

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARA LA
EXPERIMENTACIÓN EN REFRIGERACIÓN ADSORTIVA
USANDO EL PAR SÍLICA GEL-AGUA Y COMO FUENTE DE
ENERGIA LA RADIACIÓN SOLAR**

**CARLOS AUGUSTO ARIZA SANTOYO
LUIS HUMBERTO LEON CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARA LA
EXPERIMENTACIÓN EN REFRIGERACIÓN ADSORTIVA
USANDO EL PAR SÍLICA GEL-AGUA Y COMO FUENTE DE
ENERGIA LA RADIACIÓN SOLAR**

**CARLOS AUGUSTO ARIZA SANTOYO
LUIS HUMBERTO LEON CARVAJAL**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 22 de Noviembre del 2008

DEDICATORIA

Carlos Augusto Ariza Santoyo.

A mi sobrino Mateo, quien fue la inspiración que necesitaba.

A mi Madre quien con su fe en mí, me dio la fuerza para seguir luchando.

A mi Padre quien me enseñó a perseverar hasta lograr lo que quiero.

A mis dos hermanas que con su consejo y apoyo me llevaron a conseguir mis objetivos.

Luís Humberto León Carvajal

A Dios,

A mis Padres que gracias a su apoyo y a sus consejos me dieron la fuerza para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Omar Gálvez por su apoyo para llevar a buen termino esta tesis

A nuestros padres y familiares.

A todos nuestros amigos y amigas.

Carlos Augusto Ariza

Luís Humberto León.

CONTENIDO

	Pág.
1. ENERGIA SOLAR.....	4
1.1 RADIACION SOLAR	5
1.2 ATENUACION DE LA RADIACION SOLAR.....	6
1.2.1 Dispersión.	6
1.2.2 Reflexión (Albedo).	7
1.2.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión.	7
1.3 RADIACION INSIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE	8
1.3.1 Radiación directa (H _b).....	9
1.3.2 Radiación difusa (H _d).	10
1.3.3 Radiación global (H).	11
1.4 RADIACION SOLAR DIRECTA	12
1.4.1 Dirección de la radiación solar directa.....	12
1.4.2 Ángulos para seguimiento de la trayectoria del sol.....	14
1.5 RADIACION SOLAR EN BUCARAMANGA	15
1.6 ENERGIA SOLAR COMO ENERGIA ALTERNATIVA	16
1.6.1 Sistemas de captación solar:	17
1.6.2 Enfriamiento solar:.....	23
1.6.3 Refrigeración por absorción.....	25
1.6.4 Refrigeración por adsorción:	28
2. FUNDAMENTOS FÍSICOS Y TERMODINÁMICOS DE LA REFRIGERACIÓN ADSORTIVA CON EL PAR SÍLICA GEL - AGUA Y LA POSTERIOR REGENERACIÓN DEL ADSORBENTE.	34
2.1 BALANCE DE MASA	35
2.1.1 Masa vaporizada	37
2.1.2 Masa adsorbida por la sílica gel.....	39
2.1.3 Masa de vapor en el sistema.....	40
2.2 BALANCE DE ENERGIA.....	41
2.2.1 Balance de energía en el vaporizador.	41
2.2.2 Balance de energía de la sílica gel.....	43
2.2.3 Balance de transferencia de masa en la sílica gel.....	44
2.2.4 Balance de masa en el sistema y su influencia en la presión.	48
2.2.5 Vaporización del agua.....	49
3. DISEÑO DEL MODELO PARA LA EXPERIMENTACIÓN.....	53
3.1. DISEÑO TERMODINAMICO.....	53
3.2 ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	58
3.2.1 Análisis de la masa del sistema.....	58
3.2.2 Análisis general de la transferencia de calor.....	62
3.2.3 Planteamiento de la transitoriedad de forma explícita en el tuvo.	

3.2.4	Planteamiento de la transitoriedad de forma explicita en el agua.	67
3.2.5	Resultados del modelo analítico.	71
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONCENTRACION DE CALOR	86
3.3.1	Cálculo del área de captación de radiación.	86
3.3.2	Cálculo de los espejos.	87
3.3.3	Cálculo del área total de radiación.	92
3.3.4	Diseño del mecanismo de seguimiento solar.	94
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES	96
4.1.1	Análisis del modelo	96
4.1.2	Pruebas experimentales del prototipo	97
	CONCLUSIONES	109
	RECOMENDACIONES	111
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.	9
Figura 2. Componente directa de la radiación solar.	10
Figura 3: Factores que influyen en la radiación solar directa.	13
Figura 4: Colector solar plano.	18
Figura 5: Concentradores solares.	21
Figura 6: Tipos de colectores de energía solar.	22
Figura 7: Ciclo de absorción modificado.	26
Figura 8: Diagrama de Clapeyron de la etapa de calentamiento y presurización.	30
Figura 9: Diagrama de Clapeyron de la etapa de calentamiento y desorción.	31
Figura 10: Diagrama de Clapeyron de la etapa de enfriamiento y presurización.	32
Figura 11: Diagrama de Clapeyron de la etapa de enfriamiento y adsorción.	33
Figura 12: Esquema de los componentes del sistema de refrigeración	35
Figura 13: Esquema para el balance de masa.	37
Figura 14: Interacción de la presión con la rata de vaporización.	38
Figura 15: Balance de energía vaporizador.	42
Figura 16: Balance de energía en la sílica gel.	44
Figura 17: Diagrama p-v para el comportamiento termodinámico.	50

Figura 18: Energía libre de gibbs contra radio crítico de nucleación.	51
Figura 19: Rata de vaporización y absorción de agua.	54
Figura 20: Modelo general de la vaporización y la absorción.	55
Figura 21: Balance de calor para la vaporización.	56
Figura 22: Dimencionamiento inicial del modelo.	60
Figura 23: Cambio en la columna de agua a vaporizar.	62
Figura 24: Transferencia de calor análisis discreto.	63
Figura 25: Transferencia de calor segunda etapa.	66
Figura 26: Transferencia de calor en el tubo tercera etapa.	67
Figura 27: Transferencia de calor en el agua de medición.	68
Figura 28: Meta-estabilidad del agua.	71
Figura 29: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 50$	73
Figura 30: Temperatura contra tiempo para $L_{perdidas} = 50$.	74
Figura 31: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 100$	74
Figura 32: Temperatura contra tiempo para $L_{perdidas} = 100$.	75
Figura 33: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 150$	75
Figura 34: Temperatura contra tiempo para $L_{perdidas} = 150$.	76
Figura 35: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 200$	76
Figura 36: Temperatura contra tiempo para $L_{perdidas} = 200$.	77
Figura 37: Presión contra tiempo para $V = 2$	77
Figura 38: Temperatura contra tiempo para $V = 2$.	78
Figura 39: Presión contra tiempo para $V = 6$	78
Figura 40: Temperatura contra tiempo para $V = 6$.	79
Figura 41: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 100$ y Volumen = 3lt.	80
Figura 42: Temperatura contra tiempo para $L_{perdidas} = 100$ y Volumen = 3lt.	80
Figura 43: Presión contra tiempo para $L_{perdidas} = 50$ y Volumen = 6lt.	81

Figura 44: Temperatura contra tiempo para L perdidas= 50 y Volumen = 6lt.	81
Figura 45: Presión contra tiempo para L perdidas= 50 y Volumen = 6lt y presión de vacío inicial = 2mmbar.	82
Figura 46: Temperatura contra tiempo para L perdidas= 50 y Volumen = 6lt y presión de vacío inicial = 2mmbar.	83
Figura 47: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes pérdidas de calor.	84
Figura 48: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes presiones iniciales.	85
Figura 49: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes volúmenes del sistema.	85
Figura 50: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes áreas de absorción de la sílica.	86
Figura 47: Concentrador solar.	87
Figura 48: Angulo lateral.	88
Figura 49: Vista superior del concentrador.	89
Figura 50: Angulo vertical.	89
Figura 51: Angulo de inclinación del reactor.	90
Figura 52: mecanismo de seguimiento solar.	95
Figura 53: esquema de la bomba de calor.	98
Figura 54: Recipiente de la sílica gel.	99
Figura 55: Regeneración con horno de gas	101
Figura 56: regeneración con colector solar.	104
Figura 57: Temperatura en el recipiente de sílica gel.	106
Figura 58: Temperatura en el recipiente de agua o vaporizador.	107
Figura 59: Cambio de presión en el sistema.	108

Figura 60: regeneración de la sílica gel.

109

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Radiación en Bucaramanga	14
Tabla 2: Tiempos de regeneración de la sílica gel a diferentes temperaturas en horno a gas.	85
Tabla 3: Porcentaje de adsorción y regeneración en horno a gas.	86
Tabla 4: Tiempos de regeneración de la sílica gel a diferentes temperaturas	88
Tabla 5: Porcentaje de adsorción y regeneración en colector solar.	89
Tabla 6: Temperatura y tiempo en la sílica gel	90
Tabla 7: Temperatura en el vaporizador.	91

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

<i>A</i>	Área, m ² .
<i>B</i>	Es una constante que depende del tamaño del poro.
<i>C</i>	Concentración.
<i>C_p</i>	Calor específico a presión constante, Jul/Kg.°K.
<i>D</i>	Diámetro, m.
<i>E</i>	Energía, Kj.
<i>e</i>	Espesor, m.
<i>f</i>	Longitud, m.
<i>G</i>	distancia auxiliar.
<i>H</i>	Entalpía promedio, Kj/Kg.
<i>h</i>	Entalpía, Kj/Kg.
<i>j</i>	Longitud, m.
<i>K</i>	Conductividad térmica, W/m*°K.
<i>K</i>	Constantes determinadas por la estructura del adsorbente.
<i>L</i>	Longitud, m.
<i>M</i>	Masa, kg.
<i>P</i>	Presión, mm Bar.
<i>Q</i>	Calor, Kj.
<i>R_p</i>	Constante particular de vapor de agua.
<i>r</i>	Radio, m.
<i>T</i>	Temperatura, °K.
<i>t</i>	Tiempo, seg.
<i>V</i>	Volumen, m ³ .

W	Trabajo, Kj. Energía libre de gibas.
X	Distancia, m.
Z	Factor de corrección.

LETRAS GRIEGAS

α	Difusividad masica, difusividad térmica.
β	Ángulo, grados o radianes.
β	Coefficiente de afinidad determinado por el par adsorbente/adsorbato.
ϵ	Energía potencial de adsorción.
Ψ	Ángulo, grados o radianes.
θ	Ángulo, grados o radianes.
ϕ	Ángulo, grados o radianes.
ω	Velocidad angular, rev/min.
ρ	Densidad.

