO LEGAL.</u>	33
2.4.1. Constitución Colombiana.	32
2.4.2. Contaminación ambiental	33
2.4.3. Universidad Francisco de Paula Santander.	33
<u>3 DISEÑO METODOLÓGICO.</u>	35
<u>3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.</u>	35
<u>3.2 POBLACIÓN.</u>	35
<u>3.3 MUESTRA.</u>	35
<u>3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.</u>	35
3.4.1 Análisis de la información.	36
3.4.2 Actividades en la elaboración del proyecto.	36
3.4.3 Etapas del proyecto.	36
<u>4. PROTOTIPO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN</u>	37

QUÍMICA.

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO.

4.1.1. Dimensiones del modelo.	37
4.1.2. Parábola reflectante.	37
4.1.3. Estructura soporte de la parábola reflectante.	38
4.1.4. Columnas para el soporte de la estructura.	39
4.1.5. Tubo reactor donde se almacena el adsorbente.	39
4.1.6. Condensador.	39
4.1.7. Caja refrigerante.	40
4.1.8. Válvula de pulgada.	40
4.1.9. Efectos del viento sobre la estructura.	41

4.2. CÁLCULOS DEL PROTOTIPO.

4.2.1. Análisis estructural.	41
4.2.1.1. Diseño del tubo sometido a presiones internas.	41
4.2.1.2. Análisis en SolidWorks simulation de la tubería.	42
4.2.1.3. Diseño de la estructura que soporta la parábola reflectante.	43
4.2.1.4. Diseño de las columnas soporte de la parábola.	44
4.2.2 Análisis térmico.	45
4.2.2.1. Datos meteorológicos y ambientales.	45
4.2.2.2. Cálculo de pérdidas térmicas.	46
4.2.2.3. Determinación de las cantidades de adsorbente y adsorbato.	50
4.2.2.4. Calculo de la cantidad de agua a congelar.	52
4.2.2.5. Diseño del condensador mediante elementos finitos.	52
4.2.2.6. Determinación del COP	53

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

4.3.1. Estructura soporte del sistema.	54
4.3.2. Ajuste del espejo en la estructura del mismo.	55
4.3.3. Sistema de rotación de la parábola.	56
4.3.4. Lecho adsorbente o foco de la parábola.	56
4.3.5. Condensador.	56
4.3.6. Caja fría.	57

4.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.

4.4.1. Instrumentos usados en las pruebas.	57
4.4.1.2. Termocuplas tipo K.	57
4.4.1.3. Transductor de presión.	58
4.4.1.4. Manómetros para refrigeración.	59
4.4.2. Pruebas de funcionamiento del equipo.	60
4.4.2.1. Efectividad de la parábola.	60
4.4.2.2. Verificación de fugas en el sistema.	61
4.4.2.3. Comportamiento del adsorbente.	61
4.4.3. Especificaciones de los resultados de las pruebas en el equipo.	64
4.4.3.1. Selección del colector solar.	64
4.4.3.2. Resultados de las pruebas de compactación de sal en una tubería.	64
4.4.3.3. Resultados para la concentración de calor en el prototipo.	65

<u>5. CONCLUSIONES.</u>	66
<u>6. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.</u>	67
<u>BIBLIOGRAFÍA.</u>	68
<u>REFERENCIAS DOCUMENTALES ELECTRÓNICAS</u>	72
<u>ANEXOS</u>	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies	28
Tabla 2. Propiedades geométricas y mecánicas de la tubería.	44
Tabla 3. Condiciones ambientales del medio donde se va a implementar la máquina.	48

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Refrigerador por adsorción con dos reactores.	24
Figura 2. Reactor de lecho adsorbente.	24
Figura 3. Recinto cerrado rectangular inclinado.	27
Figura 4. Colectores lineales Fresnel.	28
Figura 5. Colectores Parabólicos.	29
Figura 6. Parábola.	30
Figura 7. Cálculo de la concentración producida por el concentrador cilíndrico parabólico.	31
Figura 8. Dimensiones generales del prototipo.	37
Figura 9. Estructura soporte de la parábola reflectante.	38
Figura 10. Columnas para el soporte de la estructura.	39
Figura 11. Tubo reactor donde se almacena el adsorbente.	39
Figura 12. Evaporador.	40
Figura 13. Caja refrigerante.	40
Figura 14. Sección de tubo con costura longitudinal.	42
Figura 15. Factor de seguridad máximo.	42
Figura 16. Desplazamiento máximo.	43
Figura 17. Esfuerzo de von Mises.	43
Figura 18. Análisis de desplazamientos en la columna.	44
Figura 19. Mapa de radiación solar en Colombia promedio anual.	45
Figura 20. Concentración de la radiación sobre el perímetro del tubo del lecho adsorbente.	47
Figura 21. Sección transversal del reactor o lecho adsorbente	49
Figura 22. Distribución de temperaturas a lo largo del condensador.	54
Figura 23. Deformaciones en el colector de placa plana.	65

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Parábola del prototipo	38
Foto 2. Válvula de acero inoxidable.	41
Foto 3. Estructura soporte de la parábola.	55
Foto 4. Ajuste de la curva.	55
Foto 5. Ajuste del espejo en la parábola.	56
Foto 6. Sistema de rotación, chumacera F206	57
Foto 7. Foco de la parábola.	57
Foto 8. Montaje de los tubos capilares del evaporador.	58
Foto 9. Caja fría.	58
Foto 10. Termocupla tipo K.	59
Foto 11. Transductor de presión 500Psi.	60
Foto 12. Manómetros para refrigeración.	60
Foto 13. Medición de la temperatura en el foco.	61
Foto 14. Medición de la presión en el foco.	61
Foto 15. Inyección de aire a alta presión al sistema.	62
Foto 16. Medición de la masa del carbón activado.	63
Foto 17. Medición de la masa del cloruro de litio.	63
Foto 18. Mezcla del cloruro de litio y el carbón activado.	64
Foto 19. Mezcla en la mufla a 100°C.	64
Foto 20. Sal compactada en la probeta de compactación.	66
Foto 21. Reflejo de la radiación en el foco.	66

LISTA DE NEXOS

	pág.
ANEXO A. Catálogo Tuberías, Dimensiones y Pesos ASTM.	75
ANEXO B. Propiedades del aire.	76
ANEXO C. Propiedades del amoniaco saturado (liquido-Vapor).	78
ANEXO D. Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes (líquidos).	79
ANEXO E. Planos del prototipo	80

INTRODUCCIÓN

El creciente aumento en el uso de fuentes de energía no renovables y la fuerte dependencia de del sector energético a dichas fuentes, incentivan el estudio de aplicaciones que utilizan fuentes de energía renovables. En ese escenario, se ha observado en los últimos años un aumento en el número de trabajos relacionados con sistemas de refrigeración y climatización que utilizan otras fuentes de energía además de la eléctrica como los sistemas de refrigeración por sorción. Los cuales pueden producir efecto frigorífico usando principalmente calor residual o de otras fuentes tales como la energía solar térmica. Otra ventaja de estos sistemas es que los mismos utilizan refrigerantes que no degradan la capa de ozono. Sin embargo, los principales inconvenientes de esta tecnología continúen siendo los bajos valores de coeficiente de desempeño COP, por tanto como forma de contribuir al avance del estudio del arte de este tipo de sistemas, este trabajo busca construir un prototipo de sistema de refrigeración por adsorción química para un par LiCl-NH₃ (adsorbente/adsorbato), el cual puede ser utilizado para producir efecto frigorífico aprovechando la energía proveniente de la radiación solar.

La construcción de este prototipo permite evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de funcionamiento e identificar la influencia de las condiciones ambientales sobre el desempeño del mismo.

1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR.

1.1. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

En un mundo tan complejo y moderno como el actual, donde el cambio climático desempeña un papel cada vez más importante en la vida de las personas y del planeta, generando impactos a gran escala, es necesario contribuir de alguna manera a el ejercicio de mejoramiento continuo del planeta.

La tendencia al individualismo es una característica del hombre postmoderno donde solo se busca satisfacer los intereses personales pasando por encima de los intereses colectivos y sociales. Esta característica ha contribuido en gran manera a la pérdida del sentido social afectando así en gran magnitud el desarrollo de la comunidad en general, donde solo unos sectores son los favorecidos, pues prima el bienestar individual sobre el colectivo.

Es de vital importancia recalcar cambios demográficos, de estilos de vida y principalmente tecnológicos en la vida de las personas, los cuales han conducido a una importante concentración de estudios a nivel mundial, para de esta forma ofrecer una alternativa de cambio y mejoramiento en todo lo relacionado con los sistemas de refrigeración.

Siendo la refrigeración es el proceso de producir frío, en realidad extraer calor. Para producir frío lo que se hace es transportar calor de un lugar a otro. Así, el lugar al que se le sustrae calor se enfría, donde se pueden aprovechar diferencias de temperatura para producir calor, creando efector frigoríficos para producir frío artificial mediante los métodos de compresión, de absorción y adsorción.

En la actualidad los sistemas de refrigeración son utilizados en múltiples procesos los cuales van desde la conservación de alimentos para ayudar en su transporte y comercialización, hasta en la creación de ambientes agradables para el confort humano. Muchos de esos sistemas de refrigeración operan bajo ciclos de compresión a vapor, aunque esta tecnología haya tenido grandes desarrollos en los últimos tiempos, aun presenta problemas de tipo ambiental principalmente relacionados con el uso de electricidad la cual es generada en gran porcentaje por fuentes no renovables; el uso de refrigerantes que producen efecto invernadero que deterioran la capa de ozono.

Es por ello que en los últimos 40 años se han retomado los estudios de sistemas que produzcan efecto frigorífico y sean más amigables con el ambiente como los sistemas de refrigeración por sorción, esto debido principalmente a la crisis del petróleo en la década de los 70 y luego en los años 90 por la preocupación de las emisiones de refrigerantes halogenados a la atmosfera.

De otro lado con el creciente aumento del consumo de energía a nivel nacional y mundial es necesario generar alternativas las cuales conduzcan a un mejor uso y aprovechamiento de las fuentes de energías disponibles, con lo cual se pueden tomar fuentes renovables de energía como la solar.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿La población del sistema no interconectado nacional será susceptible a la creación de un sistema de refrigeración por adsorción química que utiliza energía solar para producir refrigeración?

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. Objetivo general. Diseñar y construir un sistema de refrigeración por adsorción química a partir del uso de energía solar.

1.3.2. Objetivos específicos. Establecer mediante criterios de diseño los principales componentes necesarios para el desarrollo del sistema de refrigeración por adsorción química tales como el reactor, el evaporador y el condensador.

Identificar los procesos que rigen el principio de refrigeración por adsorción química.

Implantar un sistema para la adquisición de datos, a través de los obtenidos por el análisis del sistema de refrigeración por adsorción química.

Estudiar el comportamiento del sistema de refrigeración por adsorción química en condiciones de geografía diferentes.

Determinar los parámetros de desempeño del prototipo de sistema de refrigeración por adsorción química, coeficiente de desempeño (COP).

1.4. JUSTIFICACIÓN

Dentro de los aspectos más importantes de la planeación minero energética Colombiana está la disponibilidad de energía para todo el territorio nacional lo cual lleva a observar cual es la disponibilidad energética del mismo.¹ El enfoque de las líneas de acción en Colombia para la planificación del uso racional de la energía en el país, se orienta básicamente a la promoción de fuentes no convencionales², a la implementación de planes de acción para mejorar la eficiencia energética en la disminución de la intensidad, en función de la identificación de los potenciales y la definición de metas por ahorro energético y participación de las fuentes y tecnologías no convencionales en la canasta energética del país.³

Ya que las regiones no interconectadas corresponden al 66% del territorio nacional y abarca 16 departamentos, actualmente se encuentran instalados 118 MW de capacidad de

¹UPME. Consorcio Bariloche - BRP. Consultoría para la Formulación Estratégica del Plan de Uso Racional de Energía y Fuentes no Convencionales de Energía 2007 – 2025. Bogotá. : s.n. 2007.

²CAICEDO, Omar. PRIAS, Fredy. Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes. Bogotá d.c.: Ministerio de Minas y Energía. 2010.

³CADENA, A. DELGADO, R. Diagnóstico, Perspectivas y Lineamientos para Definir Estrategias Posibles Ante el Cambio Climático. Bogotá: Egemsa, Codensa, Universidad de los Andes. 2009.

generación, de los cuales entre el 8% y el 10% son generados con fuentes no convencionales de energía (FNCE), el 92% (108,5 MW) corresponde a generación con plantas Diesel, y tan solo el 8 % restante corresponde a generación con PCH's, sistemas fotovoltaicos y generación con biomasa.⁴ Lo que hace necesario la búsqueda de la implementación de fuentes no convencionales que suplan la demanda energética en zonas no interconectadas que utilizan combustibles fósiles para suplir esta necesidad, y así disminuir la contaminación generada por los gases de combustión.

En las regiones distantes donde no se cuenta con interconexión eléctrica, la preservación de vacunas y alimentos es precaria, ya que no se cuenta con un sistema de refrigeración por la falta de acceso a la electricidad. Este factor en muchos casos imposibilita el manejo de alimentos perecederos, transporte y manejo de vacunas que requieren conservación de cadenas de frío, además de todas las necesidades básicas que condicionan la calidad de vida.

En consecuencia, es necesario fomentar e implementar la garantía de sistemas de refrigeración que no consuman electricidad en las zonas que aún no cuentan con ella, valiéndonos de energías alternativas que permitan lograr dicho objetivo. Con esto, aumenta sustancialmente en estas zonas la calidad de vivienda, la calidad de vida, la promoción de alimentación saludable, la implementación y mejora en los servicios de salud, la protección medio ambiental, entre otros. Se justifica entonces la necesidad emergente de refrigeración mediante una fuente disponible y totalmente accesible, como la energía solar.

1.5. DELIMITACIONES

1.5.1. Geográfica. La investigación se realizará en las ciudades de Ocaña Norte de Santander y Aguachica Cesar donde se cuentan con las condiciones de variación de temperatura y radiación necesarias para medir las diferentes variables del proyecto.

1.5.2. Conceptual. El proyecto tendrá la siguiente conceptualización: Sorción, Adsorción química, Adsorbente, Adsorbato, Cloruro de Litio, Amoniaco, Colector Solar, Coeficiente de Desempeño, Potencia de refrigeración específica.

1.5.3. Operativa. El proyecto se desarrollará con base en los parámetros del presente documento y con la asesoría del director del mismo y las personas que se necesiten como asesores en el transcurso de la investigación para de esta manera llevar a cabo la realización de los objetivos del proyecto.

1.5.4. Temporal. El presente proyecto investigativo tendrá una duración aproximada de 28semanas a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto, como se muestra en el cronograma de actividades.

⁴IPSE. Diagnostico Zni. 2009.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO HISTÓRICO

2.1.1. Marco histórico mundial. Los sistemas de refrigeración de sorción fueron los primeros equipos utilizados para producir artificialmente efecto frigorífico, sin embargo en la primeras décadas del siglo XX la expansión de las redes de distribución de energía eléctrica, llevo a las empresas de electrificación a invertir en el desarrollo de sistemas que consumieran energía eléctrica, tales como los sistemas de refrigeración por compresión mecánica⁵.

La inversión en investigaciones en este tipo de sistemas posibilito entre otras innovaciones la creación de los refrigerantes halogenados y con este avance desde entonces, los sistemas de compresión a vapor pasaron a ser utilizados ampliamente en la mayoría de las instalaciones industriales frigoríficas.⁵

En las últimas décadas Medini et al.⁶Estudiaron la adsorción solar fabricando hielo con una superficie de captación 0,8 m² en 1991. El prototipo empleaba un ciclo diario intermitente con par carbón activado- metanol. Los resultados mostraron que, con una eficiencia de recolección de 0,41 y un COP térmico de 0,40, es posible obtener un COP solar bruto de 0,15, con una producción de 4 kg de hielo por día, durante el verano.

Critoph⁷ construyo un pequeño refrigerador solar de adsorción sólida en 1994. El colector tenía 1,4 m² de superficie y contiene 17 kg de carbón activo. La caja fría está alejada del colector, que está unido a la misma por un tubo flexible de acero. Según los resultados el prototipo produjo un máximo de 4 kg de hielo por día en un ciclo diurno.

Sumathy y Li⁸ operaron una máquina de hielo con energía solar con un par de trabajo carbón activado-metanol, utilizando un colector de placa plana con una superficie expuesta de 0,92 m². Este sistema podría producir hielo de alrededor de 4-5 kg / día con un COP solar de aproximadamente 0,1-0,12.

Una gran cantidad de trabajos de investigación sobre la refrigeración por adsorción se ha hecho en Shanghai Jiao Tong University desde 1993. Varios prototipos de máquinas de adsorción para producir hielo se han desarrollado y probado en los últimos años.

⁵COWAN, R. S. How the Refrigerator Got its Hum. in: Mackenzie, d. a. e Wajcman, j. (ed.). The Social Shaping of Technology: How the Refrigerator Got its Hum. Philadelphia: Open University Press. 1985, pp.202-218.

⁶MEDINI N, MARMOTTANT B, Elgollis, Grenier ph. Etuded'une Machine Solaire Autonome a Fabriquer de la Glace. *Int J Refrig.*1991,vol. 14.

⁷CRITOPH RE. An Ammonia Carbon Solar Refrigerator for Vaccine Cooling. *Renewable Energy.* 1994, vol. 5, pp. 502-508.

⁸SUMATHY K, Li Z. F. Experiments with Solar-Powered Adsorption Ice-Maker. *Renewable Energy.* 1999, vol. 16, pp. 704-707

Li et al⁹. Construyó una máquina de hielo con placa plana sólida de adsorción para refrigeración, usando metanol con carbón activado como par de trabajo con fines de demostración. Los resultados experimentales muestran que el COP térmico es de aproximadamente 0,45 y COP solar es de aproximadamente 0,12-0,14, con aproximadamente 5-6 kg de hielo producidos por m² de colector.

Después de algunas mejoras, una máquina de hielo solar similar sin válvula fue construida por Li et al¹⁰. Para este sistema, no hay ningún depósito, válvulas de conexión o válvula de estrangulamiento, y la estructura del sistema es muy simple. Los resultados experimentales mostraron que 6,0 a 7,0 kg de hielo se puede obtener en ambientes cerrados cuando la energía de la radiación fue de aproximadamente 17 a 20 MJ/m², para estas condiciones, el COP solar de este sistema fue de aproximadamente 0,13-0,15. En condiciones de puertas hacia fuera del laboratorio, el sistema produjo 4,0 kg de hielo y el COP solar era de 0,12 cuando la energía total de la insolación era de 16-18 MJ / m².

Se construyó un prototipo de adsorción química sólido-gas con par de trabajo BaCl-NH₃, en el laboratorio PROMES en Perpignan, Francia. Los resultados experimentales demostraron que es posible producir frío con las temperaturas entre 20 y 30.5°C, el COP solar obtenido es 0,061, que es comparable con los resultados presentados por otros sistemas¹¹. Sus resultados pueden entonces servir como directrices para la producción de frío con temperaturas fácilmente alcanzables con energía solar.