SUBÍNDICES

1,2,... Se refiere al punto de análisis dentro del volumen de control o al tiempo.

a Agua.

amed Agua para la medición de la temperatura.

asg Agua absorbida por la sílica gel.

asgf cantidad de agua final adsorbida por la sílica gel.

av Agua que se dispone a vaporizarse.

avf	Agua que se dispone para vaporizarse cantidad final.
c	Cilindro.
cmat	Cilindro material.
came	Cilindro en el agua de medición.
efecrad	Efectiva de radiación.
esp	Espejos.
esprad	Espejos radiación.
f	Final.
fg	Vaporización del agua.
fgprom	Cambio de liquido a vapor promedio.
i	Inicial.
intagua	Interna del agua.
lv	liquido a vapor.
m	Medio.
mat	Material del modelo.
o	Se refiere a la capacidad limite de absorción.
p	Particular del agua.
Radt	Radiación total.
RE1,2,..	Radiación efectiva en cada espejo.
sg	Sílica gel.
sis	Sistema.
t	Tiempo.
Tr	Transferencia.
v	Vapor.
X	Se refiere a la posición de análisis y cambia con el tiempo.

SUPERÍNDICES

P Temperatura en el tiempo inicial.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN REFRIGERACIÓN ADSORTIVA USANDO EL PAR SÍLICA GEL-AGUA Y COMO FUENTE DE ENERGIA LA RADIACIÓN SOLAR*

AUTORES:

Carlos Augusto Ariza Santoyo
Luís Humberto León Carvajal. **

PALABRAS CLAVES:

Concentrador de energía solar, Adsorción, Refrigeración, vacío.

DESCRIPCIÓN:

Los objetivos de este proyecto fundamentalmente son el diseño y la construcción de un prototipo de refrigeración adsortiva utilizando como par sílica gel-agua, realizar un modelo matemático y comparar los resultados obtenidos del modelo con los esperados teóricos teniendo en cuenta el comportamiento de temperatura y presión (para análisis de refrigeración).

Las pruebas en el prototipo se realizaron con el par sílica gel agua porque: Es asequible económicamente, con indicador de saturación y tiene un buen poder de adsortividad, mantiene la adsorción por más tiempo y así mismo la refrigeración. El agua como refrigerante tiene un cambio bastante grande de energía interna al cambiar de fase (calor latente) y por lo tanto con la vaporización de poco agua se podría obtener un efecto refrigerativo apreciable. El modelo físico es una bomba de calor con dos recipientes sometidos a presiones de alto vacío, uno para el agua y otro para la sílica gel con sus respectivas válvulas. El sistema realizado es analizado por medio de un modelo matemático de transferencia de calor discreto.

Fue analizando el cambio de temperatura con respecto al tiempo cambiando la cantidad de sílica gel expuesta, las perdidas de calor del sistema la presión de vacío y el volumen del sistema, comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente la caída de temperatura es equivalente pero no en la misma cantidad, como resultado tenemos que la mejor forma de que el recipiente de agua sufra una mayor caída de temperatura es; el cambio de la resistencia térmica por materiales especiales con un alto poder de aislamiento, la presión de vacío así mismo tiene que estar por debajo de 0.02 mbar y una cantidad grande de sílica gel expuesta al vapor.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gelvez.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MODEL FOR THE EXPERIMENTATION IN ADSORTIVE REFRIGERATION USING THE COUPLE SÍLICA GEL - WATER AND AS SOURCE OF ENERGY THE SOLAR RADIATION*

AUTHORS:

Luis Humberto León Carvajal
Carlos Augusto Ariza Santoyo. **

KEY WORDS:

Concentrating of solar power, Adsorción, Refrigeration, emptiness

DESCRIPTION:

The objectives of this project are basically the design and construction of a Refrigeration adsortiva prototype using as a pair silica gel-water, perform a mathematical model and compare your results with the expected theoretical model taking into account the behavior of temperature and pressure (for analysis of refrigeration).

The tests were conducted on the prototype with the pair silica gel water because: It is economically affordable, with saturation indicator and has a good adsorptive power, maintains the adsorption longer and also cooling. Water as coolant has a pretty big change of internal energy to change phase (latent heat) and therefore with the little spray of water could get appreciable effect refrigeration. The physical model is a heat pump with two containers under pressure from high vacuum, one for water and another for the silica gel with their respective valves. The system is made analyzed using a mathematical model of heat transfer discreet.

He was analyzing the change in temperature over time by changing the amount of silica gel exposed, the loss of heat from the system of vacuum pressure and volume of the system, comparing the results with those obtained experimentally the fall in temperature is equivalent but not in the same amount as a result we have that the best way to the water that sustains a greater drop in temperature is, the change in the thermal resistance by special materials with a high power isolation, the vacuum pressure also has to be below 0.02 mbar and a large amount of silica gel exposed to steam.

* Degree Work.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gelvez.

INTRODUCCIÓN

La expansión demográfica y el incremento de la demanda frente a la explotación del gas y del petróleo hacen pensar en otro tipo de energías alternativas que permiten suplir estos inconvenientes, la energía solar y la energía eólica son dos tipos de energía importantes que podrían ayudar al déficit de disposición y explotación que presenta el tipo de energía convencional, pero aun debe enfrentar la niñez tecnológica en la que se encuentra, la cual seguramente se superara con el tiempo y el esfuerzo continuo en el desarrollo de estas nuevas fuentes energéticas. Otra causa negativa que tiene la explotación y consumo de energías convencionales como el petróleo, el carbón y el gas es el costo ambiental que generan produciendo efectos negativos como el calentamiento global. La utilización de energías alternativas (energías limpias) podría generar un avance en el proceso de reivindicación del hombre con el medio ambiente. A si mismo por razones económicas, ambientales y políticas, es necesario buscar desarrollo tecnológico para fuentes alternativas de energía que sean a la vez económicas, abundante, limpia y que preserven el equilibrio ecológico. La energía solar es una buena opción como energía alternativa debido a que puede ser aprovechada durante los 365 días del año, además es abundante y gratuita no contamina ni tiene desechos radioactivos.

En la refrigeración con energía solar los sistemas que mas se están desarrollando están basados en el fenómeno de la absorción y adsorción en una bomba de calor, diferentes sistemas, tipos de refrigerante, absorbente, y adsorbente han sido estudiados teniendo un amplio estudio de diferentes sistemas en los países mas desarrollados, en estos tipos de energía tales como España y la mayor parte de países mediterráneos, en la selección para el

modelo las pruebas se realizaron con el par sílica gel-agua ya que la sílica gel es asequible económicamente y tiene un buen poder de adsorptividad mantiene la adsorción por mas tiempo y así mismo la refrigeración, esta tiene un indicador de saturación que muestra cuando termina de adsorber agua cambiando de color morado a un color traslucido rosado, además este par permite realizar el análisis de un modelo muy sencillo, el agua como refrigerante tiene un alto salto de energía en el cambio de fase y por lo tanto del medio puede retirar una mayor cantidad de energía permitiendo la disminución la temperatura para poder observar el fenómeno, el modelo es una bomba con dos recipientes uno para el agua y otro para la sílica gel con sus respectivas válvulas.

El capítulo 1 tiene como fin los fundamentos de la radiación solar, el uso de los sistemas de refrigeración utilizando como fuente de energía el sol exaltado los mas importantes adsorción y absorción.

El capítulo 2 presenta los fundamentos físicos y termodinámicos de la refrigeración adsorptiva con el par sílica gel agua y la posterior regeneración del absorbente, el comportamiento de algunas variables físicas relevantes para el proceso, con la utilización de diferenciales y algunos estudios realizados.

El capítulo 3 contiene el desarrollo de un modelo matemático para la refrigeración y los cálculos para la construcción de un concentrador de energía solar, obteniendo así las graficas para su posterior análisis.

El capítulo 4 muestra la construcción del prototipo de la bomba de calor del par sílica gel-agua y el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas de enfriamiento.

1. ENERGIA SOLAR

El sol es la principal fuente de energía para los seres vivos y es la principal causa de los procesos climáticos en la tierra.

La energía total producida por el sol es aproximadamente $5,6 \times 10^{35}$ GeV1 ($8,971 \times 10^{25}$ Kw) cada segundo, la tierra recibe $1,73 \times 10^{14}$ Kw, recibe de forma directa el 31% y el 16% en forma difusa; el 53% es reflejada o absorbida en el camino.¹

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

¹ Fuente: "Solar Engineering of Termal Process", J.A Duffie and W.A Beckma, Capitulo 1, Wley & Sons, Inc. 1991

La energía producida por el Sol no se emite uniformemente a través de su superficie sino que sufre variaciones, con épocas de emisión máxima y otras de mínima, con un período aproximado de 11 años. Este período se conoce como el Ciclo Solar. El número de manchas solares en el sol no es constante y cambia en el período de 11 años en promedio, estando la actividad solar directamente relacionada con este ciclo².

1.1 RADIACION SOLAR

Es importante tener en cuenta, medir la radiación solar para comodidad en nuestro medio como en casos de predicción del clima, implicaciones de la salud y aplicaciones en el sector agrícola e ingeniería.

La constante solar definida como energía proveniente del sol, por unidad de tiempo, recibida por una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media tierra-sol, en el exterior de la atmósfera indica un valor medio de 1367 W/m², con una incertidumbre del orden de 1%³. Las variaciones en la radiación extraterrestre ocurren por la actividad de manchas solares y por la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol la cual produce una pequeña dispersión en el valor mencionado con anterioridad.

² Fuente: <http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm>

³ Fuente: La WRC (World Radiation Center) adopto el valor de 1367 W/m².

1.2 ATENUACION DE LA RADIACION SOLAR

La radiación solar al pasar por la atmósfera sufre un proceso de debilitamiento por la dispersión (debida a los aerosoles), la reflexión (por la nubes) y la absorción (por las moléculas de gases y por partículas en suspensión), por lo tanto la radiación solar reflejada o absorbida por la superficie terrestre (océano o continente) es menor a la del tope de la atmósfera. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida, el tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación. La superficie de la tierra (suelos y océanos) y también la atmósfera, absorbe la energía solar y la vuelve a irradiar en forma de calor en todas direcciones.

1.2.1 Dispersión.

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido, cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que cuanto más corta sea ésta, tanto mayor será la dispersión. Moléculas de gas con tamaños relativamente pequeños comparados con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás⁴. Aerosoles cuyos tamaños son comparables o exceden a las longitudes de onda de la radiación incidente, hacen que ésta no se disperse en todas las direcciones sino mayormente hacia adelante⁵.

⁴ Este fenómeno es conocido como dispersión de Rayleigh.

⁵ Fenómeno llamado dispersión de Mie.

1.2.2. Reflexión (Albedo).

La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina Albedo. El albedo planetario es en promedio de un 30%. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera.

1.2.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión. La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de forma tal, que absorben la energía selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro. La atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción o es transparente en la parte visible del espectro, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del sol y el principal responsable de este fenómeno es el ozono, así mismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso.

1.3 RADIACION INSIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

La radiación que incide sobre la superficie de la tierra se distribuye de la siguiente manera: de la radiación total incidente, 173.000Teravatios, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%)⁷. Relativamente, muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja.

El efecto de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera se muestra en la figura 4. La radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra se clasifica en radiación directa, difusa y global.

⁶ Fuente: <http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm>

⁷ Fuente: Atlas de la radiación solar en Colombia.