2.1.2. Marco histórico nacional. En Colombia la refrigeración solar da su primer paso mediante un proyecto aprobado por Colciencias, el cual pretende incentivar la innovación tecnológica del país en el campo de las energías alternativas a partir de la construcción de un prototipo de refrigeración solar por adsorción Física¹². También se registran trabajos tales como el análisis de las variables que inciden en el comportamiento de un refrigerador solar en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Bucaramanga.¹³

2.1.3. Marco histórico departamental. No se registran estudios de refrigeración por adsorción química en el departamento.

2.1.4. Marco histórico local. En Ocaña no se registran estudios de refrigeración por adsorción química.

⁹LI, M. WANG, R. Z. XU, Y. X. WU, J. Y. Desing ao. Experimental Study on Dynamic Performance Analysis of a Flat-Plate Solar Solid-Adsorption Refrigeration for Ice Maker. **Renewable Energy**. 2001, vol. 27, pp. 211–221.

¹⁰LI, M. SUN, C. J. WANG, R. Z. CAI, W. D. Development of no Valve Solar Ice Maker. **Appl Therm Eng**. 2004, vol. 24, pp. 865–872.

¹¹LE PIERRES, N. Procédé Solaire de Production de Froid Basse Temperature (-28 °C) Par Sorption Solide-Gas. These Energetique et Genie de Procédés de l'Université de Perpignan; 2005.

¹²CORTES, F.B. GALLON, D.A. JURADO, W.J. Modelamiento de un Sistema de Refrigeración Mediante Adsorción Intermitente en Carbón Activado Utilizando Como Fuente de Energía Radiación Solar. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 2004.

¹³HERNÁNDEZ, A. REYES, M. Análisis de las Variables que Inciden en el Comportamiento de un Refrigerador Solar, **Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada**. 2012

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Adsorción: La adsorción, se define como la adhesión en una capa extremadamente delgada de moléculas (como de los gases, solutos, o líquidos) a las superficies de los cuerpos sólidos o líquidos con los que están en contacto.¹⁴ Es un proceso en el cual una sustancia ya sea gas líquido o sólido, se adhiere sobre la superficie de un sólido o un fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie; la sustancia que adsorbe es el adsorbato y la sustancia sobre el cual lo hace es el adsorbente.

Sistemas de refrigeración: Los denominados sistemas frigoríficos sistemas de refrigeración corresponden a arreglos mecánicos que utilizan propiedades termodinámicas de la materia para trasladar energía térmica en forma de calor entre dos -o más focos, conforme se requiera. Están diseñados primordialmente para disminuirla temperatura del producto almacenado en cámaras frigoríficas o cámaras de refrigeración las cuales pueden contener una variedad de alimentos o compuestos químicos, conforme especificaciones.

Cabe mencionar la radical diferencia entre un sistema frigorífico y un circuito de refrigeración, siendo este último un mero arreglo para disminuir temperatura el cual se define como "concepto", ya que su diseño (abierto, semi abierto, cerrado), fluido (aire, agua, incluso gas refrigerante), flujo (sólo frío o "bomba de calor") varían conforme la aplicación. Estos varían desde el clásico enfriamiento de motor es de combustión interna por medio de agua hasta el wáter cooling utilizado en enfriamiento de computadores. Los sistemas frigoríficos tienden a ser bastante más complejos que un circuito de refrigeración y es por eso que se presentan aparte.

Refrigeración por sorción: Un sistema de sorción tiene una capacidad única de transformar la energía térmica directamente en potencia de refrigeración. Entre el par adsorbente-adsorbato, el fluido de trabajo (refrigerante) es conocido como adsorbato mientras que el sólido que adsorbe es llamado adsorbente.¹⁵

Adsorbente: Es una fase sólida del sistema de refrigeración por adsorción donde se presentan por lo general sitios preferenciales a los cuales se une una sustancia gaseosa.¹⁶ Teniendo la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas. Se caracterizan por una alta superficie específica y por su inercia química frente al medio en el que se van a utilizar.

Adsorbato: Fase pura gaseosa o sustancia que se une a una fase sólida dentro del proceso de refrigeración por adsorción¹⁷. Es una sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente, el adsorbato se adhiere sobre la superficie del adsorbente por un proceso de adsorción.

¹⁴SKOOG, Douglas A. Química Analítica. McGraw Hill. 2000.

¹⁵KIM, D.S. INFANTE, C.A. Solar Refrigeration Options – a State-of-the-Art Review, Arsenal Research, Sustainable Energy Systems, Giefingasse 2, 1210 Vienna, Austria, 2008.

¹⁶TIMMERMANN, E.O. Termodinámica de Isotermas de Sorción, UBA. 2003.

¹⁷GONZALES, I. Refrigeración Solar por Adsorción con Sistemas de Captación CPC Experimentos y Modelos, Universidad de Burgos. 2006.

Adsorción química o quimisorción: El proceso de quimisorción implica fuerzas de valencia derivados de intercambio de electrones entre el adsorbente y los átomos de adsorbato. Esto da lugar a una reacción química y la formación de un compuesto complejo de superficie. Las fuerzas de los enlaces formados son mucho más fuerte que la fuerza de Van der Waals. Como consecuencia, se requiere mucho más calor de adsorción para liberar el adsorbato, hasta 800 kJ / mol. El calor de adsorción del adsorbente es mayor que el calor de condensación del refrigerante. El proceso de quimisorción es específico y se produce entre un cierto gas y un cierto adsorbente sólido correspondiente. El espesor de la fase adsorbida es unimolecular porque sólo una capa de adsorbato reacciona con las moléculas de la superficie.¹⁸

Colector solar: El colector solar plano es el elemento fundamental del sistema de energía solar que transforma la energía solar radiante en energía térmica de forma directa por transferencia de calor al fluido de trabajo. Es un sistema cerrado de evaporación – condensación sin partes móviles.¹⁹ Un colector solar, también llamado captador solar, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos: los captadores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción y ACS, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica. Existen colectores solares de diferentes tipos estos son: captadores de baja temperatura y captadores de alta temperatura.¹⁸

Refrigeración por adsorción: Refrigeradores por adsorción son similares a los de compresión mecánica, en el sentido que utilizan un condensador, un evaporador y en ciertas maquinas un dispositivo de expansión. La diferencia radica en la forma como el refrigerante deja el evaporador a baja presión y alcanza alta presión para ingresar al condensador. En los sistemas de adsorción, la energía térmica es la fuerza motriz necesaria para alcanzar la presión del condensador, en vez del trabajo de compresión mecánica para refrigeradores que utilizan compresores. El calor suministrado en los sistemas de adsorción puede ser proveniente de la combustión de gas natural, de calor residual, de fuentes geotérmicas o de la energía solar.²⁰

Cloruro de litio: El cloruro de litio, cuya fórmula química es LiCl, es una sal formada por cloro y litio en proporción 1:1. Se comporta como un compuesto iónico típico (tiene características parecidas a la sal común), aunque el ion Li⁺ es muy pequeño. Es un compuesto inorgánico. Presenta una gran avidez por el agua, es decir posee una elevada higroscopicidad, por lo que es un muy buen secante.²¹

¹⁸**H.Z. HASSAN A.A. MOHAMAD.**A Review on Solar-Powered Closed Physisorption Cooling Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.2012, vol.16, pp. 2516–2538

¹⁹**MARTÍNEZ, Eduardo.** Diseño de una Instalación Solar Térmica con Aplicaciones para ACS y Calefacción en un Bloque de Viviendas Ubicado en Pontevedra, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Julio 2009.

²⁰**NORIEGA S., Carlos J.** Sistemas de Refrigeración por Adsorción Como una Alternativa Para el Uso de Calor Residual y Energía Solar, estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, UFSC - Universidad Federal de Santa Catarina Brasil.

²¹http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_litio; citado 01/05/2013

Amoniaco: El amoníaco es un gas incoloro de olor muy penetrante. Ocurre naturalmente y es también manufacturado. Se disuelve fácilmente en el agua y se evapora rápidamente. La mayor parte del amoníaco producido en plantas químicas es usado para fabricar abonos. El resto es usado en textiles, plásticos, explosivos, en la producción de pulpa y papel, alimentos y bebidas, productos de limpieza domésticos, refrigerantes y otros productos. También se usa en sales aromáticas.²²

Condensador: Un condensador es un intercambiador térmico, en el cual se pretende que el fluido que lo recorre cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor.²³

Evaporador: Los evaporadores son unos intercambiadores de calor en los que tiene lugar la evaporación del fluido frigorífico sustrayendo calor del espacio que se quiere enfriar. Están constituidos por un haz de tuberías en las que se evapora el refrigerante extrayendo calor de los alrededores, que es en esencia el fenómeno de producción de frío, o potencia frigorífica, que se desea conseguir.

El evaporador consiste en un recipiente metálico, (carcasa), al que llega el refrigerante parcialmente vaporizado, produciéndose en el mismo la ebullición de la parte licuada, a baja presión, lo que origina la extracción de calor del medio que le rodea, es decir, de la cámara frigorífica. Al final del proceso de vaporización de las últimas gotas de líquido, se produce vapor saturado seco.²⁴

Cinética química: La termodinámica permite saber si una reacción es espontánea o no según factores termodinámicos como entalpía, entropía y energía libre, pero no informa acerca de la rapidez con que se produce el cambio químico. La Cinética Química determinará si una reacción es lenta o rápida al estudiar los factores que determinan la velocidad y el mecanismo, es decir, la etapa o serie de etapas en las que ocurre el cambio.²⁵ La velocidad de reacción corresponderá a la rapidez con que tiene lugar una reacción; durante el cambio, la concentración de los reactantes disminuirá, mientras que la concentración de los productos aumentará. La velocidad media, entonces, se medirá a través del cambio de concentración en un periodo determinado de tiempo.¹⁸

Coefficiente de desempeño (COP): El coeficiente de operación (COP) corresponde a la medida del funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento de aire y de enfriamiento. Se define el COP como la relación entre la energía retirada de los alrededores (realizando el enfriamiento) y la entrada de energía.

²² División de Toxicología ToxFAQs Septiembre 2002;La dirección de ATSDR vía WWW es <http://www.atsdr.cdc.gov/es/>

²³<http://www.cicloaguavapor.com/index.php/condensador>, citado 04/06/13

²⁴**FERNÁNDEZ, Pedro.** Libros sobre Ingeniería Energética, <http://pfernandezdiez.es>, mayo 2013

²⁵<http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=133178> citado 03/05/2013

La energía que entra al sistema, puede hacerlo bajo la forma de trabajo o de calor e incluye la energía necesaria para impulsar todo el equipo auxiliar, tal como ventiladores, bombas, calentadores de respaldo, etc.²⁶

Potencia de refrigeración específica (PRE): representa la relación entre la potencia de refrigeración media (medida a lo largo de un ciclo de trabajo) y la masa de material adsorbente.²⁷

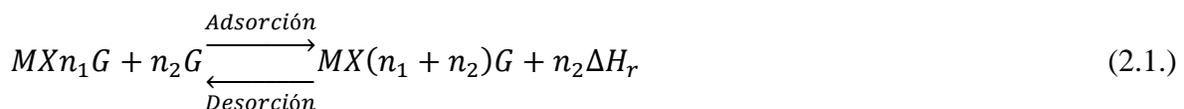
2.3. MARCO TEÓRICO

Para realizar la investigación y diseño del sistema de refrigeración, se toma como base teórica los fundamentos en fenómenos de transferencia de calor, tales como conducción, radiación y convección, que se encuentran involucrados directamente en la forma como el calor se transfiere, y que será utilizado como principal fuente de energía para producir efecto frigorífico.

Luego de establecer los parámetros de transferencia de calor involucrados en el diseño del sistema, se determinara las variables necesarias para determinar los parámetros de desempeño del mismo COP y PRE. Estos parámetros son calculados teniendo como referencia además del calor aprovechado por el sistema, el grado de avance de la reacción entre el adsorbente (LiCl) y el adsorbato NH₃, a continuación se muestran en detalle cada una de las teorías utilizadas en el diseño del sistema de refrigeración por adsorción química.

Adsorción química sólido-gas. El proceso de adsorción consiste en la adhesión de una molécula de un fluido (adsorbato) a una superficie sólida (adsorbente). La cantidad adsorbida depende de la temperatura o la presión del adsorbente químico.

La adsorción química tiene equilibrio monovariante. Manteniendo constante la presión, la cantidad de fluido adsorbido disminuye una cantidad igual al coeficiente estequiométrico n_2 en la ecuación 2.1, si la temperatura del adsorbente es mayor que la temperatura de equilibrio de la reacción.²⁸



Donde MX es la sal reactiva, que en este trabajo es de cloruro de litio (LiCl), G es el refrigerante, que para el presente trabajo es amoníaco (NH₃), n_1 es el número de moles del refrigerante adsorbido antes de la reacción de síntesis, n_2 es el número de moles de refrigerante adsorbido en la reacción de síntesis, y ΔH_r es la entalpia de la reacción.

²⁶**HOWELL, John R.** Principios de Termodinámica para Ingeniería, Department of Mechanical Engineering University of Texas at Austin.

²⁷**MEUNIER, F.** Solid Sorption Heat Powered Cycles for Cooling and Heat Pumping Applications. **Applied Thermal Engineering.** 1998, vol.18, pp. 715-729.

²⁸**OLIVEIRA, R.** Solar Powered Sorption Refrigeration and Air Conditioning, in Refrigeration: Theory, Technology and Applications. New York: **Nova Science Publishers.** 2011, pp. 205-238.

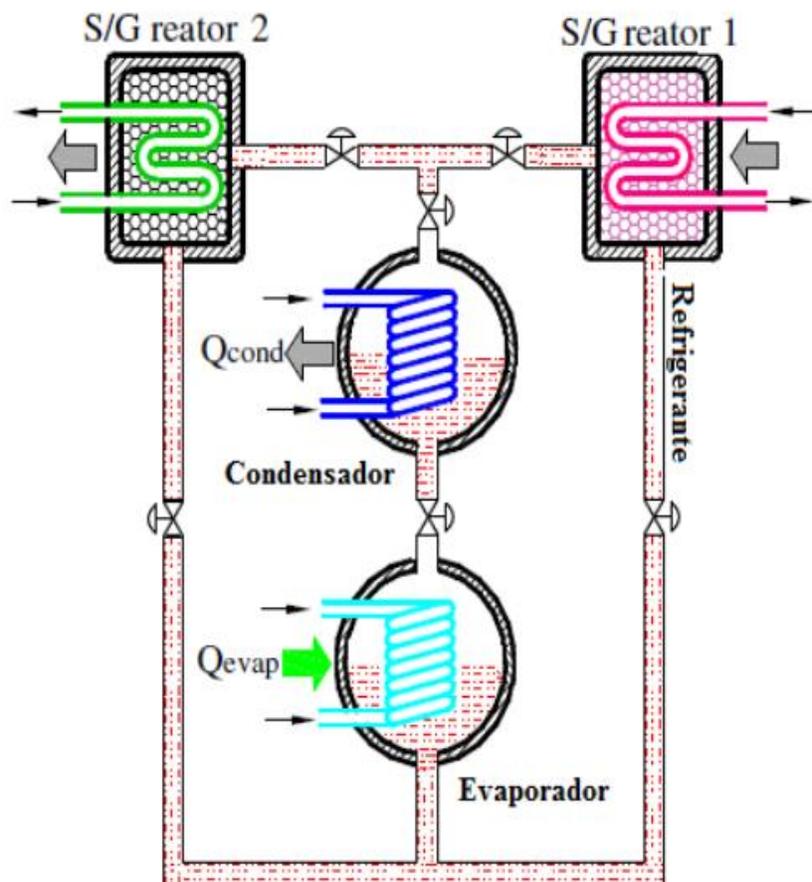
La tasa de adsorción y de desorción está relacionada, entre otros factores a la diferencia entre la temperatura o presión del adsorbente y la temperatura o presión de equilibrio.

Tanto la adsorción como la desorción pueden tardar varias horas o incluso no completarse, en el caso de que la diferencia entre la temperatura del adsorbente y la de equilibrio sea muy pequeña.²⁹

2.3.1. Ciclo de refrigeración por adsorción y sus componentes. El ciclo básico de adsorción para refrigeración o climatización no necesita ningún tipo de energía mecánica, pudiendo ocurrir apenas utilizando energía térmica.¹⁷

Un sistema de adsorción consiste en uno o varios reactores con lecho de adsorción, un condensador, un evaporador, y una fuente de calor que para este caso en la energía solar, conforme es ilustrado en la figura 2.1.³⁰

Figura 1. Refrigerador por adsorción con dos reactores.²⁸



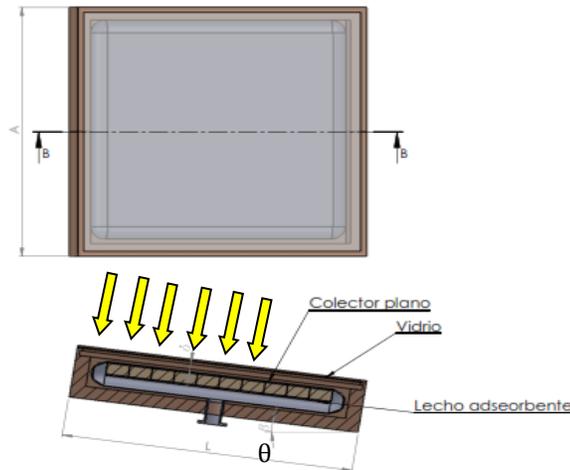
²⁹NORIEGA S, Carlos J. Modelagem e Simulação do Reator de um Sistema de Climatização por Adsorção Química. Florianópolis. Universidad federal de Santa Catarina. 2012.

³⁰LAMBERT, M. Design of Solar Powered Adsorption Heat Pump With Ice Storage. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 27, pp. 1612–1628.

2.3.2. Tipos de diseño del reactor.

Placa plana. El diseño del reactor es el de placa plana como se muestra en la figura 2, debido a las características del aprovechamiento de la radiación solar que brinda su diseño.

Figura 2. Reactor de lecho adsorbente.



Fuente: Autor del proyecto

Se determina la longitud característica del reactor L_c mediante:

$$L_c = \frac{A_s}{P} \therefore \begin{cases} A_s: L * A \\ P: 2 * (L + A) \end{cases} \quad (2.2.)$$

Luego se determina la temperatura del fluido convector T_f :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.3.)$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie.³⁰

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2.4.)$$

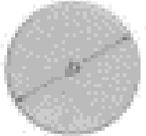
Siendo β el coeficiente de expansión volumétrica ($\beta = 1/T$), donde T es la temperatura del fluido convector T_f .³⁰

$$R_a = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (2.5.)$$

Donde R_a es el número de Rayleigh, y se determinan con base a la tabla 1.³¹

³¹ CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor. s.l.: McGraw Hill. 2004. 2.

Tabla 1. Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.³⁰

Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies			
Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
<p>Placa vertical</p> 	L	$10^2 - 10^3$ $10^3 - 10^{11}$	$Nu = 0.59Ra^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right]^2$ (9-21) (Compleja pero más exacta)
<p>Placa inclinada</p> 	L		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente. Reemplácese g por $g \cos \theta$ para $Ra < 10^9$
<p>Placa horizontal</p> <p>(Área superficial A_s y perímetro p)</p> <p>a) Superficie superior de una placa caliente o superficie inferior de una placa fría</p>  <p>b) Superficie inferior de una placa caliente o superficie superior de una placa fría</p> 	A_s/p	$10^2 - 10^3$ $10^3 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra^{1/3}$ (9-23) $Nu = 0.27Ra^{1/4}$ (9-24)
<p>Cilindro vertical</p> 	L		Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando: $D > \frac{35L}{Ra^{1/4}}$
<p>Cilindro horizontal</p> 	D	$Ra_D > 10^2$	$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right]^2$ (9-25)
<p>Esfera</p> 	D	$Ra_D > 10^2$ ($Pr > 0.7$)	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{1/4}]^{1/4}}$ (9-26)

$$h = \frac{k}{L_c} N_u \quad (2.6.)$$

La determinación del flujo de calor por convección, radiación y flujo de calor total se encuentra mediante las ecuaciones:

$$\dot{Q}_{Conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.7.)$$

$$\dot{Q}_{Rad} = \varepsilon A_s \sigma (T_{Alrededores}^4 - T_s^4) \quad (2.8.)$$

Donde ε es la masividad de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{Perdido} = \dot{Q}_{Conv} + \dot{Q}_{Rad} \quad (2.9.)$$

El flujo de calor incidente por radiación es:

$$\dot{Q}_{Incid} = \alpha \dot{q} A_s \quad (2.10.)$$

Siendo α la absorptividad de la superficie de vidrio, \dot{q} es la radiación solar y A_s es el área de la superficie de vidrio.

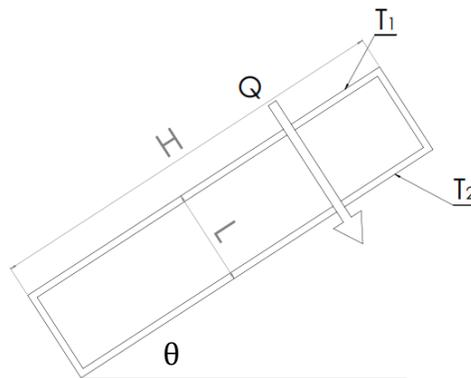
Para encontrar el calor total que entra al colector se determina mediante:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Incid} - \dot{Q}_{Perdido} \quad (2.11.)$$

Convección natural dentro de recintos cerrados rectangulares inclinados. Los espacios de aire entre placas paralelas inclinadas se encuentran por lo general en los colectores solares de placa plana.

La transferencia de calor a través de un recinto cerrado inclinado depende de la proporción dimensional, H/L así como del Angulo de inclinación θ con respecto a la horizontal. Figura 2.3.

Figura 3. Recinto cerrado rectangular inclinado.



Fuente: Autor del Proyecto

Para proporciones dimensionales grandes ($H/L \geq 12$), esta ecuación correlaciona extremadamente bien los datos experimentales para ángulos de inclinación hasta de 70° .³⁰

$$N_u = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta} \right]^+ \left(1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{R_a \cos \theta} \right) + \left[\frac{(R_a \cos \theta)^{1/3}}{18} - 1 \right]^+ \quad (2.12.)$$

Para $R_a < 10^5$, $0 < \theta < 70^\circ$, y $H/L \geq 12$. Una vez más cualquier cantidad en $[]^+$ debe de igualarse a cero si es negativa. Esto para garantizar que $N_u = 1$ para $R_a \cos \theta < 1708$.³⁰

Conductividad térmica efectiva. Cuando se conoce el número de Nusselt la razón de la transferencia de calos a través del recinto cerrado se puede determinar por medio de:

$$Q_{\text{Total}} = hA_s(T_1 - T_2) = kN_u A_s \frac{T_1 - T_2}{L_c} \quad (2.13.)$$

Colectores lineales Fresnel. Los reflectores lineales tipo Fresnel (LFRs) asemejan su forma y posición a la de una parábola, se podría decir que es un colector parabólico partido en diferentes trozos. Para ello, se utilizan largas filas de espejos planos ligeramente curvados que reflejan la radiación en un receptor lineal colocado a una cierta altura sobre los espejos.

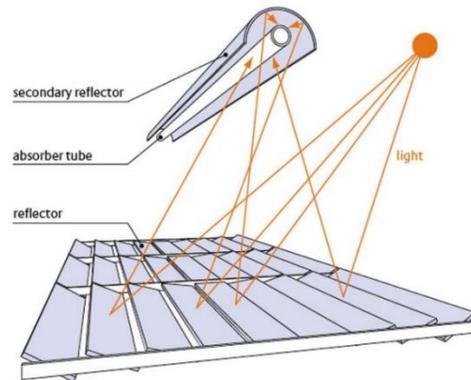
Por el interior de este receptor circula el fluido destinado al transporte del calor procedente del sol, un diseño más reciente y compacto (CLFRs) desarrollado por la universidad de Sydney usa dos receptores paralelos por cada línea de espejos, los espejos se colocan más juntos para que puedan reflejar a ambos receptores, de esta forma, la extensión de terreno necesaria y diversos costos se reducen para una potencia dada.

Una de las principales ventajas es su simplicidad en cuanto al diseño que requiere menores costos de inversión y facilita la generación directa de vapor (DSG), eliminando los costos de cualquier fluido de transferencia e intercambiadores de calor. El uso de espejos planos o ligeramente curvados también reduce el costo de los reflectores tipo Fresnel.

Hay que añadir el hecho de que los espejos están montados prácticamente sobre el suelo, lo que influye positivamente en el precio de la instalación. Sin embargo, los reflectores lineales son menos eficientes y existen mayores dificultades para integrar un sistema de almacenamiento.³²

³²**SERRANO G, Daniel.** Cálculo, diseño y análisis de Una central termosolar de Colectores cilíndrico Parabólicos operando conSales fundidas. Leganés. Universidad Carlos III. 2012.

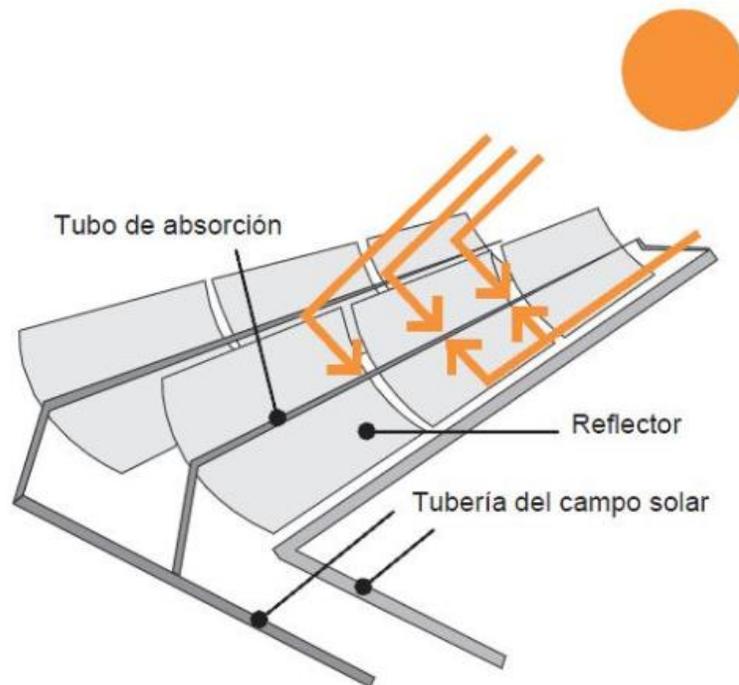
Figura 4. Colectores lineales Fresnel.³¹



Colector Cilíndrico Parabólico. Existen muchos campos solares que utilizan esta tecnología como medio de generación de energía térmica y eléctrica, ejemplos de ellos son la Plataforma Solar de Almería Andasol 1 y Andasol 2. Es por ello que esta tecnología está muy avanzada, la información y exactitud es amplia y detallada.

Los colectores cilíndricos parabólicos son captadores concentradores solares de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 400°C en casos muy favorables. Por tanto, están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura.³²

Figura 5. Colectores Parabólicos.³³



³³ PAREDES V, Carmen. Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay. Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Paraguay. 2012.

El diseño de la parábola se rige mediante las siguientes ecuaciones.

$$y^2 = 4fx \quad (2.14.)$$

Donde f es la distancia focal de la figura 2.6. Llevando esa expresión a coordenadas polares, se tiene que.

$$\rho = \frac{f}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (2.15.)$$

De acuerdo a la figura 2.6. Se pueden llegar a la siguiente relación

$$h = 2f \left[\tan \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (2.16.)$$

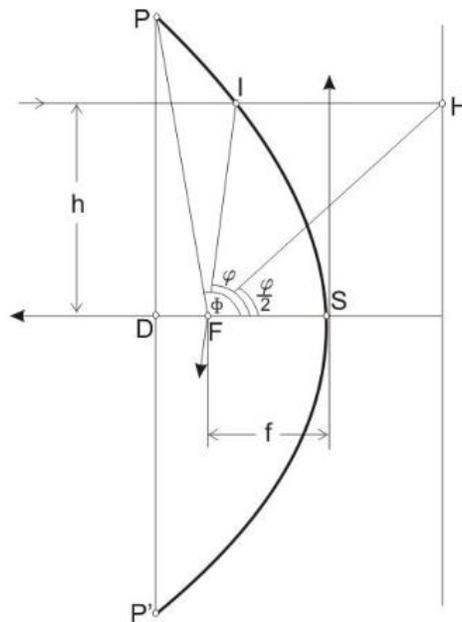
Recordando que el diferencial de longitud de arco de una parábola está dado por.

$$ds^2 = d\rho^2 + \rho^2 d\varphi^2 \quad (2.17.)$$

Suponiendo que la parábola tenga una profundidad L , entonces el área total de la parábola es.

$$A_{\Phi} = 2Lf \left[\frac{\sin \left(\frac{\Phi}{2} \right)}{\cos^2 \left(\frac{\Phi}{2} \right)} + \ln \left| \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{4} \right) \right| \right] \quad (2.18.)$$

Figura 6. Parábola.³⁵



³⁵ PEINADO A, Anthony. Análisis teórico-experimental del colector solar cilíndrico parabólico automatizado con espejos reflectantes. Universidad Privada del Norte sede Trujillo. 2012.

Resulta necesario definir el área total de la abertura de la parábola, la cual será importante porque la radiación solar se define sobre un área perpendicular al rayo solar (a donde llegará), que para este caso será el área de la abertura.

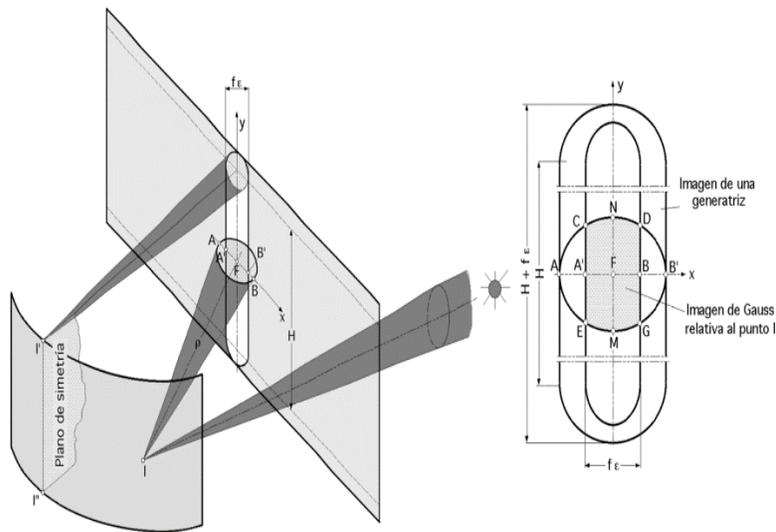
$$A_a = 4Lf \left[\tan \left(\frac{\Phi}{2} \right) \right] \quad (2.19.)$$

Tomando en cuenta que el diámetro del sol es de $1,4 \times 10^6$ m y la distancia entre el sol y la tierra es de $1,5 \times 10^8$ m, tenemos que el ángulo de abertura de los rayos solares que llegan a la tierra es de 32 minutos, a esta abertura se le denomina ξ , por lo tanto, dentro del análisis es necesario asumir que el rayo que llega sobre un punto en la superficie reflectora no es solo una línea, sino que es considerada como un conjunto de rayos que se concentran sobre un punto en el colector.

Si se considera un haz de rayos luminosos de abertura ε incidente en el punto I de la parábola, el haz reflejado corta al plano normal en el eje de la parábola básica que define el perfil del cilindro, según el eje mayor AB. Como aproximación se puede asumir que el foco F de la parábola que pasa por el punto I es el centro de la elipse utilizando el análisis de la elipse de Gauss que se forma sobre el plano normal al plano de simetría para determinar los factores de concentración de este tipo de colectores, pero si asumimos que el tubo receptor es cilíndrico y su centro se encuentra justo en el foco, entonces el cálculo se reduce a determinar el diámetro mínimo que debería tener el tubo receptor, para ello, de la figura 2.6, se extrae que el radio mínimo para que todos los rayos solares sean aprovechados por el receptor es:³³

$$r_{min} = \frac{f\xi}{\cos^2 \left(\frac{\Phi}{2} \right)} \quad (2.20.)$$

Figura 7. Cálculo de la concentración producida por el concentrador cilíndrico parabólico³⁷



³⁷ **FERNÁNDEZ, Pedro.** Colectores de concentración de media temperatura. <http://pfernandezdiez.es/>.2012.

2.4. MARCO LEGAL

2.4.1. Constitución Colombiana. Se tomaron como base los siguientes artículos para la elaboración del proyecto.

Artículo 65. La producción de alimentos gozará de la especial protección del estado. Para tal efecto, se otorgará prioridad al desarrollo integral de las actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales y agroindustriales, así como también a la construcción de obras de infraestructura física y adecuación de tierras.

De igual manera, el Estado promoverá la investigación y la transferencia de tecnología para la producción de alimentos y materias primas de origen agropecuario, con el propósito de incrementar la productividad.

Artículo 74. Todas las personas tienen derecho a acceder a los documentos públicos salvo los casos que establezca la ley.

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.

Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

Como una respuesta al problemática ambiental de los sectores productivos colombianos, el gobierno nacional, a través del ministerio del medio ambiente, ha definido dentro de sus políticas ambientales fundamentales incentivar “la prevención de la contaminación” en su origen, en lugar de tratarla una vez generada.

Resolución 909: ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

2.4.2. Contaminación ambiental. Para efectos de contaminación ambiental se tuvo en cuenta el siguiente artículo.

Artículo 155. Para obtener en los establecimientos de trabajo un medio ambiente que no perjudique la salud de los trabajadores, por los riesgos químicos a que están expuestos, se deberán adoptar todas las medidas necesarias para controlar en forma efectiva los agentes nocivos preferentemente en su origen, pudiéndose aplicar uno o varios de los siguientes métodos: sustitución de sustancias, cambio o modificación del proceso, encerramiento o aislamiento de procesos, ventilación general, ventilación local exhaustiva y mantenimiento. Otros métodos complementarios, tales como limitación del tiempo de exposición y protección personal; solo se aplicarán cuando los anteriormente citados sean insuficientes por sí mismos o en combinación.

2.4.3. Universidad Francisco de Paula Santander. Teniendo en cuenta los estatutos de la universidad.

ACUERDO 065 DE 1996. El cual establece el estatuto estudiantil que es el regente actual en la institución.

ARTICULO 140. El estudiante podrá optar por una de las siguientes modalidades del trabajo de grado:

a. Proyecto de Investigación.

Monografía.

Trabajo de Investigación: Generación o aplicación de conocimientos.

Sistematización del conocimiento.

b. Proyecto de Extensión.

Trabajo social.

Labor de consultoría en aquellos proyectos en los cuales participe la Universidad.

Pasantía.

Trabajo dirigido.

PARÁGRAFO 1. El estudiante podrá optar como componente alterna al proyecto de grado, créditos especiales como cursos de profundización académica o exámenes preparatorios.

PARÁGRAFO 2. Para algunos Planes de Estudio y de acuerdo a sus características el Consejo Académico podrá obviar la presentación del trabajo de grado.

ARTICULO 141. El proyecto de grado incluye las siguientes etapas:

a. Presentación del anteproyecto o plan de trabajo según corresponda a la modalidad del proyecto seleccionado.

b. Desarrollo de la investigación o ejecución física del proyecto.

c. Sustentación de la investigación y/o verificación o aval de la realización del proyecto.

PARÁGRAFO. Para todas las modalidades de proyecto de grado, el estudiante deberá presentar un informe final avalado por su director.

ARTICULO 142. Las condiciones y procedimientos para la presentación, desarrollo y evaluación de cada una de las modalidades de trabajo de grado, o sus componentes alternas, harán parte de la reglamentación específica de cada facultad, para cada plan de estudios.

PARÁGRAFO. La Universidad incorporará los trabajos de grado, como componente básico de su hacer y creará bancos de proyectos en los Departamentos Académicos y en la Vicerrectoría Asistente de Investigación y Extensión.

3. DISEÑO METODOLÓGICO.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

Para el desarrollo del proyecto se hizo uso de la Investigación aplicada.

Este tipo de investigación también recibe el nombre de práctica o empírica. Se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren. La investigación aplicada se encuentra estrechamente vinculada con la investigación básica, ya que depende de sus descubrimientos y aportes teóricos.³⁹

Busca confrontar la teoría con la realidad y en el caso de esta investigación donde se busca desarrollar experimentalmente el diseño del prototipo.

Esto queda aclarado al percibir que toda investigación aplicada requiere de un marco teórico. Sin embargo, en una investigación aplicada, lo que le interesa al investigador, primordialmente, son las consecuencias prácticas.

La investigación aplicada persigue fines más directos e inmediatos. Tal es el caso de cualquier estudio que se proponga evaluar los recursos humanos o naturales con que cuenta una región para lograr su mejor aprovechamiento, o las investigaciones encaminadas a conocer las causas que provocan una enfermedad, con el fin de proteger la salud⁴⁰

3.2. POBLACIÓN.

En esta investigación la población objeto del estudio fue el colector de placa plana diseñado para producir efecto frigorífico con el fin de obtener información suministrada por el mismo el cual permita determinar sus parámetros de desempeño.

3.3 MUESTRA.

Se recopilarán datos arrojados por el prototipo que serán utilizados para observar el comportamiento del mismo en condiciones de temperatura y presión variables regidas según las condiciones climáticas en que se lleven a cabo las mediciones ambientales incidentes en el sistema.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

La información se recopiló mediante instrumentos de medición de temperatura, presión, masa y volumen que posteriormente serán emitidos en un software de adquisición, monitoreo y almacenamiento de datos.