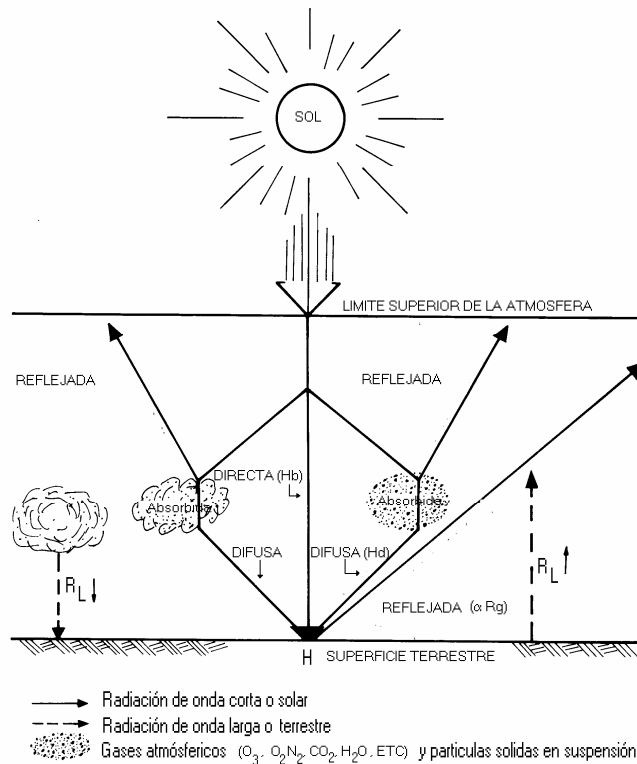


Figura 1. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.
(Fuente: Atlas de radiación solar).

1.3.1 Radiación directa (H_b). Es la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin haber sufrido difusión, ni reflexión alguna. (Ver figura 2).

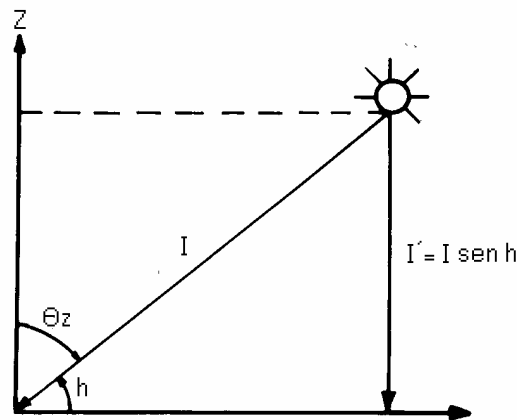


Figura 2. Componente directa de la radiación solar.

Sobre la superficie de la tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores:

- a) Constante solar.
- b) Altura del sol sobre el horizonte (h).
- c) Transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

1.3.2 Radiación difusa (H_d). Es la componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera en su camino hacia la tierra e interactuar con las nubes, es difundida en todas las direcciones; el flujo con el cual esta energía incide sobre una superficie horizontal por segundo es lo que llamamos radiación solar difusa. También es definida como la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal desde todos los lugares de la atmósfera diferente de la radiación

solar directa. Cuando no hay nubes en el cielo, la radiación difusa se produce por medio del proceso de difusión a través de partículas atmosféricas⁸.

Sobre la superficie de la tierra la radiación difusa depende de:

- a) La altura del Sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa.
- b) Cantidad de partículas en la atmósfera. A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente aumenta con la contaminación.
- c) Nubosidad. Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.
- d) Altura sobre el nivel del mar. Al aumentar la altura, el aporte de la radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

1.3.3 Radiación global (H). La radiación global es toda la radiación que llega a la tierra que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. El aporte de cada componente a la radiación global, varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

Su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al sol y sin ningún tipo de sombra; de esta manera⁹.

⁸ La radiación solar difusa diaria que se da entre las seis de la mañana y las seis de la tarde oscila entre 300 y 5.500 W*h/m² al día.

⁹ La radiación solar global diaria es el total de la energía solar en el día y sus valores típicos están dentro del rango de 1 a 35 MJ/m² (mega joules por metro cuadrado).

El aporte de cada componente a la radiación global, varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

1.4 RADIACION SOLAR DIRECTA

La radiación solar directa se utiliza para efectos de aprovechamiento en paneles y colectores solares, estos elementos son utilizados para diferentes formas de energía como la energía térmica (colectores y algunos paneles) y la energía eléctrica (paneles fotovoltaicos) por esa razón es importante determinar la ubicación y la orientación de ellos para el aprovechamiento máximo de la energía solar.

1.4.1 Dirección de la radiación solar directa. Se caracteriza mediante el ángulo de incidencia el cual depende de varios factores como el día del año, la hora, el sitio y la orientación de la superficie en consideración.

Se debe tener en cuenta las siguientes variables:

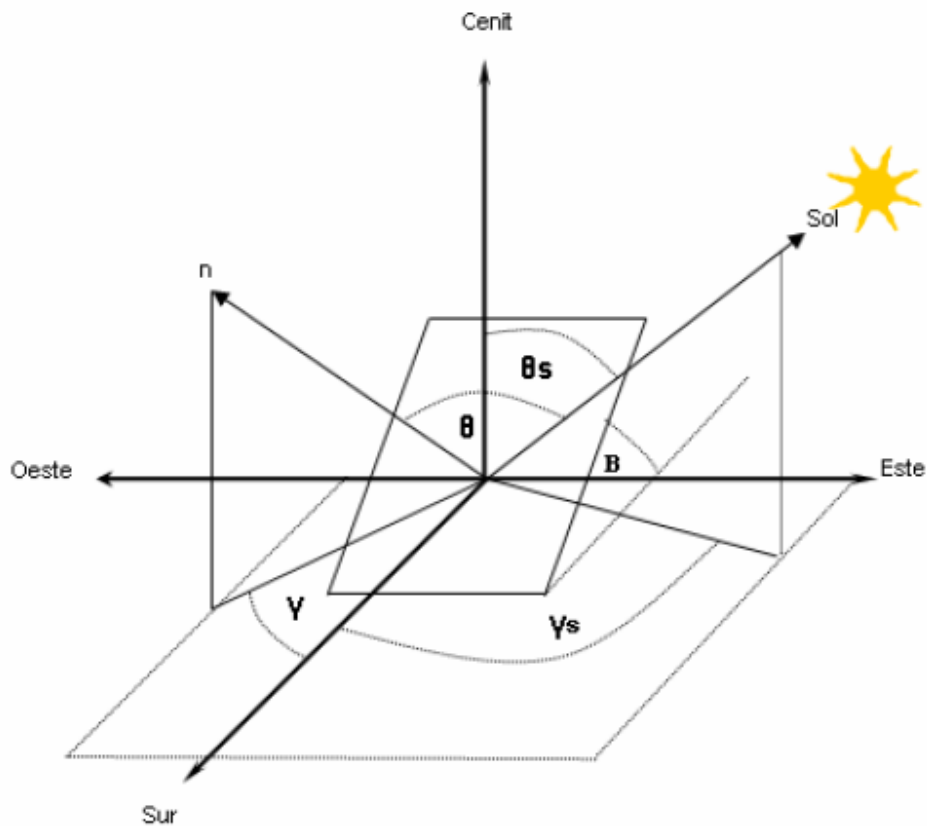


Figura 3: factores que influyen en la radiación solar directa.
(Fuente: Adaptada de "Procesos Termosolares en baja, media y alta temperatura", Fernández Pedro, Capítulo 1)

Angulo de incidencia (θ): ángulo entre la dirección de la radiación directa sobre una superficie determinada y la normal a la misma.

Latitud (ϕ): ubicación angular del sitio al norte o sur del ecuador, siendo el norte positivo, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

Declinación (δ): posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador, norte positivo, $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

Inclinación (β): ángulo entre el plano de la superficie en consideración y la horizontal, $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

Azimut de la superficie (γ): ángulo de la desviación entre la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie y el meridiano local, siendo el sur, y oeste positivo, $-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Angulo horario (ω): desplazamiento angular del sol hacia el este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a razón de 15° por hora, mañana positivo, tarde negativo.

Angulo Cenital (θ_z): ángulo entre la vertical y la dirección de la radiación solar.

Azimut del sol (γ_s): desplazamiento angular del sur de la proyección en un plano de la dirección de la radiación solar, hacia el oeste es positivo.

1.4.2 Ángulos para seguimiento de la trayectoria del sol. Algunos colectores solares precisan de un sistema de seguimiento de la trayectoria del sol, para minimizar el ángulo de incidencia de la radiación solar directa y de este modo aumentar la energía captada.

Estos sistemas se clasifican de acuerdo a su movimiento, que puede ser alrededor de uno o dos ejes. A continuación se mencionan los casos más comunes de sistemas de seguimiento.

- ✓ Rotación alrededor de un eje horizontal este-oeste con ajuste continuo.

- ✓ Rotación alrededor de un eje horizontal norte-sur con ajuste continuo.
- ✓ Rotación alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje de la tierra con ajuste continuo.
- ✓ Rotación alrededor de dos ejes, con ajuste continuo.

Para ver una descripción mas detallada, véase DUFFIE &BECKMAN, 1991.

1.5 RADIACION SOLAR EN BUCARAMANGA

En Bucaramanga se tienen datos de radiación total media a partir de una superficie horizontal tomados en estaciones metereologicas, los cuales muestran la radiación total promedio en W/m² como la suma de la radiación directa del sol y la difusa del cielo. Estos datos fueron tomados por la CDMB, estación meteorológica de la UIS durante el año 2003. La siguiente tabla muestra en resumen el resultado de la radiación solar promedio directa (H_b), radiación solar promedio difusa (H_d) y radiación promedio total (H) durante el año 2003, cálculos tomados del proyecto de grado de Alfonso Sánchez y Leowaldo Santos Amaya.

MES	H _d (KW-h/m ²)	H _b (KW-h/m ²)	H (KW-h/m ²)
ENERO	2,34	2,54	4,88
FEBRERO	2,51	2,39	4,9
MARZO	2,75	2,11	4,86
ABRIL	2,76	2,48	5,24
MAYO	2,48	2,68	5,16
JUNIO	2,58	2,34	4,92
JULIO	2,67	1,67	4,34

AGOSTO	2,76	2,2	4,97
SEPTIEMBRE	2,77	1,67	4,44
OCTUBRE	2,55	1,71	4,26
NOVIEMBRE	2,42	1,97	4,39
DICIEMBRE	2,4	2,14	4,54

Tabla 1: radiación en Bucaramanga

(Fuente: Evaluación del potencial para la producción mediante aprovechamiento de la energía solar a través de sistemas de colectores de concentración cilíndrico parabólico y desarrollo de un prototipo a pequeña escala, SÁNCHEZ Alfonso y SANTOS Leowaldo, UIS, 2008.)

1.6 ENERGIA SOLAR COMO ENERGIA ALTERNATIVA

La energía solar ha sido motivo de múltiples investigaciones, y sin necesidad de técnicas complicadas, cada vez encuentra más aplicaciones sumamente prácticas y atractivas. Se puede convertir en energía mecánica, eléctrica o química para ser utilizada en una gran diversión de campos, como la producción de electricidad, desalación de agua, bombeo, riego, cocción, conservación de alimentos por refrigeración, secado de productos de pesca frutas y verduras, calentamiento de agua, generación de vapor, calefacción y aire acondicionado, comunicaciones y una infinidad de usos industriales adicionales.