³⁹ANDER E, Ezequiel. Técnicas de investigación social. Editorial LUMEN. Buenos Aires. 1995.

⁴⁰SABINO, Carlos A. El proceso de la investigación. Editorial LUMEN/ HVMANITAS. . Buenos Aires. 1996.

3.4.1. Análisis de la información. La información suministrada por los equipos de adquisición de datos fue empleada para determinar los parámetros de desempeño del sistema, utilizando las respectivas ecuaciones propuestas para tal fin.

3.4.2. Actividades en la elaboración del proyecto.

3.4.3. Etapas del proyecto. El proyecto se realizara en 4 etapas, que se dividen en fases las cuales se utilizan para cumplir con los objetivos propuestos.

Etapa I. Determinar los parámetros de diseño para la construcción del colector solar de placa plana para refrigeración por adsorción química el cual será usado para producir efecto frigorífico. Para desarrollar esta etapa se contemplan las siguientes fases; Fase I, Fase II y la Fase III.

Fase I. Revisión bibliográfica relacionada con sistemas de refrigeración por adsorción química. En esta primera fase se recopilara y estudiara la información necesaria acerca de estudios relacionados con la refrigeración por adsorción.

Fase II. Recolección y análisis de la información preliminar. En esta fase se delimitara la información recopilada, aplicando los conceptos y teorías necesarias para el desarrollo del colector.

Fase III. Cálculo y selección de equipos y materiales. Con los conocimientos adquiridos en las asignaturas de resistencia de materiales, cálculo de elementos de máquinas, transferencia de calor, termodinámica, con el apoyo de asesorías y cursos proporcionados por TecnoParque Colombia nodo Ocaña, en el área de diseño y automatización, se procederá a realizar los cálculos de este diseño, selección de materiales, dispositivos de medición y recepción de temperatura, presión, volumen, masa, para determinar los elementos constructivos del prototipo.

Etapa II. Construcción y puesta en marcha del prototipo.

Fase IV. Cotización de las materias primas. Se cotizaran todos los materiales estructurales, dispositivos de medición a utilizar y los procesos de manufactura requeridos para la construcción del prototipo.

Fase V. Construcción y ensamblaje de los elementos constructivos del prototipo. Luego de tener el diseño, los cálculos y los materiales, se procede con el montaje de cada uno de los elementos del colector.

Fase VI. Ensayos. Al tener las piezas constructivas se procederá a realizar pruebas de análisis hidrostáticos, de soldadura para garantizar la fiabilidad del prototipo.

Etapa III. Recolección de datos arrojados por el colector.

Fase VII. Mediante instrumentos de medición y adquisición, se obtendrán datos necesarios para determinar los parámetros de desempeño del sistema.

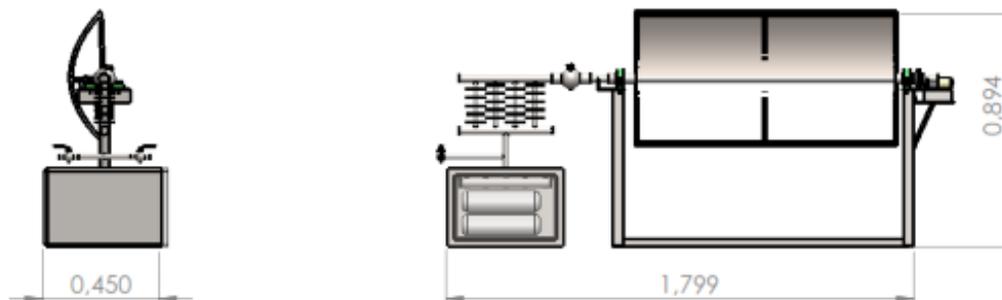
4. PROTOTIPO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN QUÍMICA A PARTIR DEL USO DE ENERGÍA SOLAR.

4.1. PIEZAS CONSTRUCTIVAS DEL MODELO.

4.1.1. Dimensiones del modelo. Teniendo en cuenta que la cantidad de adsorbente para producir efecto frigorífico es una limitante por su valor comercial en el mercado Colombiano, se optó por dimensionar el prototipo de tal manera que este no exceda una cantidad mayor a los 1000 gr de adsorbente a ser colocados en el foco del adsorverdor parabólico. En la figura 8, se muestran algunas medidas del prototipo de sistema de refrigeración. El anexo E, se muestra los planos de la máquina.

Dando como resultado un prototipo de dimensiones aproximadas en la máxima abertura del espejo, alto 0.9m, ancho 1.8m, profundidad 0.5m, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Dimensiones generales del prototipo.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.2. Parábola reflectante. La parábola reflectante se diseñó considerando que su vértice está en el origen mediante la ecuación de la parábola de vértice en el origen teniendo como referencia de eje al eje y , con foco (P) igual a $-\frac{25}{2} > 0$, lo que hace que la parábola habrá hacia arriba. El foco se encuentra en $F = \left(0, \frac{25}{2}\right)$, y la ecuación de la directriz es $y = -\frac{25}{2}$, como $x^2 = 4Py$ entonces $x^2 = 50y$. Los dos puntos que cortan la parábola por el foco son $\left(-25, \frac{25}{2}\right), \left(25, \frac{25}{2}\right)$, formando el lado recto de la parábola $Ld = 4P$ donde $Ld = 50$.⁴¹ Lo que da como resultado una parábola de dimensiones, ancho 0.5m, largo 1m, profundidad 0.125m, en acero inoxidable el cual es el material ideal para producir el fenómeno de reflexión en la parábola.

⁴¹LEITHOLD. Louis, El Cálculo, Oxford University Press, E.E.U.U. 1998.

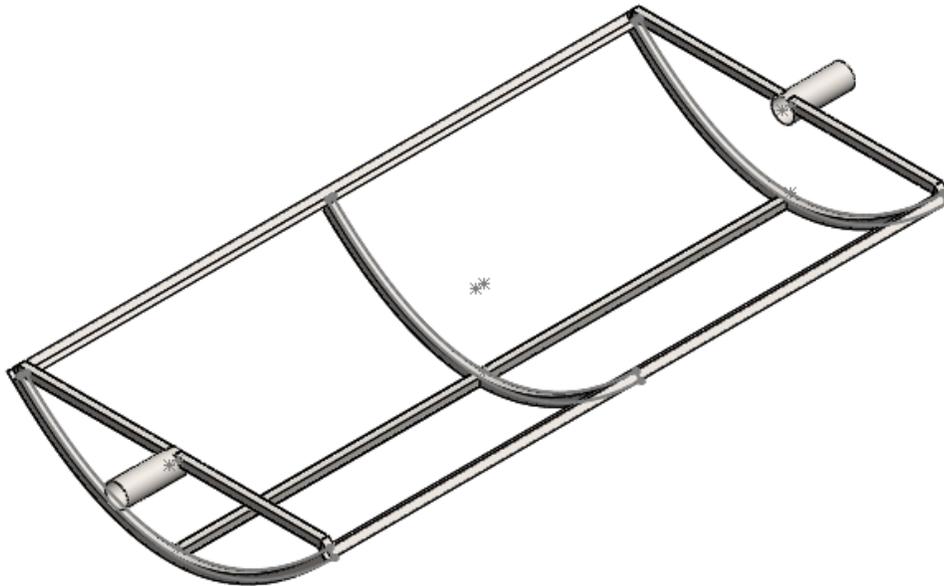
Foto 1. Parábola del prototipo.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.3. Estructura soporte de la parábola reflectante. A fin de reducir el peso del prototipo, la estructura se diseñó a partir de tubería cuadrada de 1/2 x 1/2 pulgadas calibre 16 para disminuir el peso del prototipo.

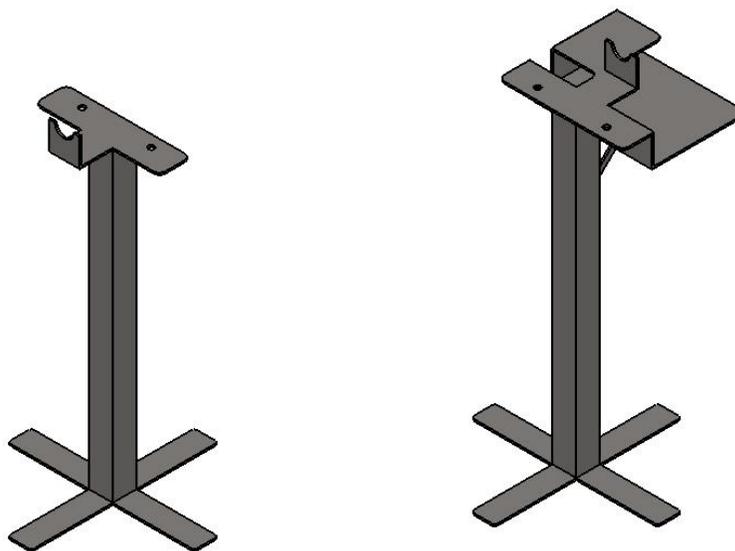
Figura 9. Estructura soporte de la parábola reflectante.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.4. Columnas para el soporte de la estructura. Al seleccionar columnas para soportar la estructura completa se garantiza su estabilidad de tal forma que las cargas internas y externas no afecten el funcionamiento del prototipo, estas columnas se seleccionan mediante SolidWorks Simulation, ya que por sus características especiales no se pudo usar teoría de columnas de Euler lo que da paso a la selección de las mismas mediante simulación numérica.

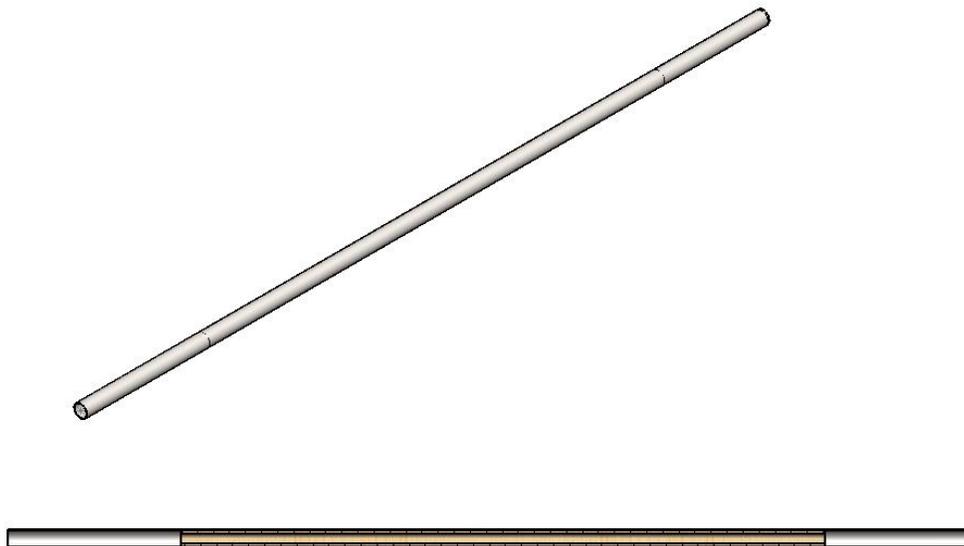
Figura 10. Columnas para el soporte de la estructura.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.5. Reactor para el adsorbente. Ya que el adsorbente utilizado para producir la adsorción y desorción del refrigerante es una sal y por tanto es corrosiva se selecciona un tubo en acero inoxidable, que además de soportar el ataque corrosivo de la sal también soporte altas presiones consecuencia del refrigerante utilizado.

Figura 11. Tubo reactor donde se almacena el adsorbente.

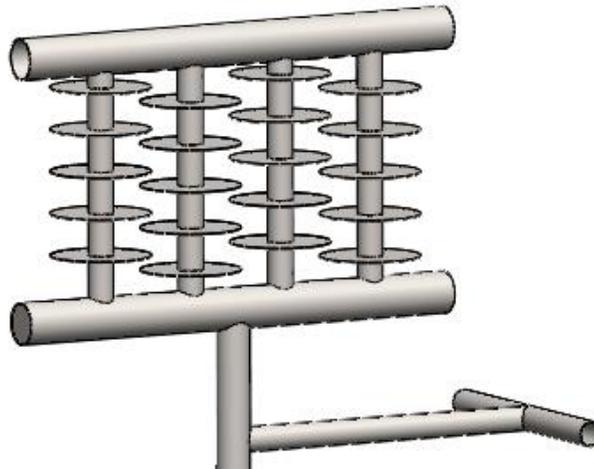


Fuente: Autor del Proyecto.

4.1.6. Condensador. Se diseñó un intercambiador de calor de aletas para el condensador inmerso en agua ya que la convección presente en el modelo es natural y este tipo de

intercambiador de calor es el ideal para conseguir la mayor cantidad de energía del ambiente en el cual se encuentra el prototipo

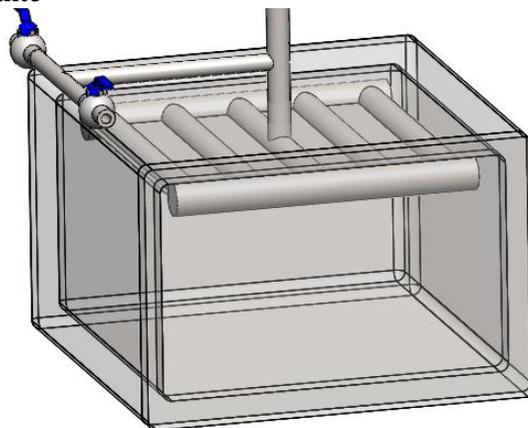
Figura 12. Evaporador.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.7. Caja refrigerante. La caja refrigerante consta de un conjunto de tuberías para almacenar el refrigerante condensado en el cual se registra la mayor concentración de frío, para producir el congelamiento o refrigeración y Este diseño facilita que el fluido refrigerante tenga una mayor área de transferencia de calor y por tanto garantizar que este retire la mayor cantidad de calor del fluido en enfriar.

Figura 13. Caja refrigerante



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.8. Válvula de pulgada. Se seleccionó una válvula de bola de cierre mecánico para efectos de manejo al momento de realizar las cargas de adsorbente y refrigerante ya que es posible controlar las diferentes secciones del prototipo con ella, lo que permite mayor manejo de cada uno de los procesos de vacío y carga de refrigerante.

Foto 2. Válvula de acero inoxidable.



Fuente: Autor del proyecto.

4.1.9. Efectos del viento sobre la estructura. Mediante el reglamento colombiano de construcción sismo resistente “NSR-10” no se tienen en cuenta los efectos del viento sobre el tipo de estructura que se está diseñando ya que su altura es despreciable para esta norma.⁴²

4.2. CÁLCULOS DEL PROTOTIPO.

4.2.1. Análisis estructural.

4.2.1.1. Diseño del tubo sometido a presiones internas. El tubo seleccionado fue un tubo de acero inoxidable de 1 pulgada de diámetro del catálogo Tuberías, Dimensiones y Pesos ASTM Ver Anexo A. el cual especifica que el diámetro externo de la tubería es $\phi_{ext} = 1.315in = 33.4mm$ y su espesor de pared es $t = 0.065in(1.65mm)$. Acero AISI 308 cuyo valor del Módulo de elasticidad del material es $S = 29000kpsi$.⁴³ Según las formulas expresadas en el catálogo de Diseño de recipientes sometidos a presión, las cuales son expresadas en función de las dimensiones interiores para el caso de casco cilíndrico para determinar la presión máxima de trabajo.

$$P = \frac{SEt}{R+0.6t} \quad (4.1.)$$

⁴²Presidencia de la Republica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente “NSR-10”. Bogotá. 2010.

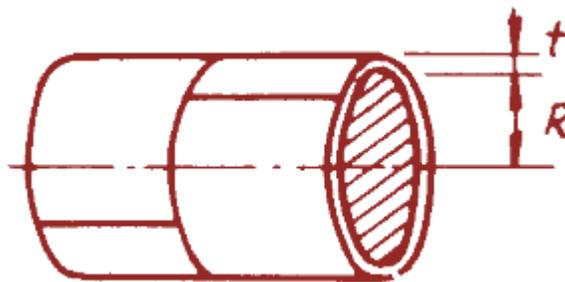
⁴³MEGYESY. Eugene F, Manual de Recipientes a Presión Diseño y Calculo, Grupo Noriega Editores, México, 1992.

Tabla 2. Propiedades geométricas y mecánicas de la tubería.

P =	Presión de diseño o presión de trabajo máxima permitida, $lb/pulg^2$	
S =	Valor del esfuerzo del material, $lb/pulg^2$	29000kpsi
E =	Eficiencia de la junta.	1.0
R =	Radio interno pulg.	0.5925pulg
t =	Espesor de pared pulg.	0.065pulg.

Fuente: Autor del proyecto.

Figura 14. Sección de tubo con costura longitudinal.⁴⁰



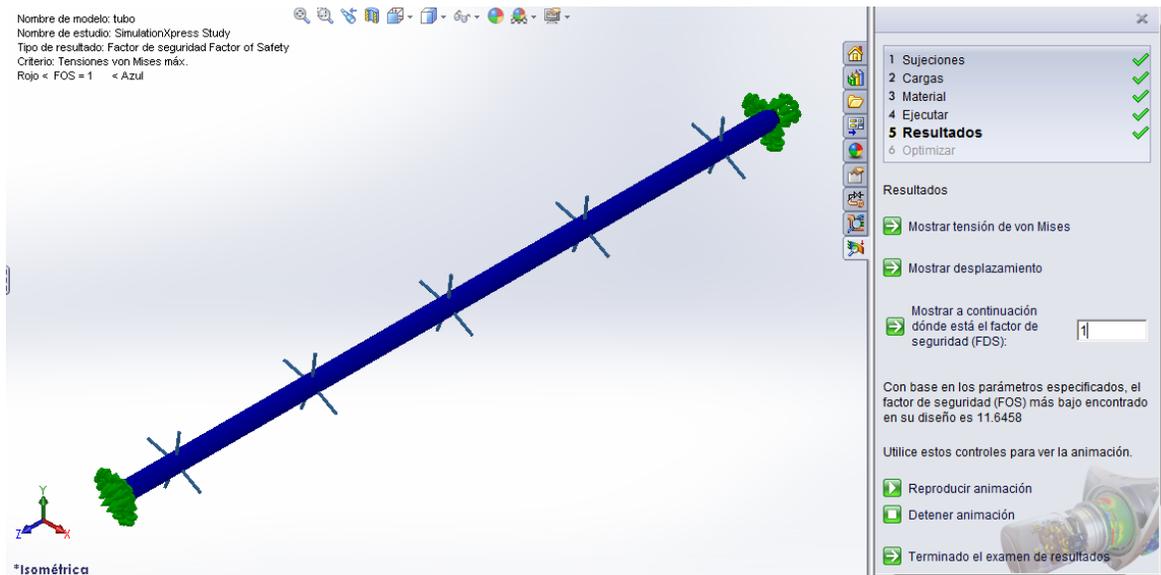
$$P = \frac{(29000kpsi)(1)(0.065pulg)}{(0.5925pulg)+(0.6)(0.065pulg)} = 2968.5Psi.$$

Ya que el prototipo puede presentar presiones máximas de desorción alrededor de 250 psi, presión que alcanza el refrigerante al ser desorvido del par adsorbente lo que da como resultado que la tubería seleccionada para el reactor de adsorción cumple con la resistencia para soportar la presión de trabajo.

Presión máxima de trabajo $P = 2968.5psi$.

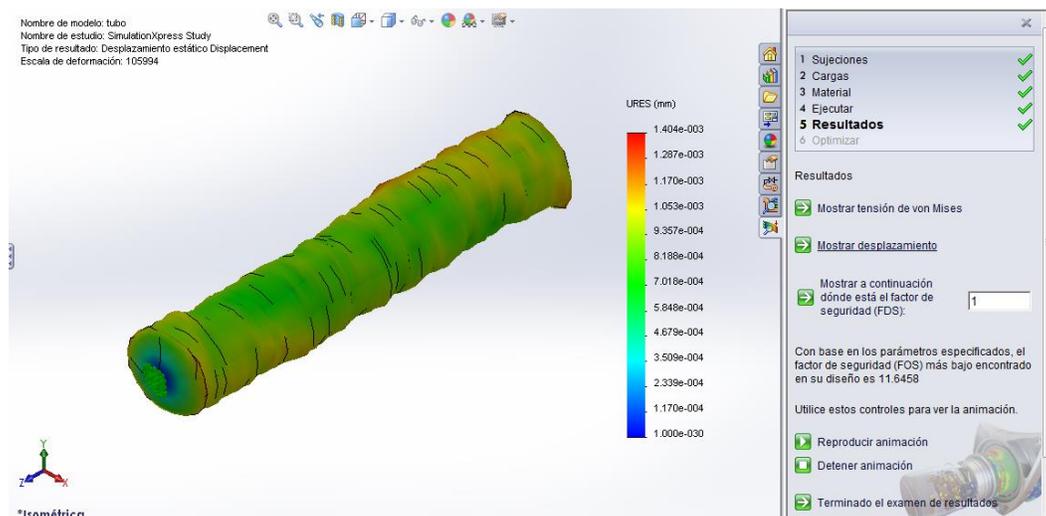
4.2.1.2. Análisis en Solid Works simulation de la tubería. Para comparar los resultados presentes en los cálculos de diseño de la tubería, esta se sometió a un análisis por elementos finitos mediante SolidWorks el cual presento los siguientes resultados.

Figura 15. Factor de seguridad máximo.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 16. Desplazamiento máximo.



Fuente: Autor del proyecto.

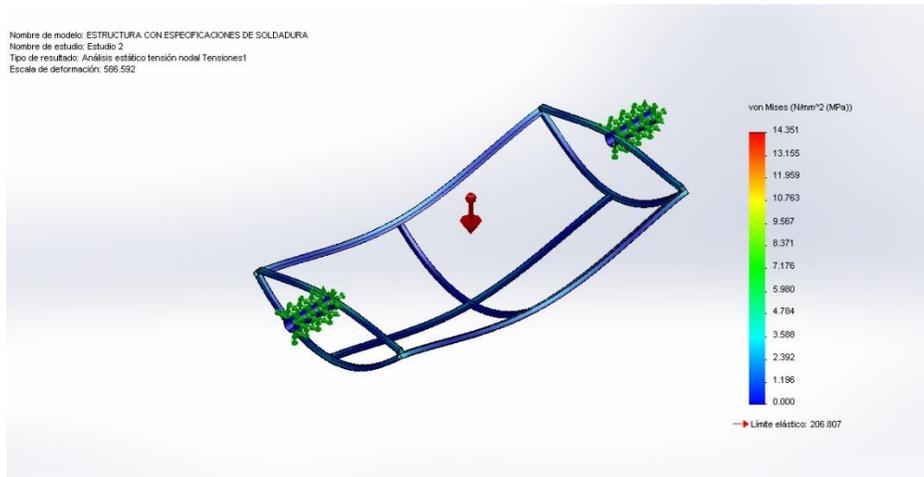
Según los resultados obtenidos se aprecia que al tener un factor de seguridad mayor a 10 y unos desplazamientos máximos de $1.404 \times 10^{-3} \text{ mm}$ en la simulación numérica, se demuestra que la tubería comercial seleccionada soporta las cargas que se pueden presentar en el prototipo.

4.2.1.3. Diseño de la estructura que soporta la parábola reflectante. Siendo la estructura de soporte un elemento con geometría compleja se diseña mediante simulación numérica para facilitar el cálculo de las deformaciones presentes en el prototipo que son ocasionadas

por el propio peso de la estructura ya que no se encuentran cargas externas en la estructura que ocasionen deformaciones.

Lo que permite realizar un estudio de diseño estático en SolidWorks cuyos resultados son mostrados a continuación, se concluye que las deformaciones unitarias del mismo son mínimas y por tanto son despreciables al momento del diseño mecánico.

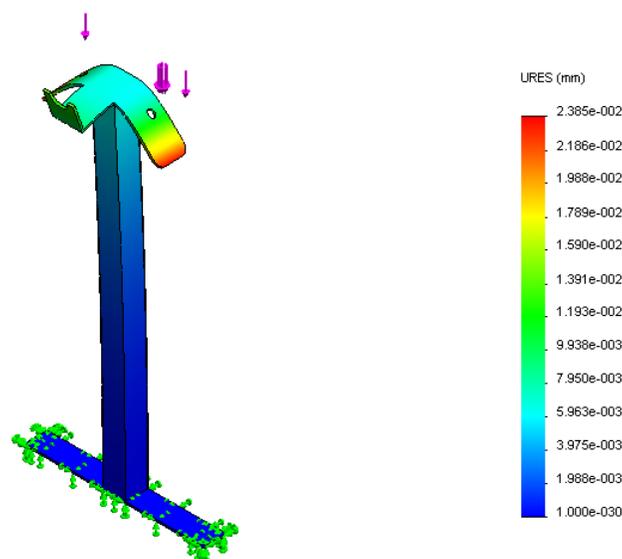
Figura 17. Esfuerzo de von Mises.



Fuente: Autor del proyecto.

4.2.1.4. Diseño de las columnas soporte de la parábola. Las columnas son el elemento que soporta mayor carga, pues además de soportar su propio peso, soportan el peso propio de los componentes de la estructura que se transmiten a los rodamientos que permiten el movimiento libre del soporte de la parábola.

Figura 18. Análisis de desplazamientos en la columna.



Fuente: Autor del proyecto.

Al observar que con un peso de 2.7kg de la estructura los desplazamientos en la estructura de la columna son de 2.385×10^{-2} mm se toma como material acero inoxidable AISI 308 que es óptimo para evitar las deformaciones en este componente del prototipo.

4.2.2. Análisis térmico.

4.2.2.1. Datos meteorológicos y ambientales. Los datos necesarios para el análisis de las condiciones meteorológicas se toman de datos históricos estadísticos suministrados por el IDEAM para conocer las condiciones de radiación solar y las características del ambiente. También es necesario conocer la temperatura equivalente de radiación del ambiente para obtener la resistencia térmica de radiación entre el tubo receptor y el ambiente.

Condiciones promedio de entrada de datos para el cálculo de la temperatura final en el lecho adsorbente se muestran a continuación en el mapa de radiación térmica promedio anual para Colombia.

Figura 19. Mapa de radiación solar en Colombia promedio anual.⁴⁴

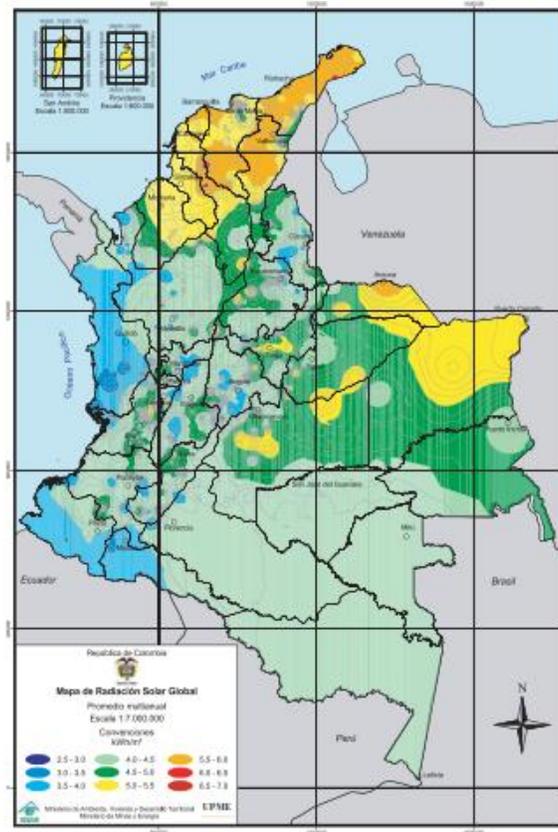


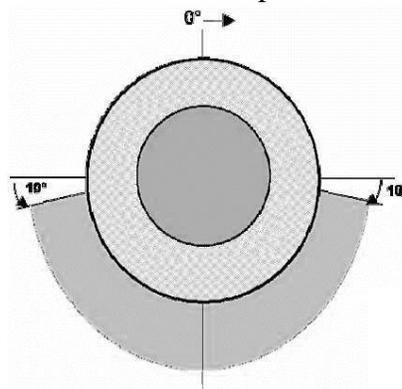
Tabla 3. Condiciones ambientales del medio donde se va a implementar la máquina.

T_{Amb}	Temperatura ambiente	26°C (299°K)
T_{Sup}	Temperatura de la superficie del tubo tomado de las pruebas de temperatura del foco	135°C(408°K)
$\frac{T_{Sup} + T_{Amb}}{2}$	Temperatura promedio	$\frac{26^{\circ}C+135^{\circ}C}{2} = 80.5^{\circ}C,$ $\frac{299^{\circ}K+408^{\circ}K}{2} = 353.5^{\circ}K$
ϵ	Emisividad del acero inoxidable ³⁰	0.3
D	Diámetro del tubo	$31.75 \times 10^{-3} m$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$
L	Longitud del tubo	1.2m
k	Constante de conductividad del acero	$14.9 W/m * K$
A_S	Área superficial	$\pi DL = \pi * 31.75 \times 10^{-3} m * 1.2 m = 0.1197 m^2$
α	Difusividad térmica	$3.95 \times 10^6 m^2/s$
ϑ	viscosidad cinemática	$2.102 \times 10^{-6} m^2/s$
β	coeficiente de expansión térmica	$\frac{1}{80.5^{\circ}C}, \frac{1}{353.5^{\circ}K}$

Fuente : Autor del proyecto.

4.2.2.2. Cálculo de pérdidas térmicas. En la realidad, la radiación concentrada sólo lo hace a lo largo del perímetro del tubo más próximo al colector, un arco de aproximadamente 160°, por lo que presenta una distribución no-simétrica del calor, como se muestra en la Figura 4.14.

Figura 20. Concentración de la radiación sobre el perímetro del tubo del lecho adsorvente.⁴⁶



⁴⁶BALADO L. Emilio, Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, MADRID 2011.

La transferencia de calor por radiación se calcula mediante.

$$q'_{Rad} = \varepsilon\sigma\pi D(T_{Sup}^4 - T_{Amb}^4) \quad (4.2.)$$

$$q'_{Rad} = 0.3 * 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 * \pi * 31.75 \times 10^{-3} \text{ m} (408^\circ\text{K}^4 - 299^\circ\text{K}^4)$$

$$q'_{Rad} = 33.46 \text{ W/m}$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ε es la emisividad del tubo, D es el diámetro del tubo, T_{Sup} es la temperatura de la superficie del tubo y T_{Amb} la temperatura ambiente, ambas en grados Kelvin.

- Transferencia de calor por convección natural.

$$q'_{Con} = hA_s(T_{sup} - T_{Amb}) \quad (4.3.)$$

Donde h es el coeficiente de convección que se determina mediante.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4.4.)$$

Donde D es el diámetro del tubo y k es el coeficiente de conducción térmica del material del tubo.

En este caso, para estimar el número de Nusselt, se utiliza la correlación empírica del número Nusselt para la convección natural sobre superficies de la tabla 2.1. Figura 9-25 de la misma tabla para $Pr \leq 10^2$.

$$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387Ra^{1/16}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (\text{Correlación de ChurCill Cho}) \quad (4.5.)$$

Donde Pr es el número de Prandtl para la temperatura media entre cubierta y ambiente $\frac{T_{Sup} + T_{Amb}}{2}$ y Ra es el número de Rayleigh para el diámetro externo del tubo.

Y ambos se obtienen de las ecuaciones.

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} \quad (4.6.)$$

$$Ra = \frac{g\beta D(T_{Sup} - T_{Amb})}{\alpha\vartheta} \quad (4.7.)$$

Donde, g es la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$, α, ϑ, β son la difusividad térmica $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ la viscosidad cinemática $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ y el coeficiente de expansión térmica (K^{-1}) , respectivamente dichos valores se obtiene de las tablas de propiedades físicas del aire ver anexo B.

Entonces para calcular la transferencia de calor por convección natural se determina primero.

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} \rightarrow Pr = \frac{2.102 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{3.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Pr = 5.32 \times 10^{-13}$$

$$Ra = \frac{g\beta D(T_{Sup} - T_{Amb})}{\alpha\vartheta} \rightarrow Ra = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 3.96 \times 10^{-3} K^{-1} * 31.75 \times 10^{-3} \text{ m} (408^\circ K - 299^\circ K)}{3.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} * 2.102 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Ra = 1.62 \times 10^{-4}$$

$$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/16}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \rightarrow Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 (1.62 \times 10^{-4})^{1/16}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{5.32 \times 10^{-13}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 = 0.37$$

Luego de determinar el número de Nusselt se procede a encontrar el coeficiente de convección natural h .

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = \frac{Nu * k}{D} \rightarrow h = \frac{0.37 * 14.9 \text{ W/m} * K}{31.75 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h = 226.08 \text{ W/m} * K$$

Al encontrar el coeficiente de convección natural h se puede determinar el flujo de calor generado por la convección en el tubo.

$$q'_{Con} = hA_s(T_{Sup} - T_{Amb}) \rightarrow q'_{Con} = (226.08 \text{ W/m} * K) * 0.1197 \text{ m}^2 (408^\circ K - 299^\circ K)$$

$$q'_{Con} = 2949.74 \text{ W/m}$$

Cuando se obtienen los flujos de calor de radiación y convección se calcula el flujo de calor total siendo este.

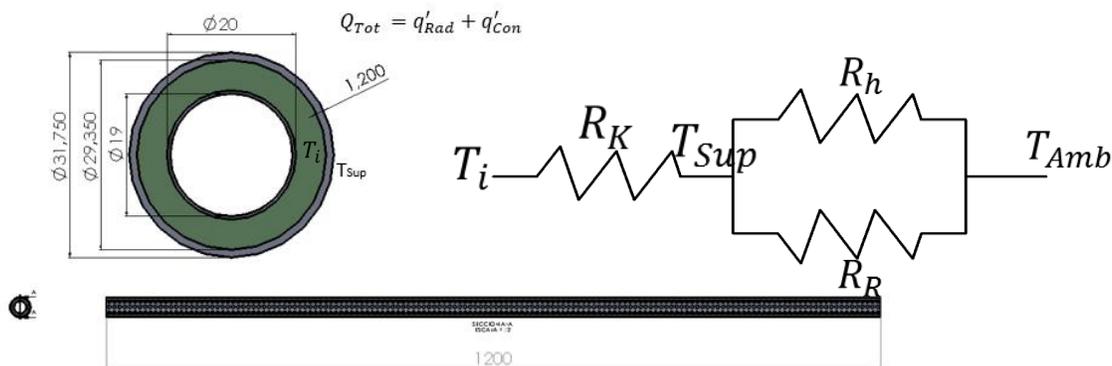
$$Q'_{Tot} = q'_{Rad} + q'_{Con} \rightarrow Q = 33.46 \text{ W/m} + 2949.74 \text{ W/m}$$

$$Q'_{Tot} = 2983.2 \text{ W/m}$$

Transferencia de calor por conducción.

Con la suma de los flujos de calor $q'_{Rad} + q'_{Con}$ se determina el flujo de calor total Q'_{Tot} que incide sobre la superficie del tubo, el cual permita conocer la temperatura final en el lecho de adsorbente, que se determina gracias a la transferencia de calor o flujo de calor generado por los fenómenos de radiación y convección presentes en el modelo.

Figura 21. Sección transversal del reactor o lecho adsorbente (mm).



Fuente: Autor del proyecto.

Una vez se tiene el flujo de calor total transmitido al tubo se determina la temperatura dentro del mismo, esta temperatura es de suma importancia para garantizar que sean alcanzadas las temperaturas mínimas para la adsorción e desorción del refrigerante en el adsorbente, siendo estas 20°C para la adsorción, 70°C para la desorción respectivamente.

$$Q'_{Tot} = 2\pi kL \frac{T_i - T_{Sup}}{\ln \frac{r_{Sup}}{r_i}} \quad (4.8.)$$

$$Q'_{Tot} = 2\pi kL \frac{T_{Sup} - T_i}{\ln \frac{r_{Sup}}{r_i}} \rightarrow 2983.2 \text{ W/m} = 2\pi(14.9 \text{ W/m} * K)(1.2\text{m}) \frac{408^\circ\text{K} - T_i}{\ln \frac{15.875 \times 10^{-3}}{14.675 \times 10^{-3}}}$$

$$T_i = T_{Sup} - \frac{Q'_{Tot} \left(\ln \frac{r_{Sup}}{r_i} \right)}{2\pi kL} \rightarrow T_i = 408^\circ\text{K} - \frac{2983.2 \text{ W/m} \left(\ln \frac{15.875 \times 10^{-3}}{14.675 \times 10^{-3}} \right)}{2\pi(14.9 \text{ W/m} * K)(1.2\text{m})}$$

$$T_i = 379.28^\circ\text{K}$$

Sabiendo que la temperatura de desorción para el cloruro de litio (LiCl) es de 351°K, la temperatura en el lecho de adsorción es óptimo ya que se encuentra por encima de la temperatura necesaria para la desorción con 379.28°K.

4.2.2.3. Determinación de las cantidades de adsorbente y adsorbato. En el proceso de selección de las cantidades se tienen en cuenta las recomendaciones del estudio realizado por Rogerio G. Oliveira, Ru Zhu Wang, TingXian Li, titulado. Adsorption Characteristics of Methanol in Activated Carbon Impregnated with Lithium Chloride, en el 2010,⁴⁹ en el recomiendan que la proporción de cloruro de litio y carbón activado que debe ser utilizado en la mezcla es de 23% y 77% respectivamente con el cual se evidencia un aumento del 80% en la adsorción del refrigerante por ello se toma como parámetro de la carga de adsorbente el recomendado.