Actualmente el uso mas común de la energía solar, es en el área térmica, en aplicaciones de calentamiento de agua para el uso domestico o de albercas, utilizando colectores de placa plana de eficiencia de captación aceptable. En

realidad los colectores planos son los dispositivos térmicos de aprovechamiento solar más comunes por su fácil construcción y bajo costo, sin embargo, presenta fuertes limitaciones cuando se pretende lograr temperaturas mayores de 90° C. Sin embargo, existe la tecnología como para aprovechar el verdadero potencial de la energía solar, que viene siendo la producción de una energía entre los 100 y 600° C, la cual puede ser utilizada, en equipos de refrigeración y aire acondicionado por absorción avanzados, producción de energía termoeléctrica y un muchas mas aplicaciones en procesos industriales

1.6.1 Sistemas de captación solar:

La función de las tecnologías de colectores solares térmicos es absorber la radiación solar incidente sobre el colector y transferir dicha energía. Existe una gran variedad de colectores solares y normalmente son clasificados según el grado de concentración de energía solar.

Para los colectores térmicos suele definirse el grado de concentración solar, con base en las características geométricas:

$$C=A_c/A_t$$

Donde:

C: Índice de concentración

A_c: Área de captación solar del concentrador

A_t: Área de recepción o absorción solar del colector.

Otra forma de definir la concentración es con la relación entre la intensidad del sol y la que se hace incidir sobre el receptor/absorbedor. De acuerdo con

lo anterior, se puede hacer una clasificación de los colectores solares térmicos en dos grandes grupos:

- Colectores Planos.
- Colectores solares de concentración.

1.6.1.1 Colectores solares planos: Colector solar de placa plana: Un captador solar de placa plana esta formado por una superficie orientada al sol que absorbe sus rayos y convierte la radiación solar en calor. Los colectores de placa plana tienen pérdidas de calor importantes, dado que si bien el vidrio no deja escapar el calor en forma de radiación infrarroja, este aumenta su temperatura por el efecto del aire caliente debido a la convección, transmitiendo el calor al exterior por conducción y convección cuando la temperatura de los alrededores es mas baja.

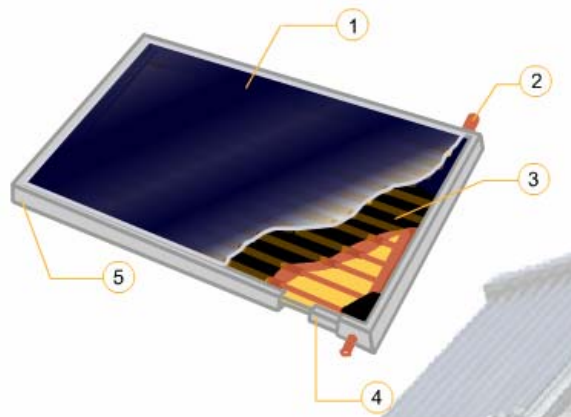


Figura 4: Colector solar plano.

(Fuente: SILVA P, Manuel. sistemas termosolares de concentración)

1. Cubierta transporte de vidrio de unos 2mm
2. Tubo cabezal
3. Placa absorbente pintada de negro con unos conductos para la circulación de fluido

4. Material aislante en la parte inferior y en las superficiales laterales del panel
5. Caja protectora o carcasa que protege y da rigidez al conjunto

❖ **Colectores de placa plana con aislamiento térmico transparente:** Se ha introducido una serie de mejoras tendientes a aumentar la eficiencia térmica de los colectores, dando origen a nuevos colectores solares, tal es el caso de los colectores de placa plana con aislamiento térmico transparente, que con el simple hecho de poner un panel que bloquee la convección natural entre la placa absorbidora y la cubierta, han logrado mayores eficiencias y temperaturas.

❖ **Colectores de tubos evacuados:** Con el mismo fin de aumentar la eficiencia y obtener mayores temperaturas, fueron desarrollados los colectores de tubos evacuados, los cuales pueden contar con un alto aislamiento de vacío (10^{-3} mbar) o con gas de baja conductividad como el xenon. Con colectores de placa plana con superficie absorbente selectiva y dos cubiertas se puede lograr temperaturas hasta de 90° C, con una eficiencia entre 30 y 45 por ciento, con los TIM y tubos evacuados se supera los 150° C. con estos equipos podemos satisfacer fácilmente las necesidades térmicas de los sistemas de enfriamiento por adsorción, enfriamiento por desecantes y las unidades por absorción de simple y doble efecto.

1.6.1.2 Colectores solares de concentración. Se utilizan espejos que concentran la radiación solar, por lo general sobre un foco determinado a

través de una línea denominada eje focal, donde se ubica el receptor o absorbedor de la radiación, por el cual se hace circular el fluido caloportador. La convección varía según sean las características constructivas, desde valores muy pequeños del orden de dos con sistemas de concentradores muy simples, hasta valores de 1500 o más, con sistemas automáticos de seguimiento sofisticado de gran precisión.

- ❖ **Colectores parabólicos compuestos (CPC).** Representan una de las mejores opciones para el enfriamiento termo solar, ya que puede ser estacionario, coleccionar radiación difusa y directa, son fáciles de construir y de bajo precio. En forma estacionaria se puede obtener temperaturas entre 60 y 230° C, con concentraciones entre dos y cinco.

- ❖ **Concentradores de seguimiento solar:** Pueden alcanzar temperaturas hasta de 280° C con concentraciones alrededor de 15. Los colectores de concentración lineal como los que utilizan un canal parabólico en forma de espejo y un tubo ubicado en el foco de la parábola, por el cual circula el fluido a calentar, por lo regular su concentración varía de 15 a 40 y la temperatura que suele alcanzar el fluido es entre 60 y 300° C, dependiendo de la configuración del sistema de canal parabólico. Estos dos últimos colectores de concentración satisfacen muy bien las necesidades energéticas de los sistemas de enfriamiento termo solar avanzados, como lo son ciclos de absorción tipo GAX, ciclos bromuro de litio-agua de triple efecto, entre otros que demandan altas temperaturas para su operación.

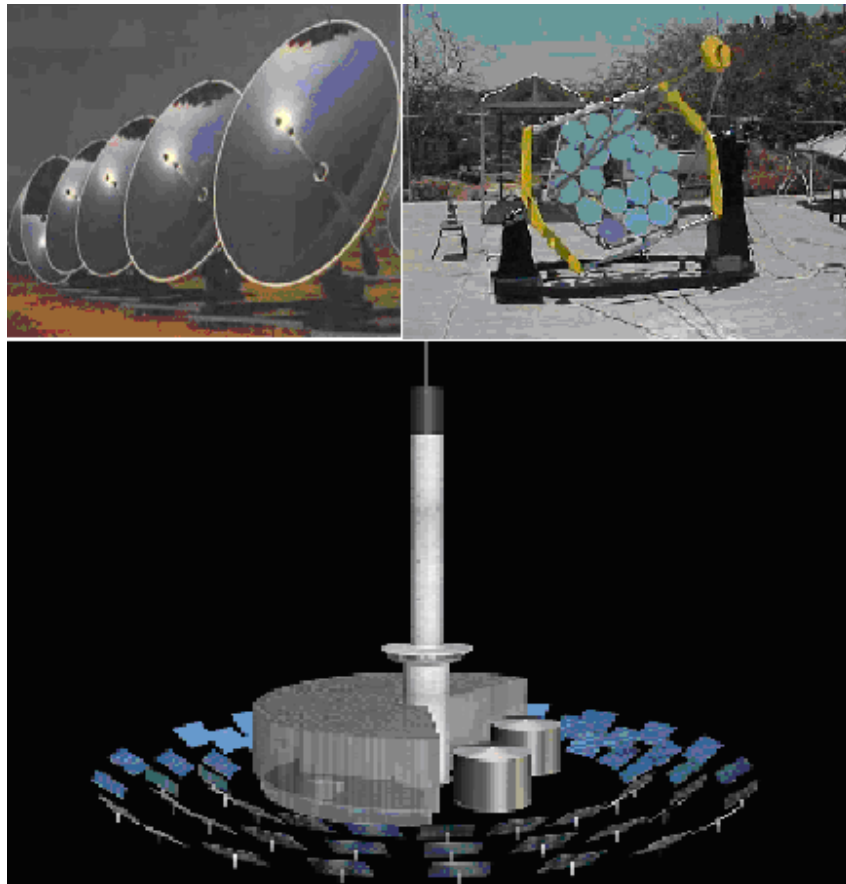


Figura 5: Concentradores solares.

(Fuente: SILVA P, Manuel. sistemas termosolares de concentración)

		TIPOS DE COLECTORES		RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN PARA INSOLACIÓN DIRECTA "C"	INTERVALO DE TEMPERATURA OBTENIDA T(°C)	APLICACIONES	
		NOMBRE	DIAGRAMA ESQUEMATICO				
ESTACIONARIO		Estanque solar no convectivo		Absorbedor de placa	$C \leq 1$	$27 < T < 87$	Generación de energía y procesos de calentamiento
		Absorbedor de placa plana			$C \leq 1$	$27 < T < 90$	Calentamiento de agua, aire, enfriamiento solar, etc.
		Absorbente invertido, reflector parabólico compuesto			$1 \leq C < 3$	$47 < T < 157$	Calentamiento de agua y de procesos, cocinas solares
SEGUIDOR SOLAR	Un eje	Tubos evacuated		Absorbedor tubular	$C \leq 1$	$47 < T < 187$	Calentamiento de agua y enfriamiento solar activo
		Reflector parabólico compuesto			$1 \leq C < 5$	$67 < T < 237$	
		Reflector parabólico			$5 \leq C \leq 15$	$67 < T < 287$	
	Dos ejes	Reflector Fresnel		Absorbedor puntual	$15 < C < 40$	$67 < T < 287$	Calentamiento de procesos y generación de vapor
		Reflector cilíndrico			$10 < C < 40$	$67 < T < 267$	
		Reflector de plato parabólico			$10 < C < 50$	$67 < T < 267$	
		Reflector de plato esférico			$100 < C < 1000$	$67 < T < 927$	
		Campo de heliostatos			$100 < C < 300$	$67 < T < 727$	
					$100 < C < 1500$	$127 < T < 2727$	

Figura 6: Tipos de colectores de energía solar
(Fuente: Tecnología en la UABC por Benjamín Valdez Sals)

1.6.2 Enfriamiento solar:

La refrigeración es utilizada para satisfacer simultáneamente la calefacción y enfriamiento en el sector residencial, industrial y comercial. La demanda de aire acondicionado y de refrigeración esta en constante aumento debido al sobre-poblamiento y calentamiento del planeta por lo tanto este tipo de energías tiene mucho futuro. Para aprovechar la energía térmica proveniente de la fuente solar es necesario utilizar los sistemas de captación (SCS), los cuales, dependiendo del nivel de temperatura que producen puede ser clasificados en colectores solares planos con una y dos cubiertas (hasta 95° C), colectores solares evacuados (hasta 180° C) y colectores de concentración solar (hasta 3.000° C). Desde el punto de vista técnico y de acuerdo con estudios presentados.

Dado que la producción de enfriamiento solar se puede realizar utilizando energía solar térmica o electricidad solar, los sistemas se pueden clasificar en dos grandes grupo; sistemas termosolares que están formados por un arreglo de colectores solares térmicos y una maquina de enfriamiento activada térmicamente y los sistemas termosolares compuestos por un arreglo de módulos fotovoltaicos y una maquina de enfriamiento operada con energía eléctrica.

Los tipos básicos de tecnologías de enfriamiento solar, que pueden ser utilizadas tanto para climatización como para refrigeración son:

Enfriamiento por absorción: Se utiliza la energía solar térmica para vaporizar o liberar el refrigerante de la solución absorbente.

Enfriamiento por adsorción. Se utiliza la energía solar térmica para refrigerar el lecho sólido, con la adición de calor se vaporiza o libera el refrigerante del adsorbente.

Enfriamiento evaporativo con desecante. Se utiliza la energía solar térmica para regenerar (secar) el desecante sólido o líquido.

Enfriamiento por eyecto-compresión. Se utiliza la energía térmica para calentar y evaporar el refrigerante.

Enfriamiento por compresión de vapor. Se utiliza la energía solar térmica para activar un motor de calor de un ciclo Ranking.

Enfriadores evaporativos, acondicionadores de aire y bombas de calor. Que se acciona con energía eléctrica de los sistemas solares fotovoltaicos.

1.6.2.1 Futuro en sistemas de refrigeración con energía solar.

La energía solar térmica utilizada para refrigeración descongestiona la red de distribución eléctrica y extrae un mayor rendimiento de las instalaciones solares, que podrían ser utilizadas en el territorio colombiano en zonas calidas principalmente como aire acondicionado y para la refrigeración de alimentos en sitios de donde carecen de energía eléctrica. En la actualidad, hay varias tecnologías que aprovechan la energía calorífica. Las máquinas de refrigeración por absorción y por adsorción son las más utilizadas y cuentan con las mayores perspectivas de desarrollo futuro.

La adsorción es un fenómeno natural en el cual los átomos o moléculas de una sustancia se concentran en la superficie de otra. Este fenómeno difiere de

la absorción en el hecho que en esta última las sustancias absorbidas entran en la red cristalina del material absorbente. La adsorción emplea la atracción física entre el vapor de una sustancia y los lugares activos de la superficie adsorbente mientras que la absorción emplea una reacción química para capturar el vapor. Los fenómenos de adsorción y absorción se producen sobre sustancias líquidas y sólidas.

1.6.3 Refrigeración por absorción.

Su funcionamiento se basa en las reacciones físico-químicas entre un refrigerante y un absorbente. Son accionadas por una energía térmica, que en el caso de la energía solar es agua caliente. El tipo de captadores óptimos son los planos selectivos, de concentrador (CPC) o de vacío.

Este método de refrigeración está reservado casi universalmente a grandes instalaciones comerciales. Fundamenta su uso en el hecho de que algunas sustancias conocidas como absorbentes, tienen gran avidez por absorber vapores de otras, conocidas como refrigerantes, generando la disminución de presión suficiente para la evaporación del refrigerante y el consecuente enfriamiento. En la práctica se usan más comúnmente los sistemas:

- Agua-amoniaco, donde el agua es el absorbente y el amoniaco el refrigerante.
- Bromuro de litio-agua, donde el bromuro de litio es el absorbente y el refrigerante el agua

El esquema siguiente representa un sistema simplificado de refrigeración de este tipo.

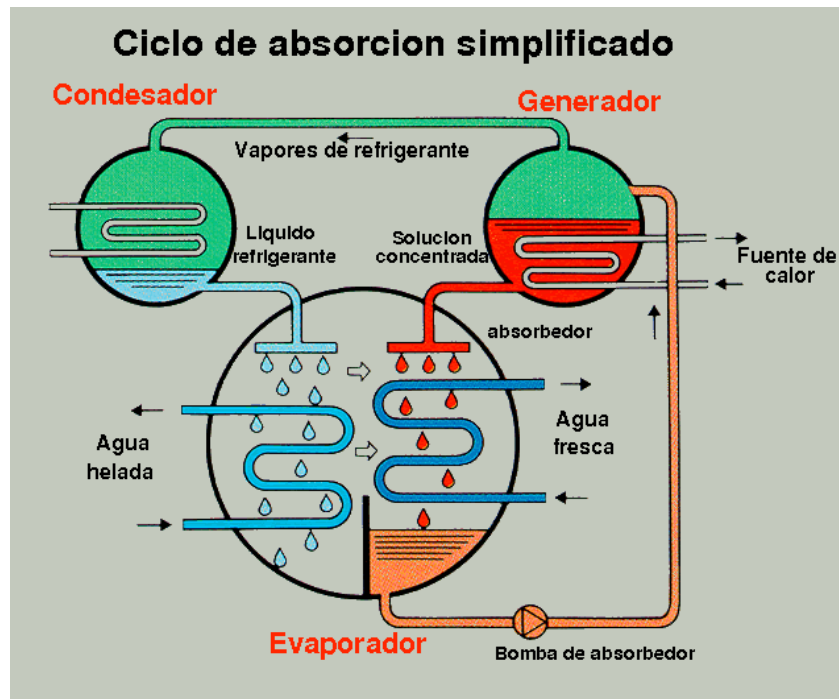


Figura 7: ciclo de absorción modificado.
 (Fuente: <http://www.sabelotodo.org/aparatos/refrigeracion.html>)

En el dibujo pueden apreciarse tres componentes básicos:

1. Condensador
2. Evaporador
3. Generador

Tenemos como absorbente agua y el refrigerante amoníaco. El agua que proviene del generador se inyecta en forma de llovizna dentro de la cámara del evaporador, esta agua absorbe con gran avidez los vapores de amoníaco que están dentro del evaporador, la presión se reduce, generando vacío, y esto hace que en el lado izquierdo del evaporador donde está siendo

inyectado el refrigerante se produzca su evaporación con el consecuente enfriamiento. Un conducto que transporta agua colocado en esa zona proporciona agua helada para ser utilizada como elemento enfriador externo de uso múltiple. El agua con el amoníaco disuelto se acumula en el fondo del evaporador y es bombeada de nuevo al generador. Un calentador externo suministra suficiente calor al agua como para que se produzca una suerte de destilación y se separe el amoníaco en forma de vapores, regenerándose de nuevo el agua casi pura para volverse a utilizar en el proceso. Los vapores de amoníaco generados en el generador se llevan al condensador, entran en contacto allí con un elemento frío representado por el conducto serpenteante y se condensan de nuevo a líquido, para ser inyectado de nuevo al evaporador. El conducto tortuoso representado del lado derecho por el que circula agua fresca, sirve para enfriar el absorbedor procedente del generador donde ha sido calentado para la separación del amoníaco. Obsérvese que el proceso se realiza de manera continua en un ciclo cerrado sin pérdidas de absorbedor o refrigerante.

- **Utilizar enfriadores continuos**, similares en su construcción y funcionamiento a las unidades convencionales de gas o de fluidos condensables; la energía se suministra al generador desde el sistema (colector solar almacenamiento auxiliar), siempre que las condiciones dentro del edificio indiquen la necesidad de refrigeración.
- **Utilizar enfriadores intermitentes**, similares a los empleados en la refrigeración de alimentos, comercializados desde hace años en zonas rurales, antes de que se extendiese la refrigeración por compresión y la electrificación. No se utilizan enfriadores intermitentes para acondicionamiento de aire, ni tampoco se han hecho grandes estudios

que aconsejen su posible aplicación al acondicionamiento de aire por energía solar.

El empleo de la energía solar, en la refrigeración, se pueden hacer mediante colectores de placa plana sistemas de bromuro de litio-agua, requiere agua para su refrigeración por lo tanto este sistema puede llegar a requerir el uso de una torre de enfriamiento.

1.6.4 Refrigeración por adsorción:

La adsorción es la capacidad que tienen algunas sustancias de adsorber y retener dentro de su estructura morfológica a moléculas de otras sustancias, en una especie de "trampa laberíntica" donde la molécula "visitante" se introduce espontáneamente, pero luego no puede salir y queda retenida. Generalmente un calentamiento posterior, hace que la molécula retenida se libere y el elemento adsorbedor quede "limpio". Hay muchas sustancias con esa capacidad, pero las más utilizadas en la práctica son el **carbón vegetal activado**, las zeolitas, las tierras de diatomeas, sílica gel y otras. Como los procesos de absorción y adsorción son en principio muy similares en cuanto a su resultado neto, la refrigeración por adsorción solo se diferencia de la de por absorción en la naturaleza de las sustancias adsorbedoras, el refrigerante y sus temperaturas de trabajo. Este método de refrigeración se ha considerado recientemente como una alternativa práctica para la utilización de fuentes renovables de energía en la producción de frío, y existen prototipos en uso en diferentes países, utilizando la energía solar diurna, para producir agua fría durante la noche.

Para la refrigeración se utilizan adsorbentes sólidos. En el ciclo la unidad consiste en una o más cámaras de adsorción donde se almacena el adsorbente, un evaporador y un condensador.

El sistema de regeneración intercambia calor con un foco a alta temperatura y un foco frío a temperatura intermedia. El condensador intercambia energía con la fuente de calor a temperatura media. El vapor de agua es transportado entre la cámara de adsorción, el condensador y el evaporador.

El ciclo en la cámara se realiza de forma básica en cuatro etapas:

1. Calentamiento y presurización (fig 1, 2). Durante este periodo la cámara de adsorción se mantiene estancada mientras se calienta a partir de energía solar térmica. La temperatura del adsorbente aumenta, incrementando su presión desde la correspondiente al vapor hasta la del condensador. Este proceso es el equivalente a la compresión en los ciclos que funcionan de aquella forma.

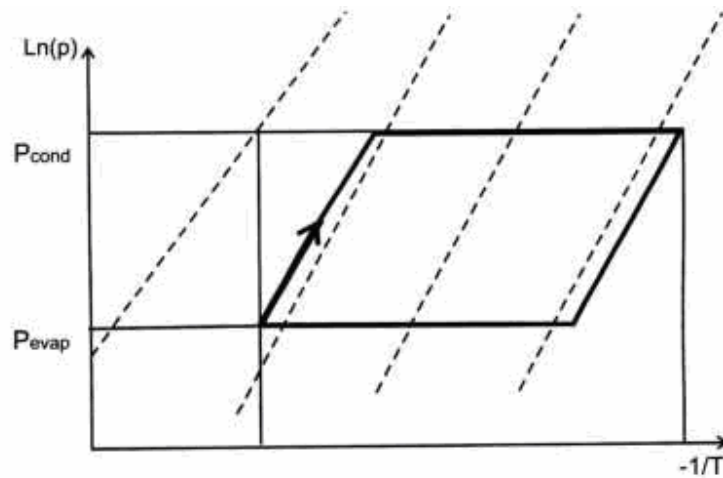


Figura 8: Diagrama de Clapeyron de la etapa de calentamiento y presurización.

(Fuente: Tecnología en la UABC por Benjamín Valdez Sals)

2. Calentamiento y desorción (fig) en esta etapa la cámara continúa recibiendo energía térmica mientras permanece el paso hacia el condensador abierto. Este impone su presión de trabajo. La temperatura del absorbente aumenta, produciéndose la desorción. El vapor llega al condensador y la energía térmica es cedida a la fuente de temperatura media.