Al tener establecido las cantidades de adsorbente en porcentaje de masa, teniendo el volumen del lecho adsorbente como se muestra en la figura 4.15. Donde se cuenta con la sección transversal del lecho y la longitud del mismo se determina el volumen teniendo en cuenta la configuración geométrica del adsorbente. Volumen = 434.8805 mL, que si se quisiera ocupar solo con cloruro de litio se tendría que usar Masa = 900.20 gramos de licl culla Densidad del Licl= 2.07 g/cm³, o si se quisiera ocupar solo con carbon activado se tendrían que usar Masa = 217.44 gramos de carbon activado culla Densidad es= 0.5 g/cm³, valores iniciales que son utilizados para determinar las cantidades a usar, teniendo en cuenta los criterios de recomendación anteriormente descritos, teniendo en cuenta masa inicial del carbón activado como $m_{CA} = 217.44g$ sabiéndose que solo se va a implementar un 77% de esta masa que luego va a ser impregnada por cloruro de litio se tiene que la masa a usar es determinada mediante las ecuaciones 4.9 y 4.10.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.9.)$$

$$v_{Tot} = v_1 + v_2 \quad (4.10.)$$

$$m_1 = 0.23m_2 \quad (4.11.)$$

De la ecuación 4.9 se toma que $\rho_1 = \frac{m_1}{v_1}$, $\rho_2 = \frac{m_2}{v_2}$, despejando cada una de las ecuaciones en función de su volumen se tiene que.

$$v_1 = \frac{m_1}{\rho_1} \quad (4.12.)$$

$$v_2 = \frac{m_2}{\rho_2} \quad (4.13.)$$

Como el volumen total es de 434.8805 mL se reemplaza este valor en la ecuación 4.10 y se reemplaza la ecuación 4.12 y 4.13 en 4.10.

$$434.8805mL = v_1 + v_2$$

$$434.8805mL = \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}$$

⁴⁹**OLIVEIRA G Rogerio, WANG R Zhu, XIAN L Ting**, Adsorption Characteristics of Methanol in Activated Carbon Impregnated with Lithium Chloride, **Chemical Engineering Technology**, 2010

Luego se reemplaza 4.11 en la ecuación anterior ya conociendo las densidades de cada uno de las sustancias, $\rho_1 = 2.07 \text{ g/mL}$ para el cloruro de litio y $\rho_2 = 0.5 \text{ g/mL}$ para el carbón activado.

$$434.8805 \text{ mL} = \frac{0.23m_2}{2.07 \text{ g/mL}} + \frac{m_2}{0.5 \text{ g/mL}}$$

$$434.8805 \text{ mL} = \frac{m_2}{9} + 2m_2$$

$$434.8805 \text{ mL} = \frac{19m_2}{9}$$

$$m_2 = \frac{434.8805 * 9}{19}$$

$m_2 = 205.996 \text{ g}$ Masa del carbón activado.

$$m_1 = 0.23m_2 \rightarrow m_1 = 0.23 * 205.996$$

$$m_1 = 47.38 \text{ g}$$
 Masa del cloruro de litio.

Para encontrar la cantidad de NH_3 adsorbido por el LiCl y el carbón activado, se tiene que la masa molar de cada uno de los químicos que intervienen en esta reacción son.

Masa molar del $\text{NH}_3 = 17.031 \text{ g/mol}$

Masa molar del $\text{LiCl} = 42.394 \text{ g/mol}$

Masa molar del *carbon activado* = 12.01 g/mol

Para la reacción de adsorción del LiCl con el NH_3 se toma que.

$\frac{1 * 17.031 \text{ g/mol de } \text{NH}_3}{1 * 42.394 \text{ g/mol de } \text{LiCl}} = 0.4017 \text{ gNH}_3 / \text{gLiCl}$ Lo que da como resultado que por cada gramo de LiCl se adsorben 0.4017 g de NH_3 .

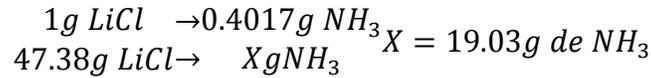
Para la reacción de adsorción del carbón activado con el NH_3 se toma que.

$\frac{1 * 17.031 \text{ g/mol de } \text{NH}_3}{1 * 12.01 \text{ g/mol de carbon activado}} = 1.418 \text{ gNH}_3 / \text{gLiCl}$ Lo que da como resultado que por cada gramo de carbón activado se adsorben 1.418 g de NH_3 .

Resultando así que para 205.996 g Masa del carbón activado se adsorben.

$$\begin{array}{l} 1 \text{ g carbon activado} \rightarrow 1.418 \text{ g NH}_3 \\ 205.996 \text{ g carbon activado} \rightarrow X \text{ g NH}_3 \end{array} X = 291.17 \text{ g de NH}_3$$

Para 47.38 g Masa del cloruro de litio se adsorben.



Lo que da como resultado que para la masa total de la mezcla de LiCl y carbón activado se pueden adsorber un total de 310.2 g de amoníaco (NH₃).

4.2.2.4. Calculo de la cantidad de agua a congelar. Para hacer los cálculos de la cantidad de NH₃ está considerando la entalpía del vapor saturado y líquido saturado de NH₃ a 14 y 4 Bar respectivamente. Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas para tal fin.

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} * c_p * \Delta T \text{ Calor retirado da agua.} \quad (4.14.)$$

Considerando un ΔT de $25^\circ C - 0^\circ C = 298^\circ K - 273^\circ K$

$$Q_{NH_3} = m_{NH_3} * \Delta H \quad (4.15.)$$

Donde ΔH es.

$$\Delta H = \left(h_{vapor} = 1455.21 \frac{KJ}{Kg} \right) - \left(h_{liquido} = 198.59 \frac{KJ}{Kg} \right). \quad \text{Ver anexo C.}$$

Por tanto reemplazando (4.15.) en (4.14.) y considerando que el calor retirado al agua es el mismo absorbido por el amoníaco ($Q_{H_2O} = Q_{NH_3}$) se tiene:

Como $Q_{H_2O} = Q_{NH_3} \therefore$

$$m_{NH_3} * \Delta H = m_{H_2O} * c_p * \Delta T$$

$$m_{H_2O} = \frac{m_{NH_3} * \Delta H}{c_p * \Delta T} \quad (4.16.)$$

Las propiedades del agua se toman del anexo D.

$$c_p = 4.18 \text{ KJ/Kg} * K$$

$$m_{H_2O} = \frac{0.3102Kg * \left[\left(h_{vapor} = 1455.21 \frac{KJ}{Kg} \right) - \left(h_{liquido} = 198.59 \frac{KJ}{Kg} \right) \right]}{4.18 \text{ KJ/Kg} * K * 298^\circ K - 273^\circ K}$$

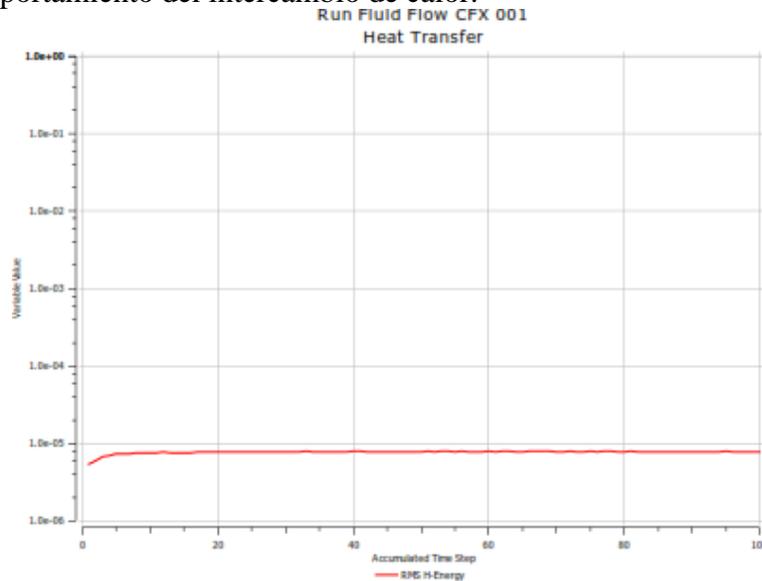
$$m_{H_2O} = 3.63Kg$$

La cantidad máxima de agua que se puede congelar es 3.63Kg.

4.2.2.5. Diseño del condensador mediante elementos finitos. Debido a la complejidad del condensador que se requiere para el prototipo este se diseña mediante elementos finitos usando el software “ANSYS®” el cual facilita el estudio del mismo, al observar los resultados del análisis en CFX se evidencia que el intercambio de calor presente en el estudio al condensador de aletas seleccionado es el indicado para trabajar en las

condiciones de convección natural por agua, ya que se tiene un comportamiento ascendente en la gráfica de iteraciones y luego se normaliza donde se muestra un comportamiento estable del mismo como se ve en la gráfica 1.

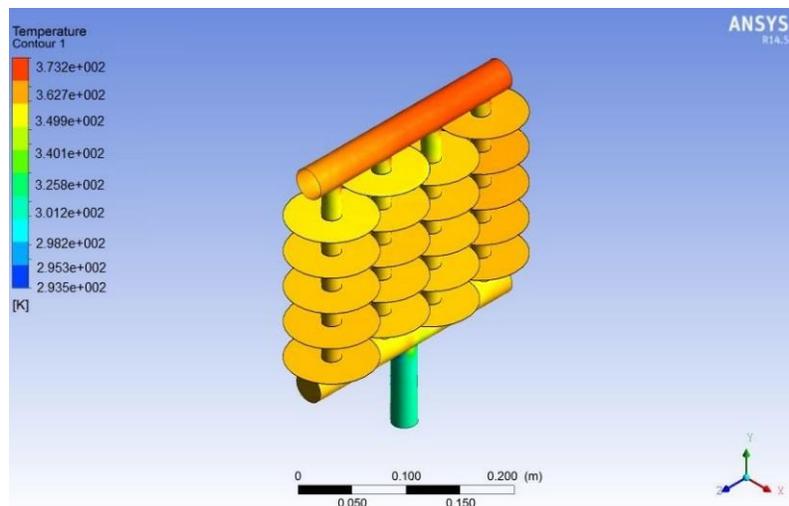
Grafica 1. Comportamiento del intercambio de calor.



Fuente: Autor del proyecto.

Estos resultados se pueden observar mejor en la figura 22 mostrando el comportamiento de las temperaturas a lo largo de la geometría del intercambiador de calor o condensador de aletas.

Figura 22. Distribución de temperaturas a lo largo del condensador.



Fuente: Autor del proyecto.

4.2.2.6 Determinación del COP. En el sistema se podrían alcanzar COP de la orden de 0.5 o sea sabemos quanta masa de hielo se puede enfriar y también se conoce cuanta radiación

incide por m^2 , por hora, sabiendo que en promedio se tienen 5 horas diarias de radiación solar se puede determinar el COP teórico de la maquina mediante.

$$COP = \frac{\text{Energía retirada de la masa de hielo}}{\text{Energía solar adsorvida durante el ciclo de desorcion}} \quad (4.17.)$$

$$\text{Energía solar adsorvida} = \frac{4000Wh/m^2}{5h} = 800 W/m^2$$

$Q_{H2O} = 389.55KJ$ Calor retirado da agua.

$$COP = \frac{389.55KJ}{800 W/m^2} = 0.48$$

4.3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

Como requerimiento a las condiciones de trabajo en las cuales se encuentra el equipo se seleccionan materiales resistentes a la corrosión tales como acero inoxidable teniendo en cuenta su alta resistencia mecánica, debido a las presiones presentes en el sistema, resistencia al desgaste por agentes corrosivos y condiciones climáticas de intemperie.

Teniendo en cuenta los requerimientos se selecciona acero inoxidable AISI 308 por su fácil acceso y disponibilidad en la región.

4.3.1. Estructura soporte del sistema. Tomando como base los planos constructivos que se diseñaron previamente a la construcción de la maquina se utilizó tubería cuadrada con diferentes dimensiones tales como 12,7mm x 12.7mm para la estructura soporte de la parábola, 38.1mm x 12.7mm usada para las bases de las columnas soporte de la estructura soporte de la parábola espejo, 38.1mm x 38.1mm usada como columnas, las uniones de la tubería de la estructura se realizó con soldadora de acero inoxidable mediante electrodo revestido 308L.

Foto 3. Estructura soporte de la parábola.



Fuente: Autor del proyecto.

Para construir la estructura soporte de la parábola se tuvieron en cuenta la geometría de la curva diseñada para que la concentración de la radiación fuera la mejor por esto se imprimió un plano de la curva de la estructura a escala 1:1 con la cual se logró ajustar la curva de la tubería que se dobló mediante matrices de curvas de taller para luego ser ajustada manualmente a la curva deseada.

Foto 4. Ajuste de la curva.



Fuente: Autor del proyecto.

4.3.2. Ajuste del espejo en la estructura del mismo. Para la construcción del espejo de la parábola se selecciona lamina de acero inoxidable calibre 28 por optima reflexión y maleabilidad para ajustarse a condiciones geométricas como la de la parábola.

Al ajustar o fijar el espejo en la estructura de la parábola se seleccionaron soportes de aluminio por su flexibilidad y resistencia a la corrosión, lo que permite que el espejo de acero inoxidable al calentarse por la radiación solar pueda dilatarse libremente para evitar errores en la concentración de los rayos del sol en el foco de la parábola.

Foto 5. Ajuste del espejo en la parábola.



Fuente: Autor del proyecto.

4.3.3. Sistema de rotación de la parábola. En el sistema de rotación de la parábola no se tienen en cuenta las cargas generadas por el peso de la estructura ya que su valor para efectos de cálculo y selección de los rodamientos es despreciable, por ello se seleccionan chumaceras F206 que cumplen con el requerimiento del diámetro de la tubería que se usa como eje en el sistema de rotación siendo esta de 38.1mm.

Foto 6. Sistema de rotación, chumacera F206.



Fuente: Autor del proyecto.

4.3.4. Foco de la parábola. Se seleccionó tubería redonda de 31.75mm de diámetro calibre 14 en acero inoxidable en el foco está alojado el adsorbente, razón por la cual es considerado el reactor del sistema de refrigeración

Foto 7. Foco de la parábola.



Fuente: Autor del Proyecto.

4.3.5. Condensador. Para la construcción del condensador se utilizaron diferentes diámetros de tubería y lámina de acero inoxidable para las aletas disipadoras de calor, además se implementó una caja de vidrio para -garantizar una temperatura más baja que la del aire circundante, por tanto al estar el condensador inmerso en agua se aumenta la

transferencia de calor entre el vapor de refrigerante y el líquido producto de un mayor gradiente de temperatura.

Foto 8. Montaje de los tubos capilares del evaporador.



Fuente: Autor del Proyecto.

4.3.6. Caja fría. La caja fría se construyó con 3 tipos de material diferente para garantizar la menos pérdida de calor al ambiente ya que una de las partes más críticas en el sistema es la pérdida de calor debido al poco aislamiento del sistema, como primera barrera se usa icopor siendo este el primer aislante, este se recubre con espuma de poliuretano y por último se usa madera para recubrir estos dos materiales y darle estructura firme a la caja fría.

Foto 9. Caja fría.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA.

4.4.1. Instrumentos usados en las pruebas.

4.4.1.1. Termocuplas tipo K. Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura. La termocupla K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300°C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos.⁵⁰

Foto 10. Termocupla tipo K.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4.1.2. Transductor de presión. Son elementos electromecánicos utilizan un elemento mecánico elástico en combinación con un transductor eléctrico el cual genera una señal eléctrica de salida. El elemento mecánico convierte la presión a medir en una fuerza o en un desplazamiento el cual es detectado con el transductor eléctrico.

Dentro de la clasificación de los transductores y/o transmisores utilizados en los elementos electromecánicos se encuentran los Resistivos o Potenciométricos, Magnéticos, Capacitivos, Extensométricos y Piezoeléctricos.⁵¹

⁵⁰ ARIAN Control & Instrumentacion, <http://www.arian.cl>, citado: 15/01/2014

⁵¹<http://instrument-industrial.blogspot.com/2007/05/transductores-electromecnicos-de-presin.html>, citado: 20/01/2014

Foto 11. Transductor de presión 500Psi.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4.1.3. Manómetros para refrigeración. Se utilizan para controlar y verificar los procesos de carga de refrigerante en un sistema, también son usados para verificar las fugas del sistema ya sea haciendo pruebas de vacío o de fugas con aire a alta presión.

Foto 12. Manómetros para refrigeración.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4.2. Pruebas de funcionamiento del equipo.

4.4.2.1. Efectividad de la parábola. A fin de analizar la eficiencia de la parábola se hicieron pruebas con agua para garantizar que efectivamente se tenía una temperatura arriba de lo necesaria por el adsorbente. Se analizó la efectividad de la parábola mediante un monitoreo de las temperaturas y presiones de vapor de agua presentes en el foco para observar si se logran las temperaturas deseadas con el diseño de esta parábola.

Foto 13. Medición de la temperatura en el foco.



Fuente: Autor del proyecto.

Foto 14. Medición de la presión en el foco.



Fuente: Autor del proyecto.

En estas pruebas se registraron presiones por encima de los 20 Psi, temperaturas dentro del foco por encima de los 100 °C, al igual que fuera del mismo lo que demuestra gran efectividad de la parábola y el espejo seleccionados.

4.4.2.2. Verificación de fugas en el sistema. Para garantizar la ausencia de fugas en el sistema para poder realizar las fases de vacío y carga de refrigerante se procedió a inyectar aire en el sistema a altas presiones por encima de 250Psi para observar la presencia de fugas para su posterior corrección, encontrando solo dos fugas por soldadura y 3 por uniones roscadas las cuales fueron corregidas.

Foto 15. Inyección de aire a alta presión al sistema.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4.2.3. Comportamiento del adsorbente. Para observar el comportamiento del adsorbente se mezclaron las proporciones - de los componentes del mismo, y verificar su estado final luego de calentarlo y tratarlo en el laboratorio.

Para realizar estas pruebas se calcularon y separaron las cantidades calculadas del cloruro de litio y el carbón activado para luego ser pesadas en la gramara del laboratorio.

Foto 16. Medición de la masa del carbón activado.



Fuente: Autor del proyecto.

Luego se midió la cantidad de masa del cloruro de litio para mezclarlo con el carbón activado anteriormente medido.

Foto 17. Medición de la masa del cloruro de litio.



Fuente: Autor del proyecto.

Foto 18. Mezcla del cloruro de litio y el carbón activado.



Fuente: Autor del proyecto.

Luego de mezclar los componentes del adsorbente con las medidas de seguridad que se necesitaban se procedió a ingresar la mezcla a la mufla para ser calentada a 100°C.

Foto 19. Mezcla en la mufla a 100°C.