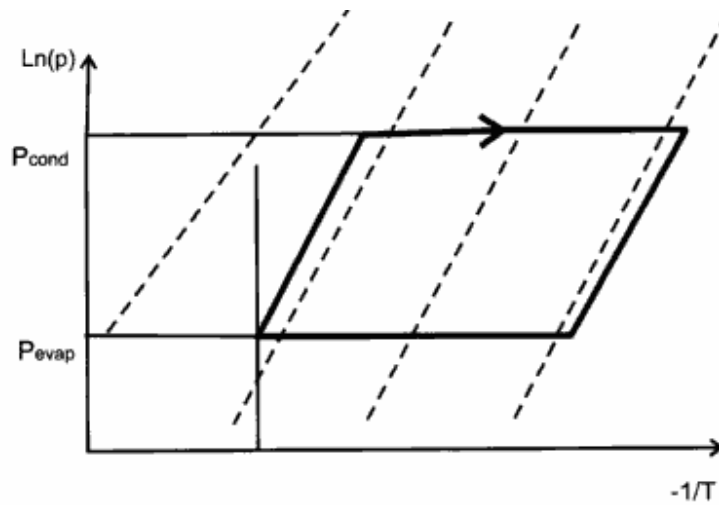


Figura 9: Diagrama de Clapeyron de la etapa de calentamiento y desorción.
(Fuente: Tecnología en la UABC por Benjamín Valdez Sals)

3. Enfriamiento y presurización (fig). En este proceso la cámara de adsorción se enfría mientras permanece cerrada. La temperatura del adsorbente disminuye, lo que induce una disminución de la presión desde la presión de condensación hasta la presión del evaporador. Este periodo es análogo a la expansión en el ciclo de compresión mecánica clásico.

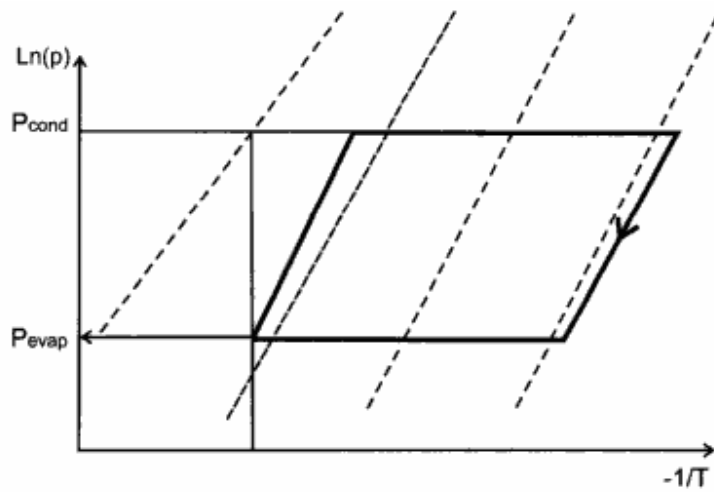
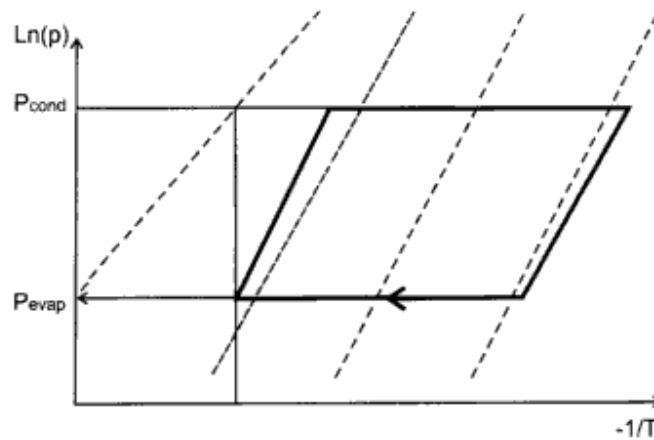


Figura 10: Diagrama de Clapeyron de la etapa de enfriamiento y presurización.

(Fuente: Tecnología en la UABC por Benjamín Valdez Sals)

4. Enfriamiento y adsorción (fig). la etapa se caracteriza por la cesión continua de energía desde la cámara mientras se mantiene abierta la válvula que lo une al evaporador. El calor latente de vapor es suministrado por la fuente a baja temperatura que será el fluido frío.



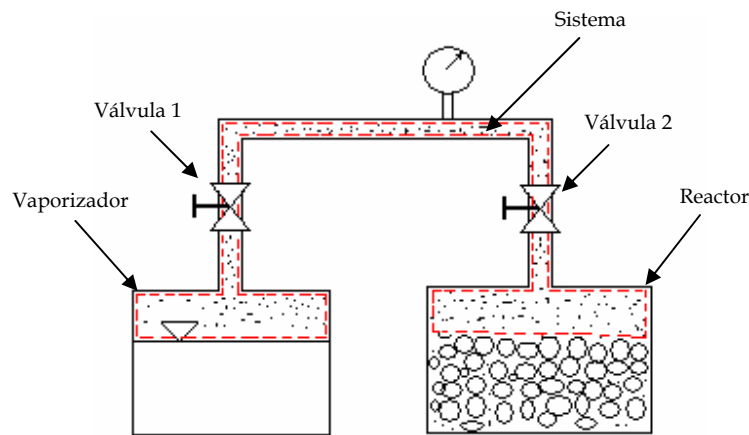
**Figura 11: Diagrama de Clapeyron de la etapa de enfriamiento y adsorción.
(Fuente: Tecnología en la UABC por Benjamín Valdez Sals)**

El ciclo cerrado de refrigeración por absorción es intermitente y la producción de frío no es continua. Este solo se puede en la etapa 4 del ciclo. Cuando se dispone de diferentes cámaras que operan desfasadamente la producción de frío puede ser prácticamente constante. Si toda la energía requerida para calentar la cámara es suministrada por la fuente de calor tendremos un ciclo de efecto simple. En aplicaciones sencillas el COP conseguido con máquinas que trabajan según este ciclo oscila entre 0,3 y 0,4.

Actualmente se encuentran dispositivos experimentales y comerciales que emplean diferentes pares absorbente-refrigerante según la temperatura de refrigeración que se pretenda alcanzar. La tabla muestra los pares más utilizados junto a la temperatura mínima de refrigeración.

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS Y TERMODINÁMICOS DE LA REFRIGERACIÓN ADSORTIVA CON EL PAR SÍLICA GEL - AGUA Y LA POSTERIOR REGENERACIÓN DEL ADSORBENTE.

El sistema básico de refrigeración se compone de: un recipiente donde se almacena el agua para la vaporización (vaporizador), un recipiente donde se contiene la sílica gel (reactor) una bomba de vacío, y un espacio comprendido entre el vaporizador y el reactor que entrará a llenar el agua vaporizada (sistema), el funcionamiento es el de una bomba de calor donde se retirara energía del agua que se dispone para la vaporización y del material de que esta construido el vaporizador y se transportara por medio del vapor hacia la sílica gel provocando en esta ultima un calentamiento (ver figura 12).



**Figura 12: Esquema de los componentes del sistema de refrigeración
(Fuente: autor)**

El funcionamiento físico, en forma general, se produce al someter el agua a la presión de vacío lo cual provoca una vaporización forzada, debido a que el vapor requiere una cantidad determinada de energía para llevar a cabo este

cambio de fase hace que los elementos constitutivos del vaporizador se enfríen, el vapor producido llena el espacio libre aumentando así la presión y modificando a su vez la rata de vaporización de agua, este fenómeno se controla adicionando la sílica gel ya que esta al entrar en contacto con el vapor, por a su afinidad química, provoca la adsorción, en la cual el vapor es condensado y atraído al interior del grano de sílica y encapsulado en los poros de la misma. Por tal, esta adsorción ejerce una influencia positiva en la presión del sistema, haciendo que esta no se eleve tan rápidamente. Para el análisis termodinámico y energético del proceso se requiere hacer un balance de masa en el sistema general, un análisis de la vaporización y uno de la adsorción del vapor, para determinar el comportamiento de la presión. Se hace necesario también hacer un balance de energía del sistema y de las partes constitutivas mencionadas con anterioridad poniendo especial atención al vaporizador que es donde se producirá el enfriamiento, esto con el fin de cumplir los objetivos del proyecto el cual se basa en la capacidad refrigerativa del sistema total.

Como podemos prever el proceso de enfriamiento quedará limitado por las siguientes variables: presión de vacío inicial, área de adsorción de la sílica gel, volumen del sistema y las perdidas de calor. El tiempo será el parámetro de medida de todas estas variables.

2.1 BALANCE DE MASA

En el proceso de refrigeración por adsorción de agua en sílica gel, se produce una transferencia de masa impulsada por la presión de vacío del sistema la cual vaporiza parte del agua que se encuentra en el vaporizador, así el vapor

de agua llena el espacio libre poniéndose en contacto con la sílica gel la cual la adsorbe debido a la diferencia de concentraciones existente entre la capa limite que se forma con la superficie de la sílica y su interior.

Parte de esta agua entra a llenar el espacio comprendido entre el vaporizador y la sílica gel, según el volumen de control en el vaporizador el balance de masa esta dado por (ver figura 13):

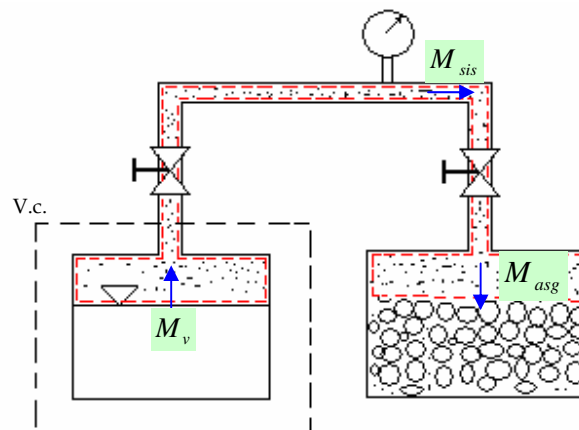
$$M_v = M_{sis} + M_{asg} \quad (2.1)$$

Donde:

M_v : Masa que se vaporiza

M_{sis} : Masa que queda remanente en el sistema

M_{asg} : Masa que absorbe la sílica gel.

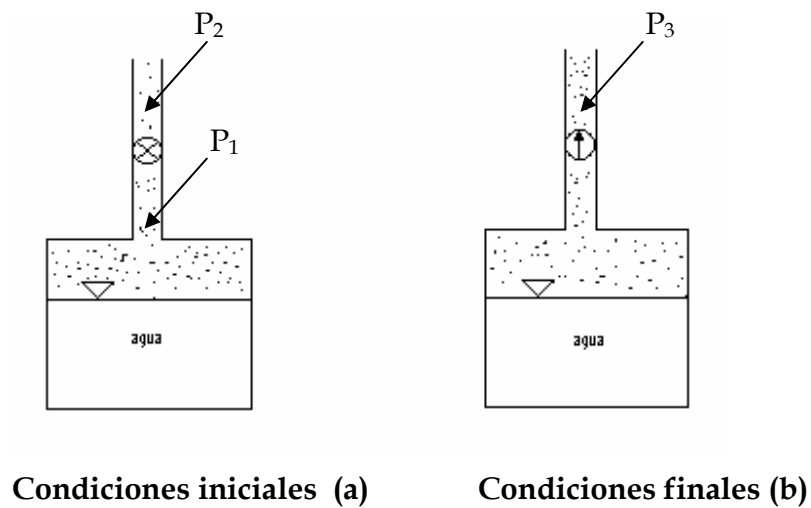


**Figura 13: Esquema para el balance de masa
(Fuente: autor)**

Las tres masas no son constantes en el tiempo por tal razón habrá que relacionarlas a través del flujo.

2.1.1 Masa vaporizada

En las condiciones iniciales la masa vaporizada M_v podría considerarse que depende principalmente de la diferencia de presiones $P_2 - P_1$ y en menor medida de la temperatura de la masa de agua y de la transferencia de calor del medio circundante (ver figura 14 a).



**Figura 14: Interacción de la presión con la tasa de vaporización
(Fuente: Autor)**

El agua interactúa molecularmente cohesionándose entre sí, generando fuerzas moleculares que deben soportar el esfuerzo que la diferencia de presiones provoca, así, parte del agua se vaporiza para compensar las bajas presiones hasta las condiciones finales y lograr una presión de equilibrio P_3 , (ver figura 14 b) en otras palabras si retiramos el vapor de agua y el aire del sistema el agua buscará vaporizarse para llenar el espacio que se libere.

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = f(P_v, \dots) \quad (2.2)$$

Al vaporizarse el agua sufre un cambio apreciable en su energía interna la cual se aumenta y esta ganancia energética debe ser compensada por el medio circundante y por el agua que aun no se ha vaporizado, esta última sufre una disminución de su energía interna en forma de calor sensible, apreciable en la caída de su temperatura. Debido a que la disminución de la temperatura provoca que los materiales aumenten las fuerzas que los cohesionan podemos prever que la vaporización de agua se ve afectada por este cambio de temperatura entonces:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = f(P_v, -T_a, \dots) \quad (2.3)$$

Al disminuir la temperatura del agua se produce una transferencia de calor del medio, por tal, el proceso de vaporización se ve afectado por este fenómeno:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = f(P_v, -T_a, Q_a) \quad (2.4)$$

Si tenemos en cuenta que el proceso es de forma transitoria, en otras palabras que la transferencia de calor, la temperatura, la rata de vaporización y el delta de presión cambian en el tiempo, tenemos que:

$$Q_a = f\left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right) \quad (2.5)$$

Entonces remplazando 2.5 en 2.4 tenemos que:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = f(P_v, -T_a, \frac{\partial T_a}{\partial t}) \quad (2.6)$$

2.1.2 Masa adsorbida por la sílica gel

La adsorción depende del contacto que halla entre el vapor de agua y la sílica gel, por tal razón podemos suponer que el área de contacto con la sílica gel es una variable importante para esta transferencia de masa, así pues:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} = f(A_c, \dots) \quad (2.7)$$

La presión y la temperatura también influyen determinantemente en el proceso ya que si disminuimos la presión el contacto se verá también disminuido y si aumentamos la temperatura se disminuirá aun más la transferencia de masa, entonces:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} = f(A_c, P_v, T_v, \dots) \quad (2.8)$$

Podríamos definir una propiedad de la sílica gel que se llama difusividad másica de la sílica, la cual determina el grado de afinidad física entre estas dos sustancias y la velocidad a la cual el absorbente puede llenarse de agua.

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} = f(A_c, P_v, T_v, \alpha_{sg}, \dots) \quad (2.9)$$

Además de esto otra variable influyente es el grado de concentración de agua dentro de la sílica gel, dado por:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial M_{sg}} = C_{sg} \quad (2.10)$$

Por tal:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} = f(A_c, P_v, T_v, \alpha_{sg}, C) \quad (2.11)$$

2.1.3 Masa de vapor en el sistema

La rata de masa de vapor que queda remanente entre el vaporizador y la sílica gel queda entonces definido por:

$$\frac{\partial M_{sis}}{\partial t} = \frac{\partial M_v}{\partial t} - \frac{\partial M_{asg}}{\partial t} \quad (2.12)$$

Esta masa remanente es la que provoca los cambios de presión en el vapor por tal es importante también definir como la presión del vapor se vera afectada por esta masa del sistema ya que esta ultima es de gran influencia en la vaporización:

$$P_v = f\left(\frac{\partial M_{sis}}{\partial t}, T_v\right) \quad (2.13)$$

La temperatura también afectará la presión del vapor y se requiere integrar la rata de vaporización en el tiempo pues lo que realmente modifica la presión es la masa total acumulada en el sistema.

2.2 BALANCE DE ENERGIA.

2.2.1 Balance de energía en el vaporizador.

Para hacer el balance de energía debemos tener en cuenta todos los aportes hechos por los diferentes componentes, si tenemos en cuenta que el cambio de fase de agua requiere el aporte de una determinada cantidad de energía se da que:

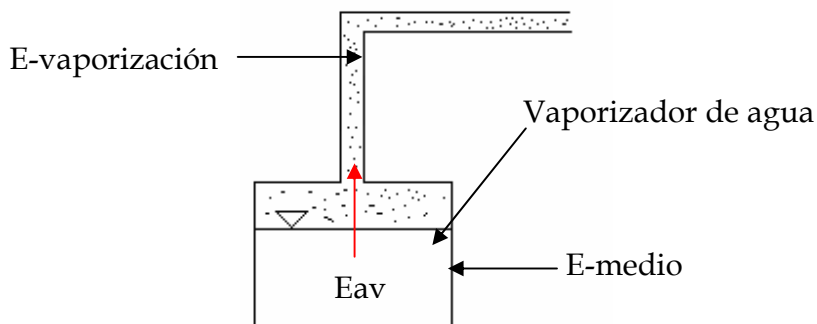


Figura 15: Balance de energía vaporizador.

(Fuente: Autor)

La energía requerida para el cambio de fase debe ser aportada por el agua que aun no se ha vaporizado y por el medio circundante, reflejado este aporte en un cambio del calor sensible de estos componentes reflejado en una disminución de su temperatura, así tenemos que:

$$E_v = E_{av} + E_m + W_p \quad (2.14)$$

Para esta ecuación suponemos que no hay intercambio energético entre la zona de vaporización y la zona de adsorción se debe tener especial cuidado en el diseño para evitar que la energía liberada en la adsorción no afecte la vaporización pues este aporte podría generar que la medición de la temperatura no arrojará cambios significativos y se perdería del proyecto como estudio de la refrigeración.

Suponemos que la energía cinética y potencial son insignificantes comparadas con la entalpía de vapor tenemos entonces que:

$$\Delta U_v = E_{av} + E_m \quad (2.15)$$

Y si consideramos el cambio de la energía del vapor como un salto entálpico promedio tenemos que:

$$M_v * \Delta H_{lv} = E_{av} + E_m \quad (2.16)$$

Como el aporte del agua es en forma de calor sensible entonces:

$$M_v * \Delta H_{lv} = M_{av} * C_{pa} * \Delta T_{av} + E_m \quad (2.17)$$

Si tenemos en cuenta que el proceso de transferencia y de vaporización no se da en forma estable si no que se produce de manera transitoria la ecuación 2.17 se transforma en:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} * \Delta \overline{H}_v = \frac{\partial}{\partial t} (M_{av} * C_{pa} * \Delta T) + \dot{E}_m \quad (2.18)$$

Si tenemos en cuenta que la temperatura también cambia con el tiempo tenemos que:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} * \Delta \overline{H}_v = \frac{\partial M_{av}}{\partial t} * C_{pa} * T_i + \frac{\partial T_{av}}{\partial t} * C_{pa} * M_{avf} + \dot{E}_m \quad (2.19)$$

Para ser más exactos podríamos considerar que $\Delta \overline{H}_v$ es también variable pero para simplificar el problema es válido tomar un valor promedio del mismo, lo cual no afecta en mayor medida los cálculos.

La energía aportada por el medio depende de las características particulares de modelo que se plantee.

2.2.2 Balance de energía de la sílica gel.

Al ponerse vapor en contacto con la sílica gel este se condensa y es absorbido, produciendo una liberación de calor latente producto del cambio de fase del agua.

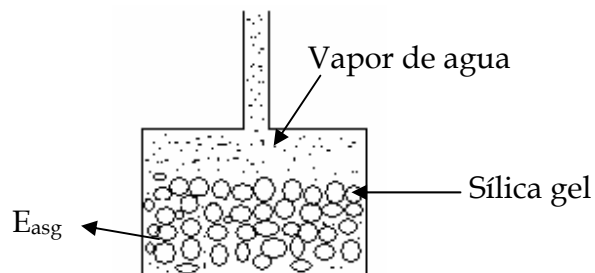


Figura 16: Balance de energía en la sílica gel
(Fuente: Autor)

El balance de energía esta dado por:

$$E_{asg} = E_{sg} + E_{m2} \quad (2.20)$$

Haciendo el mismo análisis que en el vaporizador tenemos que:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} * \Delta \overline{H}_{asg} = \frac{\partial M_{asg}}{\partial t} * C_{pa} * T_i + \frac{\partial T_{asg}}{\partial t} * C_{pa} * M_{asgf} + M_{sg} * C_{psg} * \frac{\partial T_{sg}}{\partial t} + \dot{E}_{m2} \quad (2.21)$$

2.2.3 Balance de transferencia de masa en la sílica gel.

Basándonos en la analogía entre la transferencia de masa y de calor tenemos que:

$$\frac{\partial M_{asg}}{\partial t} = K * A * \frac{\partial C_{asg}}{\partial X} \quad (2.22)$$

Ahora si tenemos en cuenta que el proceso se da forma transitoria tenemos:

$$\frac{\partial^2 C_{asg}}{\partial X^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial C_{asg}}{\partial t} \quad (2.23)$$

$$C_{(x,0)} = C_i$$

$$C_{(0,t)} = C_o \quad t \geq 0$$

Con la ayuda de la transformada de Laplace

$$\frac{C_{(x,t)} - C_o}{C_i - C_o} = \text{erf} \frac{X}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (2.24)$$

Donde la función error de gauss esta definida por:

$$\text{erf} \frac{X}{2\sqrt{\alpha t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^{\frac{X}{2\sqrt{\alpha t}}} e^{-\frac{n^2}{4\alpha t}} \hat{c}n \quad (2.25)$$

El flujo de masa en la posición X esta dado por la ecuación 2.22 efectuando la derivada parcial tenemos que:

$$\frac{\partial(\frac{X}{2\sqrt{\alpha t}})}{\partial X} = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (2.26)$$

$$M_o = \frac{C_i - C_o}{\sqrt{\pi \alpha t}} * e^{-\frac{X^2}{4\alpha t}} \quad (2.27)$$

Como la parte que mas nos interesa es la frontera tenemos que el flujo de masa en la superficie es:

$$\dot{M}_o = \frac{C_i - C_o}{\sqrt{\pi \alpha t}} * K * A \quad (2.28)$$

Para que se cumpla el análisis para sólido semi-infinito se requiere considerar la sílica como un cuerpo sólido limitado por el volumen que ocupa en su totalidad.