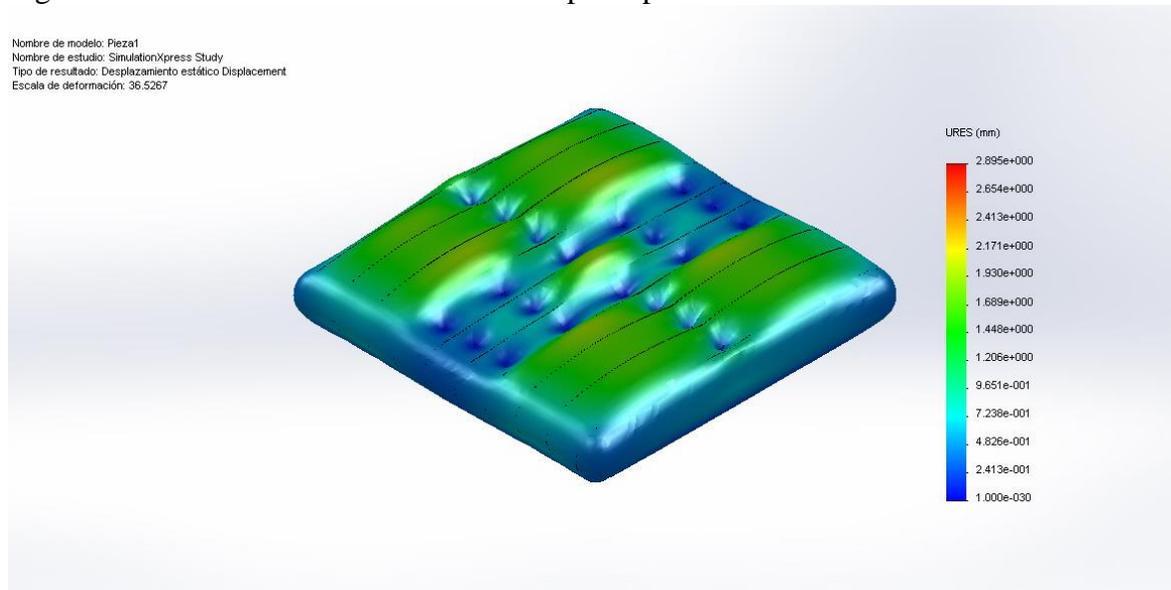


Fuente: Autor del proyecto.

4.4.3. Especificación de los resultados de las pruebas en el equipo.

4.4.3.1. Selección del colector solar. Para seleccionar el tipo de colector de energía solar se realizaron pruebas mediante elementos finitos para observar el comportamiento de los dos tipos de colectores más usados ya que el de placa plana es comúnmente usado para sistemas de vacío y no presentan problemas estructurales de importancia por las bajas presiones que se tienen en estos sistemas, siendo para el caso particular de este proyecto un sistema de altas presiones por el par adsorbente-adsorbato fue de gran importancia evaluar el comportamiento de los colectores solares planos y parabólicos los cuales según los resultados obtenidos son los ideales para este proyecto ya que como se muestra a continuación las deformaciones en un colector de placa plana no garantiza la integridad estructural del sistema como lo hace el colector parabólico.

Figura 23. Deformaciones en el colector de placa plana.



Fuente: Autor del proyecto.

Como se observa en la figura 23 las deformaciones en este tipo de colectores son demasiado significativas ya que superan los 3mm de desplazamiento lo que pone en riesgo la integridad del sistema y no garantiza el correcto funcionamiento de la máquina y como se pudo observar en los resultados del estudio a la tubería del foco del concentrador parabólico (Figura 16) las deformaciones no comprometen la integridad del sistema.

Resultados de las pruebas de compactación de sal en una tubería. Para verificar el comportamiento de la compactación del LiCl se usó sal común de cocina que tiene un comportamiento similar al cloruro de litio, se diseñó una probeta de compactación a la cual se le aplicó una carga que inicio desde 1kg hasta 10 kg con los cuales se logró la compactación de la sal en un estado aceptable para garantizar que el refrigerante recorra la mayor cantidad de área posible de adsorbente.

Foto 20. Sal compactada en la probeta de compactación.



Fuente: Autor del proyecto.

4.4.3.2. Resultados para la concentración de calor en el prototipo. Al introducir agua en el foco de la parábola del concentrador parabólico y colocar como instrumento de medición un manómetro de caratula, se observó que las presiones presentes en el sistema en el punto de mayor concentración de calor (12 del medio día), las temperaturas dentro del foco superaron los 100°C , estas pruebas se realizaron durante 2 semanas donde los valores promedio de presión en el foco eran de 20 Psi y 110°C lo que dio como resultado un diseño de parábola que cumplía con gran satisfacción los requerimientos de temperatura de desorción de amoniaco.

Foto 21. Reflejo de la radiación en el foco.



Fuente: Autor del proyecto.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con las teorías de diseño mecánico y análisis por elementos finitos se pudo evidenciar la eficiencia de los materiales seleccionados para la construcción del prototipo ya que estos no presentaron deformaciones significativas que afectaran y comprometieran la integridad del mismo.

Con los resultados obtenidos en el análisis mediante el software “ANSYS®” se demostró que la eficiencia del condensador utilizado en el prototipo es alta, ya que cumple con los requerimientos de poder retirar el mayor calor posible para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Gracias a las pruebas realizadas con vapor de agua se pudo determinar que las temperaturas alcanzados por el espejo parabólico son ideales para la producción de efecto frigorífico en el prototipo ya que estas alcanzaron más de 100°C siendo necesarios para el ciclo de desorción del refrigerante solamente 70°C lo que da un gradiente de 30°C de ganancia del espejo parabólico.

Teniendo en cuenta la superficie de captación del espejo parabólico se observó una gran ganancia de calor, en comparación a los colectores de placa plana que tradicionalmente se utilizan para este tipo de sistemas de refrigeración lo que teóricamente garantiza un COP por el orden de 0.5, siendo para este caso particular de 0.48.

Este prototipo es de gran importancia teniendo en cuenta que con la optimización del mismo se puede exponer en un mercado que tenga la necesidad de sistemas de refrigeración alternativas donde sea imposible el acceso a sistemas convencionales de compresión mecánica.

En comparación con los sistemas que trabajan con compresión mecánica, los sistemas por adsorción química son más amigables con el ambiente ya que no utilizan refrigerantes que contribuyan con el deterioro de la capa de ozono y tampoco usan fuentes de energía convencionales, usando como medio de energía la energía solar térmica.

6. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Teniendo en cuenta que el refrigerante (Amoniaco R717) es un químico con grandes restricciones en el país ya que lastimosamente se usa como materia prima para procesar drogas ilícitas se recomienda que mediante gestión de la universidad se logre la consecución del mismo para testar el funcionamiento del prototipo en condiciones óptimas.

Para trabajos futuros se recomienda que se usen mezclas en porcentajes diferentes del adsorbente (LiCl-Carbón Activado) para evaluar el rendimiento de adsorción del par adsorbente-adsorbato lo que permitiría tener resultados como aporte a la ciencia, en cuanto a sistemas de refrigeración no convencional se refiere.

Se recomienda que se implemente un sistema de seguimiento solar para que la captación de radiación en el espejo parabólico no sea intermitente permitiendo así que las temperaturas registradas en el foco de la parábola sean más constantes.

Si el refrigerante (Amónico R717) no puede ser conseguido por la universidad se recomienda el uso de un refrigerante con menor dificultad de consecución, como lo es el metanol siendo este usado en varias pruebas de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

ANDER E, Ezequiel. Técnicas de investigación social. Editorial LUMEN. Buenos Aires. 1995.

ATSDR. División de Ttoxicología. [en línea] Septiembre de 2002. [citado el: 3 de 05 de 2013.] <http://www.atsdr.cdc.gov/es/>.

BOUBAKRI, A. ANew Conception of an Adsorptive Solar-Powered Ice Maker. Rue de la Raperie : **Renewable Energy**. 2003, vol. 28.

CADENA, A. DELGADO, R. Diagnostico, Perspectivas y Lineamientos para Definir Estrategias Posibles Ante el Cambio Climático. Bogotá : emgesa,codensa, Universidad de los Andes. 2009.

CAICEDO Omar. PRIAS, Fredy. Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes. Bogotá d.c. Ministerio de Minas y Energía. 2010.

CENGEL, Yunus A.Transferencia de Calor. s.l. : McGraw Hill. 2004. 2.

CORTES, F.B. GALLON, D.A. JURADO, W.J. Modelamiento de un Sistema de Refrigeración Mediante Adsorción Intermitente en Carbón Activado Utilizando Como Fuente de Energía Radiación Solar. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 2004.

CRITOPH, Re. An Ammonia Carbon Solar Refrigerator For Vaccine Cooling. **Renewable Energy**. 1994, vol. 5, pp. 502–508.

ERICKSON, Carl.Rural Milk Preservation With the Isaac Solar Icemaker. Annapolis : **Energy for Sustainable Development**. 2009, vol. 13.

FERNÁNDEZ,Pedro.Ingeniería Térmica y de Fluidos. s.l. : <http://libros.redsauce.net/>. 2009.

FERNÁNDEZ, Pedro. Colectores de concentración de media temperatura. <http://pfernandezdiez.es/>.2012.

FRANCO, José A.Diseño de un Simulador por Computadora de Procesos de Evaporación en una Línea de Evaporadores de Múltiple Efecto. Guatemala : s.n. 2006.

GONZALES, Iván M. Refrigeración Solar por Adsorción con Sistemas de Captación CPC Experimentos y Modelos, Universidad de Burgos 2006.

GREGORY, Nellis. SANFORD, Klein.Heat Transfer . New York : Cambridge University Press. 2009.

H.L. Luo, Y.J. Dai, WANG R.Z., RUNSHENG TANG, M.L. Year Round Test of a Solar Adsorption Ice Maker in Kunming, China. Shanghai : **Energy Conversion and Management**. 2005, vol. 46.

HERNÁNDEZ, Emil. REYES, Miguel A. Análisis de las Variables que Inciden en el Comportamiento de un Refrigerador Solar, **Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada**. 2012

HOWELL, John R. Principios de Termodinámica para Ingeniería. s.l. : Department of Mechanical Engineering University of Texas at Austin.

IPSE. diagnostico zni. 2009.

KIPLAGATJ. K, WANG R.Z., OLIVEIRA R.G., LI T.X. Lithium chloride – Expanded graphite composite sorbent for solar powered ice maker, **Solar Energy**, 2010.

KIM, D. S., INFANTE, C. A. Solar Refrigeration Options – a State-of-the-Art Review, Arsenal Research, **Sustainable Energy Systems**. Giefingasse 2, 1210 Vienna, Austria, 2008.

LAMBERT, M. Design of Solar Powered Adsorption Heat Pump With Ice Storage. **Applied Thermal Engineering**. 2006, Vol. 27, pp. 1612–1628.

LEITHOLD. Louis, El Cálculo, Oxford University Press, E.E.U.U. 1998.

LI, M. WANG, R. Z. XU, Y. X. WU, J. Y. Desieng ao. Experimental Study on Dynamic Performance Analysis of a Flat-Plate Solar Solid-Adsorption Refrigeration for Ice Maker. **Renewable Energy**. 2001, vol. 27, pp. 211–221.

LE PIERRES, N. Procédé Solaire de Production de Froid Basse Temperature (-28 °C) par Sorption Solide–Gas. These Energetique et Genie de Procédés de Université de Perpignan. 2005.

M. LI, R. Z. WANG. A Study of the Effects of Collector and Environment Parameters on the Performance of a Solar Powered Solid Adsorption Refrigerator. Shanghai : **Renewable Energy**. 2002, vol. 27.

MARTÍNEZ, Eduardo. Diseño de una Instalación Solar Térmica con Aplicaciones para ACS y Calefacción en un Bloque de Viviendas Ubicado en Pontevedra, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, julio 2009.

MEDINI, N. MARMOTTANT, B. EL GOLLI, S. GRENIER, PH. Etude d'une Machine Solaire Autonome Afabriquer de la Glace. **Int J Refrig**. 1991, vol. 14.

MICHAEL, MORAN, HOWARD, SHAPIRO. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Hho, Iowa : John Wiley & Sons, Inc. 2006.

MEUNIER, F. Solid Sorption Heat Powered Cycles for Cooling and Heat Pumping Applications. **Applied Thermal Engineering**.1998, vol.18, pp. 715-729.

NORIEGA S. Carlos J.Modelagem e Simulacao do Reator de um Sistema de Climatizacao por Adsorcao Quimica. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

OLIVEIRA, Rogerio.Solar Powered Sorption Refrigeration and Air Conditioning, in Refrigeration: Theory, Echnology and Applications. . New York : **Nova Science Publishers**, vols. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.2011, pp. 205-238.

OLIVEIRA, Rogerio.Desenvolvimento de um Protótipo de Climatizador Alimentado por Calor de Baixa Temperatura. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina.

OLIVEIRA G Rogerio. WANG R Zhu, XIAN L Ting, Adsorption Characteristics of Methanol in Activated Carbon Impregnated with Lithium Chloride, **Chemical Engineering Technology**, 2010.

PAREDES V, Carmen. Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay. Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Paraguay. 2012.

PRALON, Antonio. FERREIRA, Leite. MICHEL, Daguenet.Performance of a New Solid Adsorption Ice Maker With Solar Energy Regeneration. Campina Grande : **Energy Conversion &Management**. 2000, vol. 41.

PEINADO A, Anthony. Análisis teórico-experimental del colector solar cilíndrico parabólico automatizado con espejos reflectantes. Universidad Privada del Norte sede Trujillo. 2012.

Presidencia de la Republica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente “NSR-10”. Bogotá. 2010.

SABINO, Carlos A. El proceso de la investigación. Editorial LUMEN/ HVMANITAS. . Buenos Aires. 1996.

SKOOG, Douglas A. Química Analítica. McGraw Hill. 2000.

WANG, R. Z. LI, M. XU, Y. X.WU J. Y.An Energy Efficient Hybrid System of Solar Powered Water Heater and Adsorption Ice Maker. Shanghai : **Solar Energy**. 2000, vol. 68.

WANG, R.Z.XU, Y.X.WU, J.Y.LI, M. H.B. SHOU.Research on a Combined Adsorption Heating and Cooling System. Shanghai : **Applied Thermal Engineering**. 2002, vol. 22.

S. VASTA, G. MAGGIO, G. SANTORI, A. FRENI, F. POLONARA, G. RESTUCCIA.An Adsorptive Solar Ilice-Maker Dynamic Simulation for North

Mediterranean Climate. Santa Lucia, Messina : **Energy Conversion and Management**. 2008, vol. 49.

SERRANO G, Daniel. Cálculo, diseño y análisis de Una central termosolar de Colectores cilíndrico Parabólicos operando con Sales fundidas. Leganés. Universidad Carlos III. 2012.

SUMATHY K, LI ZF.Experiments With Solar-Powered Adsorption Ice-Maker. **Renewable Energy**. 1999, vol. 16, pp.704–707

UPME. Consorcio Bariloche - brp. Consultoría para la Formulación Estratégica del Plan de Uso Racional de Energía y Fuentes no Convencionales de Energía 2007 – 2025. Bogotá. s.n. 2007.

WANG, R.Z.Adsorption Refrigeration Research in Shanghai Jiao Tong University. Shanghai :**Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2001, vol. 5.

Y. FAN, L. LUO, B. Souyri, Review of Solar Sorption Refrigeration Technologies: Development and Applications, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.2007, pp. 1758–1775.

REFERENCIAS DOCUMENTALES ELECTRÓNICAS

http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_litio; citado 01/05/2013.

<http://www.cicloaguavapor.com/index.php/condensador>, citado 04/06/13.

<http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=133178> citado 03/05/2013.

<http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?IServicio=Busquedas&ITipo=admin&IFuncion=main&cx=017568541179026560912%3Ajges5lczde8&cof=FORID%3A9&ie=UTF-8&q=radiaci%F3n+solar+&sa=Buscar&siteurl=institucional.ideam.gov.co%2Fjsp%2Findex.jsf&ref=www.ideam.gov.co%2Fjsp%2Findex.jsf&ss=15034j64203512j21>, citado 25/11/13.

http://www.indura.net/lista_productos.asp?idq=3258&a=soldaduras&ai=3257&b=electrodos&sub_cat=inoxidable, citado: 10/01/2014.

ARIAN Control & Instrumentacion,<http://www.arian.cl>, citado: 15/01/2014.

<http://instrument-industrial.blogspot.com/2007/05/transductores-electromecnicos-de-presin.html>, citado: 20/01/2014.

ANEXOS

Anexo A. Catálogo Tuberías, Dimensiones y Pesos ASTM.



TUVACOL S.A.
TUBERÍAS Y VÁLVULAS
DE COLOMBIA

Tuberías

Dimensiones y pesos - ASTM

NB	Outside Diameter		Wall Thickness		Weight		Designation STD/XS/XXS	Schedule Nos ¹
	In.	mm	In.	mm	lb/ft	kg/m		
1/8"	0.405	10.3	0.049	1,24	0.19	0,28	STD XS	10S 40(S) 80(S)
			0.068	1,73	0.24	0,36		
			0.095	2,41	0.31	0,46		
1/4"	0.540	13.7	0.065	1,65	0.33	0,49	STD XS	10S 40(S) 80(S)
			0.088	2,24	0.42	0,63		
			0.119	3,02	0.54	0,80		
3/8"	0.675	17.1	0.065	1,65	0.42	0,63	STD XS	10S 40(S) 80(S)
			0.091	2,31	0.57	0,85		
			0.126	3,20	0.74	1,10		
1/2"	0.840	21.3	0.065	1,65	0.54	0,80	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.083	2,11	0.67	1,00		
			0.109	2,77	0.85	1,26		
			0.147	3,73	1.09	1,62		
			0.188	4,78	1.31	1,95		
3/4"	1.050	26.7	0.065	1,65	0.69	1,03	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.083	2,11	0.86	1,28		
			0.113	2,87	1.13	1,68		
			0.154	3,91	1.47	2,19		
			0.219	5,56	1.94	2,89		
1"	1.315	33.4	0.065	1,65	0.87	1,29	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.109	2,77	1.40	2,08		
			0.133	3,38	1.68	2,50		
			0.179	4,55	2.17	3,23		
			0.250	6,35	2.84	4,23		
1 1/4"	1.660	42.2	0.065	1,65	1.11	1,65	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.109	2,77	1.81	2,69		
			0.140	3,56	2.27	3,38		
			0.191	4,85	3.00	4,46		
			0.250	6,35	3.76	5,60		
1 1/2"	1.900	48.3	0.065	1,65	1.28	1,90	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.109	2,77	2.09	3,12		
			0.145	3,68	2.72	4,05		
			0.200	5,08	3.63	5,40		
			0.281	7,14	4.86	7,23		
2"	2.375	60.3	0.065	1,65	1.61	2,38	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.109	2,77	2.64	3,94		
			0.154	3,91	3.65	5,43		
			0.218	5,54	5.02	7,47		
			0.344	8,74	7.46	11,10		
2 1/2"	2.875	73.0	0.083	2,11	2.48	3,71	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.120	3,05	3.53	5,26		
			0.203	5,16	5.79	8,62		
			0.276	7,01	7.66	11,40		
			0.375	9,52	10.01	14,90		
3"	3.500	88.9	0.083	2,11	3.03	4,50	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.120	3,05	4.33	6,45		
			0.125	3,18	4.51	6,71		
			0.156	3,96	5.58	8,30		
			0.188	4,78	6.63	9,87		
			0.216	5,49	7.58	11,30		
			0.250	6,35	8.88	12,90		
			0.281	7,14	9.67	14,40		
			0.300	7,62	10.25	15,30		
			0.438	11,10	14.31	21,30		
3 1/2"	4.000	101.6	0.083	2,11	3.48	5,20	STD XS XXS	5S 10S 40(S) 80(S) 160
			0.120	3,05	4.97	7,40		
			0.125	3,18	5.17	7,69		
			0.156	3,96	6.41	9,54		
			0.188	4,78	7.63	11,40		
			0.226	5,74	9.11	13,60		
			0.250	6,35	10.01	14,90		
			0.281	7,14	11.17	16,60		
			0.318	8,08	12.51	18,60		
			4"	4.500	114.3	0.083		
0.120	3,05	5.61				8,34		
0.125	3,18	5.84				8,69		
0.156	3,96	7.25				10,80		
0.188	4,78	8.48				12,40		

Anexo B.⁵² Propiedades del aire.

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u (kJ/kg), c_p (kJ/kg·K)											
T	h	u	c_p	when $\Delta s = 0$		T	h	u	c_p	when $\Delta s = 0$	
				P_r	v_r					P_r	v_r
200	199.97	142.56	1.20559	0.3363	1707.	450	451.80	322.02	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3087	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39165	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6335	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3088	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70205	1.3909	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.44	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.25	2.58810	30.38	67.07
420	421.28	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53
430	431.43	307.99	2.06533	4.915	251.1	730	745.62	536.07	2.61805	33.72	62.13
440	441.61	315.30	2.08870	5.332	236.8	740	756.44	544.02	2.63280	35.50	59.82

i. P_r and v_r data for use with Eqs. 8-43 and 8-44, respectively.

⁵²MICHAEL, MORAN, HOWARD, SHAPIRO. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Hhio, Iowa : John Wiley & Sons, Inc. 2006.

TABLE A-22 (Continued)

T(K), h and s (kJ/kg), s^* (kJ/kg · K)											
T	h	u	s^*	when $\Delta s = 0^*$		T	h	u	s^*	when $\Delta s = 0$	
				P_1	P_2					P_1	P_2
750	767.29	551.99	2.64737	37.35	57.63	1300	1395.97	1022.82	3.27345	330.9	11.275
760	778.18	560.01	2.66176	39.27	55.54	1320	1419.76	1040.88	3.29160	352.5	10.747
770	789.11	568.07	2.67593	41.31	53.39	1340	1443.60	1058.94	3.30959	375.3	10.247
780	800.03	576.12	2.69013	43.35	51.64	1360	1467.49	1077.10	3.32724	399.1	9.780
790	810.99	584.21	2.70400	45.53	49.86	1380	1491.44	1095.26	3.34474	424.2	9.337
800	821.95	592.30	2.71787	47.75	48.08	1400	1515.42	1113.52	3.36200	450.5	8.919
820	843.98	608.59	2.74504	52.59	44.84	1420	1539.44	1131.77	3.37901	478.0	8.526
840	866.08	624.95	2.77170	57.60	41.85	1440	1563.51	1150.13	3.39588	506.9	8.153
860	888.27	641.40	2.79783	63.09	39.12	1460	1587.63	1168.49	3.41247	537.1	7.801
880	910.56	657.95	2.82344	68.98	36.61	1480	1611.79	1186.95	3.42892	568.8	7.468
900	932.93	674.58	2.84856	75.29	34.31	1500	1635.97	1205.41	3.44516	601.9	7.152
920	955.38	691.28	2.87324	82.05	32.18	1520	1660.23	1223.87	3.46120	636.5	6.854
940	977.92	708.08	2.89748	89.28	30.22	1540	1684.51	1242.43	3.47712	672.8	6.569
960	1000.53	725.02	2.92128	97.00	28.40	1560	1708.82	1260.99	3.49276	710.5	6.301
980	1023.25	741.98	2.94468	105.2	26.73	1580	1733.17	1279.65	3.50829	750.0	6.046
1000	1046.04	758.94	2.96770	114.0	25.17	1600	1757.57	1298.30	3.52364	791.2	5.804
1020	1068.89	776.10	2.99034	123.4	23.72	1620	1782.00	1316.96	3.53879	834.1	5.574
1040	1091.85	793.36	3.01260	133.3	22.39	1640	1806.46	1335.72	3.55381	878.9	5.355
1060	1114.86	810.62	3.03449	143.9	21.14	1660	1830.96	1354.48	3.56867	925.6	5.147
1080	1137.99	827.88	3.05608	155.2	19.98	1680	1855.50	1373.24	3.58335	974.2	4.949
1100	1161.07	845.33	3.07732	167.1	18.896	1700	1880.1	1392.7	3.59779	1025	4.761
1120	1184.28	862.79	3.09825	179.7	17.880	1750	1941.6	1439.8	3.63356	1161	4.328
1140	1207.57	880.35	3.11883	193.1	16.946	1800	2003.3	1487.2	3.66984	1310	3.944
1160	1230.92	897.91	3.13916	207.2	16.064	1850	2065.3	1534.9	3.7023	1475	3.601
1180	1254.34	915.57	3.15916	222.2	15.241	1900	2127.4	1582.6	3.7354	1655	3.295
1200	1277.79	933.33	3.17888	238.0	14.470	1950	2189.7	1630.6	3.7677	1852	3.022
1220	1301.31	951.09	3.19834	254.7	13.747	2000	2252.1	1678.7	3.7994	2068	2.776
1240	1324.93	968.95	3.21751	272.3	13.069	2050	2314.6	1726.8	3.8303	2303	2.555
1260	1348.55	986.90	3.23638	290.8	12.433	2100	2377.4	1775.3	3.8605	2559	2.356
1280	1372.24	1004.76	3.25510	310.4	11.835	2150	2440.3	1823.8	3.8901	2837	2.175
						2200	2503.2	1872.4	3.9191	3138	2.012
						2250	2566.4	1921.3	3.9474	3464	1.864

Source: Tables A-22 are based on J. H. Keenan and J. Keyes, Gas Tables, Wiley, New York, 1945.

Anexo C.⁴⁴ Propiedades del amoniaco saturado (liquido-Vapor).

TABLE A-14 Properties of Saturated Ammonia (Liquid-Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
0.40	-50.36	1.4236	2.6795	-45.52	1264.54	-45.46	1417.18	1371.72	-0.1992	6.1618	0.40
0.50	-46.53	1.4330	2.1752	-28.73	1269.31	-28.66	1406.73	1378.07	-0.1245	6.0829	0.50
0.60	-43.28	1.4410	1.8345	-14.51	1273.27	-14.42	1397.76	1383.34	-0.0622	6.0186	0.60
0.70	-40.46	1.4482	1.5884	-2.11	1276.66	-2.01	1389.85	1387.84	-0.0086	5.9643	0.70
0.80	-37.94	1.4546	1.4020	8.93	1279.61	9.04	1382.73	1391.78	0.0368	5.9174	0.80
0.90	-35.67	1.4605	1.2559	18.91	1282.24	19.04	1376.23	1395.27	0.0808	5.8760	0.90
1.00	-33.60	1.4660	1.1381	28.03	1284.61	28.18	1370.23	1398.41	0.1191	5.8391	1.00
1.25	-29.07	1.4782	0.9237	48.03	1289.65	48.22	1356.89	1405.11	0.2018	5.7610	1.25
1.50	-25.22	1.4889	0.7787	65.10	1293.80	65.32	1345.28	1410.61	0.2712	5.6973	1.50
1.75	-21.86	1.4984	0.6740	80.08	1297.33	80.35	1334.92	1415.27	0.3312	5.6435	1.75
2.00	-18.86	1.5071	0.5946	93.50	1300.39	93.80	1325.51	1419.21	0.3843	5.5969	2.00
2.25	-16.15	1.5151	0.5323	105.68	1303.08	106.03	1316.83	1422.86	0.4319	5.5558	2.25
2.50	-13.67	1.5225	0.4821	116.88	1305.49	117.26	1308.76	1426.03	0.4753	5.5190	2.50
2.75	-11.37	1.5295	0.4408	127.26	1307.67	127.68	1301.20	1428.88	0.5152	5.4858	2.75
3.00	-9.24	1.5361	0.4061	136.96	1309.65	137.42	1294.05	1431.47	0.5520	5.4554	3.00
3.25	-7.24	1.5424	0.3765	146.06	1311.46	146.57	1287.27	1433.84	0.5864	5.4275	3.25
3.50	-5.36	1.5484	0.3511	154.66	1313.14	155.20	1280.81	1436.01	0.6188	5.4016	3.50
3.75	-3.58	1.5542	0.3289	162.80	1314.68	163.38	1274.64	1438.03	0.6489	5.3774	3.75
4.00	-1.90	1.5597	0.3094	170.55	1316.12	171.18	1268.71	1439.89	0.6776	5.3548	4.00
4.25	-0.29	1.5650	0.2921	177.96	1317.47	178.62	1263.01	1441.63	0.7048	5.3336	4.25
4.50	1.25	1.5702	0.2767	185.04	1318.73	185.75	1257.50	1443.25	0.7308	5.3135	4.50
4.75	2.72	1.5752	0.2629	191.84	1319.91	192.59	1252.18	1444.77	0.7555	5.2946	4.75
5.00	4.13	1.5800	0.2503	198.39	1321.02	199.18	1247.02	1446.19	0.7791	5.2765	5.00
5.25	5.48	1.5847	0.2390	204.69	1322.07	205.52	1242.01	1447.53	0.8018	5.2594	5.25
5.50	6.79	1.5893	0.2286	210.78	1323.06	211.65	1237.15	1448.80	0.8236	5.2430	5.50
5.75	8.05	1.5938	0.2191	216.66	1324.00	217.58	1232.41	1449.99	0.8446	5.2273	5.75
6.00	9.27	1.5982	0.2104	222.37	1324.89	223.32	1227.79	1451.12	0.8649	5.2122	6.00
7.00	13.79	1.6148	0.1815	243.56	1328.04	244.69	1210.38	1455.07	0.9394	5.1576	7.00
8.00	17.84	1.6302	0.1596	262.64	1330.64	263.95	1194.36	1458.30	1.0054	5.1099	8.00
9.00	21.52	1.6446	0.1424	280.05	1332.82	281.53	1179.44	1460.97	1.0649	5.0673	9.00
10.00	24.89	1.6584	0.1285	296.10	1334.66	297.76	1165.42	1463.18	1.1191	5.0294	10.00
12.00	30.94	1.6841	0.1075	324.69	1337.52	327.01	1139.52	1466.53	1.2152	4.9625	12.00
14.00	36.26	1.7080	0.0923	350.58	1339.56	352.97	1115.82	1468.79	1.2967	4.9050	14.00
16.00	41.03	1.7306	0.0808	373.69	1340.97	376.46	1093.77	1470.23	1.3729	4.8542	16.00
18.00	45.38	1.7522	0.0717	394.85	1341.88	398.00	1073.61	1471.01	1.4399	4.8086	18.00
20.00	49.37	1.7731	0.0644	414.44	1342.37	417.99	1053.27	1471.26	1.5012	4.7670	20.00

Anexo D.⁵³ Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes (líquidos).

TABLA 4-3

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

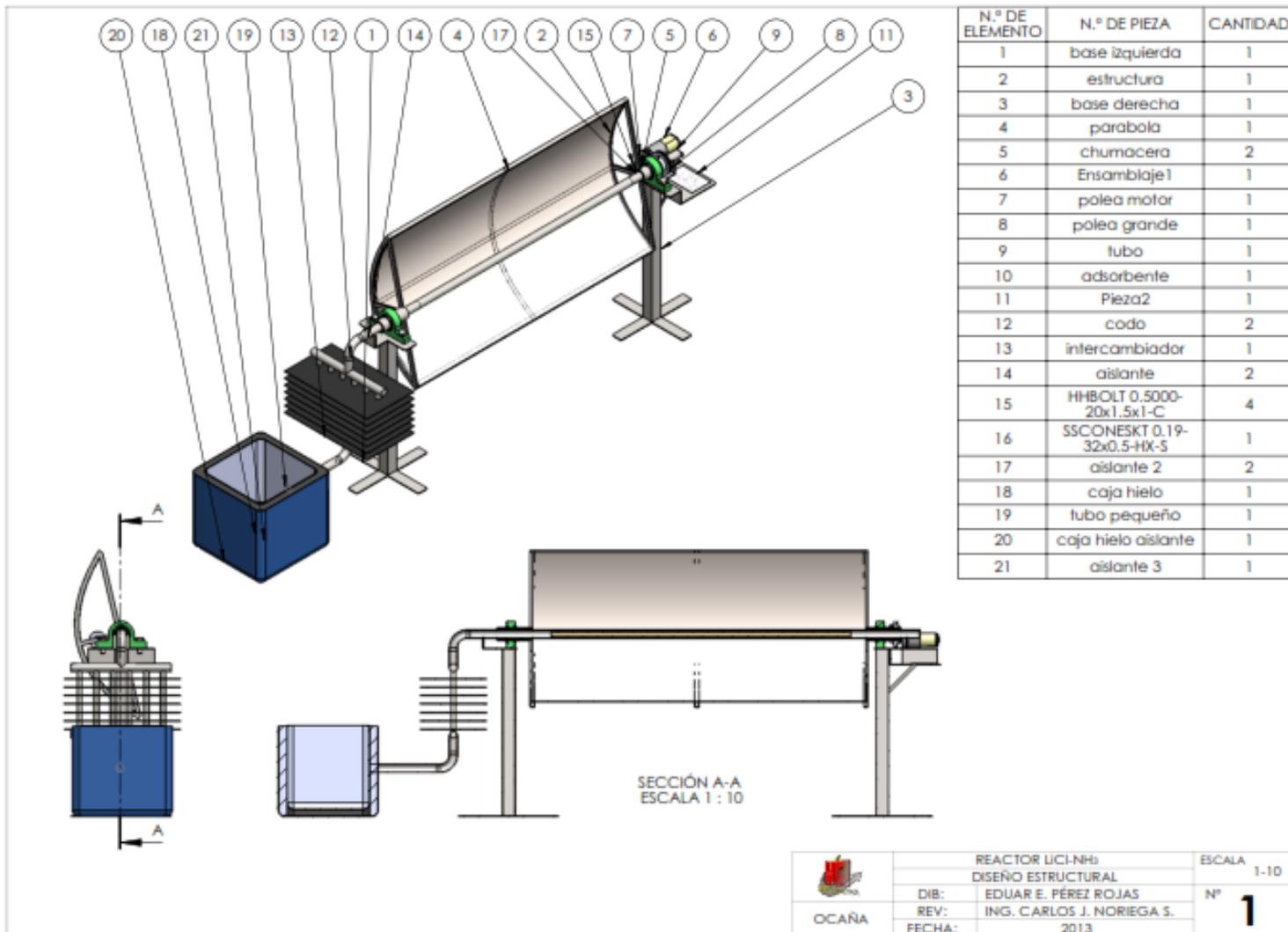
a) Líquidos

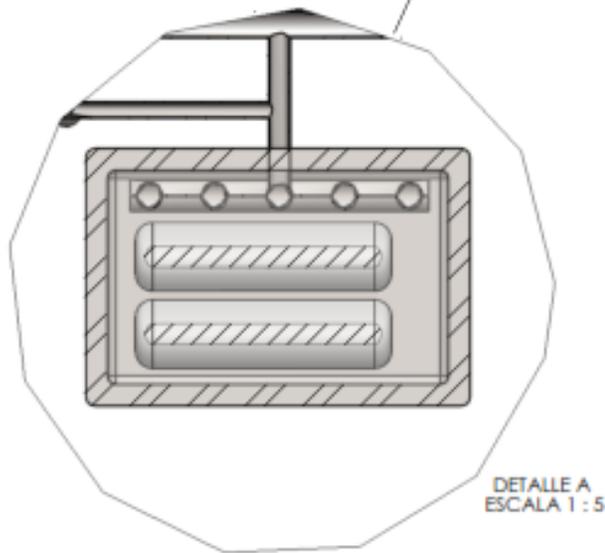
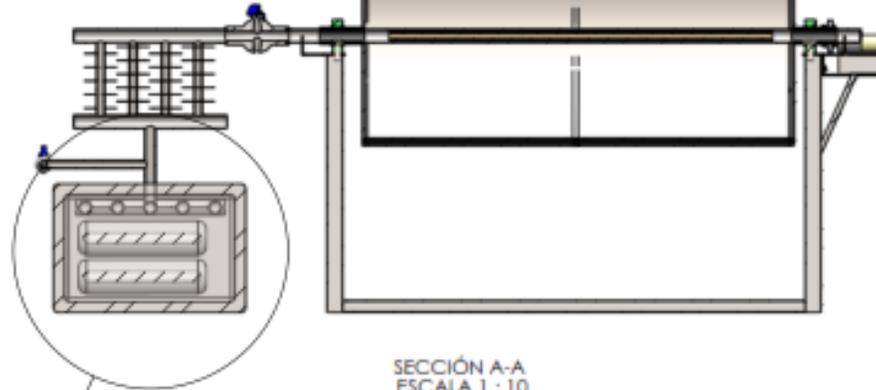
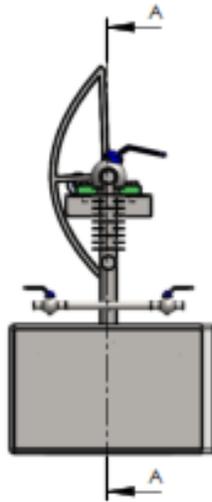
Sustancia	Datos de ebullición a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquido		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
Alcohol etílico	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Amoniaco	-33.3	1357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
n-Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Dióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etolol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilén glicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13,560	0.139
Metano	-161.5	510.4	-182.2	98.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.79
Metanol	64.5	1100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Oligeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Refrigerante 134a	-26.1	217.0	-96.6	—	-50	1443	1.23
Salmuera (20% de cloruro de sodio a base húmeda)	103.9	—	-17.4	—	20	1150	3.11
					-26.1	1374	1.27
					0	1295	1.34
					25	1207	1.43

* Temperatura de sublimación. (A presiones por debajo de la presión de punto triple de 518 vPa, el dióxido de carbono existe como un sólido o un gas. También, la temperatura de punto de congelamiento del dióxido de carbono es la temperatura de punto triple de -56.3°C.)

⁵³CENGEL, Yunus A. Termodinámica, 6 ed, McGraw Hill. 2009

Anexo E. Planos del prototipo





 OCAÑA	REACTOR LICl-NH ₃	ESCALA	1-1
	DISEÑO ESTRUCTURAL		
	DIB: EDUAR E. PÉREZ ROJAS	Nº	1
	REV: ING. CARLOS J. NORIEGA S.		
	FECHA: 2013		