La definición de la concentración representa un gran reto y tal vez sea necesario hacer varias suposiciones que no concuerdan estrechamente con la realidad pero que si pueden aportar una buena aproximación de los resultados.

El adsorbente debe tener una elevada capacidad de adsorción, lo cual se conseguirá con un área superficial específica grande. Es decir, cuanto mayor número de poros tengamos en la superficie del material adsorbente y mayor sea la variedad de tamaños, más adecuado va a resultar el material para ser utilizado como adsorbente. Esta característica va a determinar la accesibilidad del adsorbato en la superficie de adsorción.

. Actualmente existen básicamente dos expresiones para calcular la cantidad de adsorbato retenido por el adsorbente:

Dubinin-Radushkevich

$$C = C_o * e^{-K(\frac{\epsilon}{\beta})^2} \quad (2.29)$$

Dubinin-Astakhov:

$$C = C_o * e^{-\left(\frac{\epsilon}{E}\right)^n} \quad (2.30)$$

Donde:

C masa de adsorbato adsorbida (kg adsorbato/kg adsorbente)

C_0 capacidad límite de adsorción (kg adsorbato/kg adsorbente)

k, n constantes determinadas por la estructura del adsorbente

β = coeficiente de afinidad determinado por el par adsorbente/adsorbato

ε = energía potencial de adsorción

E = trabajo característico de adsorción

La energía potencial de adsorción, ε se obtiene por:

$$\varepsilon = R * T * \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (2.31)$$

Siendo p_0 la presión de saturación específica, si en esta ecuación se sustituyen las presiones por fugacidades, para ajustar más los resultados a la realidad, se tiene:

$$\varepsilon = R * T * \ln\left(\frac{f_0}{f}\right) \quad (2.32)$$

Si se sustituye la ecuación anterior en la de Dubinin-Radushkevich, se obtiene la ecuación:

$$C_i = C_0 * e^{-B\left(\frac{T^2}{\beta^2} \ln^2\left(\frac{f_0}{f}\right)\right)} \quad (2.33)$$

En la que B es una constante que engloba al resto de constantes, y depende del tamaño del poro.

Como podemos ver se refleja aquí la dependencia en la absorción de las variables de temperatura y presión.

2.2.4 Balance de masa en el sistema y su influencia en la presión.

La masa que queda remanente en el sistema (aquella que se vaporiza pero que no se logra absorber) entra a modificar la presión, y como esta es la que directamente provoca la vaporización es importante analizar como relacionan estas variables, el análisis a esas presiones se puede asemejar al de un gas ideal modificado por un factor de corrección así pues tenemos que:

$$P = Z * \rho * R_p * T \quad (2.34)$$

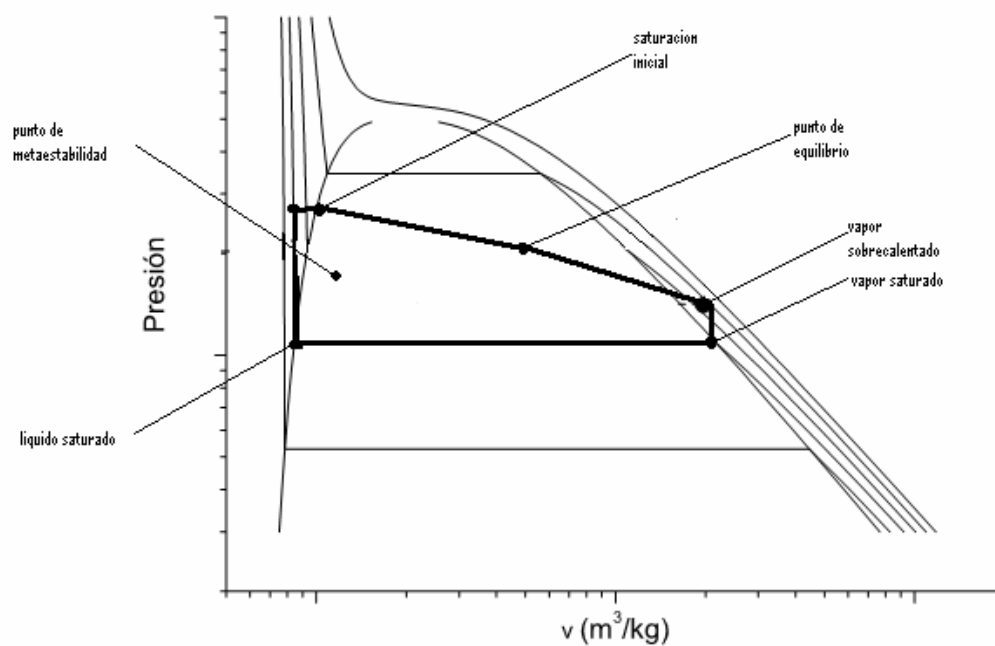
Considerando la transitoriedad tenemos que:

$$\frac{\partial P_{sis}}{\partial t} = Z * R_p \frac{\partial(\rho * T)}{\partial t} \quad (2.35)$$

Realizando la derivada tenemos que:

$$\frac{\partial P_{sis}}{\partial t} = Z * R_p \frac{\partial(\rho)}{\partial t} * T_i + Z * R_p \frac{\partial(T)}{\partial t} * \rho_f \quad (2.36)$$

Si usamos el diagrama p-v para la primera aproximación al comportamiento del agua en estas condiciones tenemos que:



**Figura 17: Diagrama p-v para el comportamiento termodinámico.
(Fuente: Autor)**

2.2.5 Vaporización del agua.

El proceso de vaporización del agua conlleva una complejidad termodinámica bastante elevada, donde interviene la velocidad de nucleación en estados meta-estables, la tasa de vaporización y las condiciones termodinámicas de la misma dependen de la homogeneidad o heterogeneidad del agua en el recipiente y de la superficie del mismo, pues si la disolución de otros gases, sustancias o sólidos dentro de ella es mínima y las paredes del recipiente son lisas se podría extender la meta-estabilidad del agua y conseguir un estado de líquido sobrecalentado del agua ahora si se tienen otras sustancias disueltas y las paredes del recipiente contenedor son

rugosas esto favorece la generación de los núcleos de gas disminuyendo el margen de meta-estabilidad.

La velocidad de vaporización esta ampliamente influida por la velocidad de despresurización y la energía libre de gibbs (ver figura17)

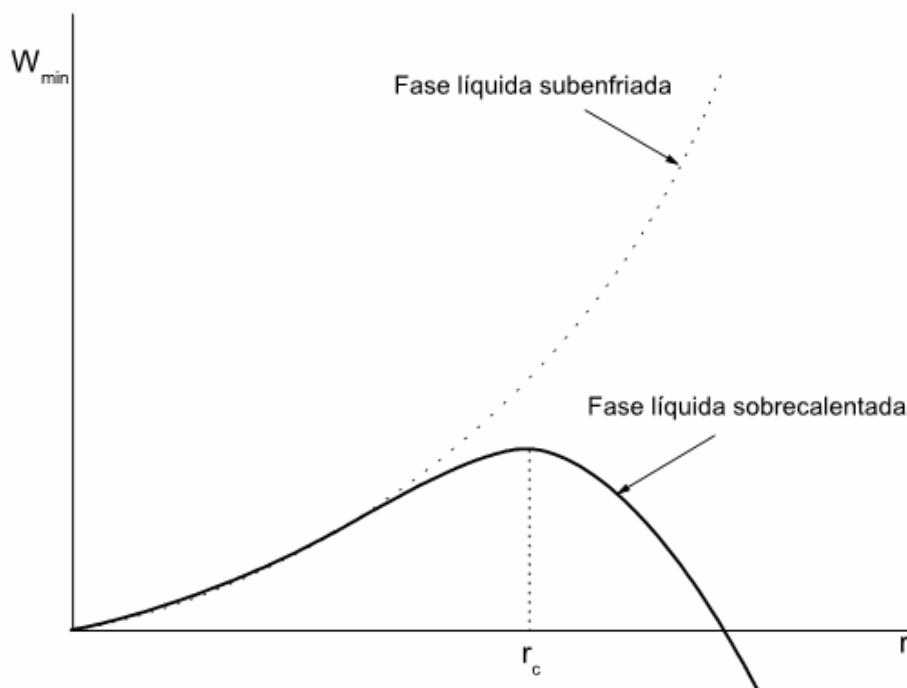


Figura 18: Energía libre de gibbs contra radio crítico de nucleación.
(Fuente: David fuentes preguntar)

Donde existe un radio critico de la nucleolisis del vapor en el cual la energía libre de gibbs consigue un máximo, pasado este punto la vaporización se produce de forma espontánea con una liberación de parte de su energía.

La presión de vapor en la esfera que se forma, la presión del líquido, los esfuerzos cortantes en la superficie transversal de la burbuja y la tensión superficial del líquido, a las condiciones termodinámicas, influyen también en el fenómeno.

Tomando el estudio hecho por el profesor David Fuentes en su trabajo de doctorado en el capítulo dedicado a la extensión de la saturación tenemos que:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = \frac{\rho \Sigma}{\beta P_o} \quad (2.37)$$

Donde Σ es la velocidad de despresurización y esta dada por la ecuación:

$$\Sigma = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.38)$$

Combinando las ecuaciones 2.37 y 2.38 tenemos:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = \frac{\rho}{\beta P_o} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.39)$$

Ahora el valor de β está definido por la ecuación:

$$\beta = \frac{a_h * \rho_g * h_{fg} + \rho_l * (\rho_l - \rho_g)}{P_o * (a_h + \rho_l * a_p)} \quad (2.40)$$

Remplazando 2.40 en 2.39 tenemos que:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = \frac{\rho \frac{\partial P}{\partial t}}{\frac{a_h * \rho_g * h_{fg} + \rho_l * (\rho_l - \rho_g)}{P_o * (a_h + \rho_l * a_p)} P_o} \quad (2.41)$$

Donde:

$$a_h = \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial h_l} \right)_{P_l} \quad (2.42)$$

Y

$$a_p = \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p_l} \right)_{h_l} \quad (2.43)$$

Remplazando 2.42 y 2.43 en 2.41 y realizando algunas operaciones algebraicas:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} = \frac{\rho \frac{\partial P}{\partial t} * \left(\left(\frac{\partial \rho_l}{\partial h_l} \right)_{P_l} + \rho_l * \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p_l} \right)_{h_l} \right)}{\left(\frac{\partial \rho_l}{\partial h_l} \right)_{P_l} * \rho_g * h_{fg} + \rho_l * (\rho_l - \rho_g)} \quad (2.44)$$

Como podemos observar el cambio entálpico a esas presiones en el gas y en el liquido esta influido por la temperatura.

3. DISEÑO DEL MODELO PARA LA EXPERIMENTACIÓN.

3.1. DISEÑO TERMODINAMICO

Basado en los estudios previos realizados por algunos centros de investigación y teniendo en cuenta los resultados mas influyentes en el diseño se realizara el dimencionamiento de modelo planteado para el estudio.

La presión real de la bomba de vacío mecánica llega hasta 2 mbar.

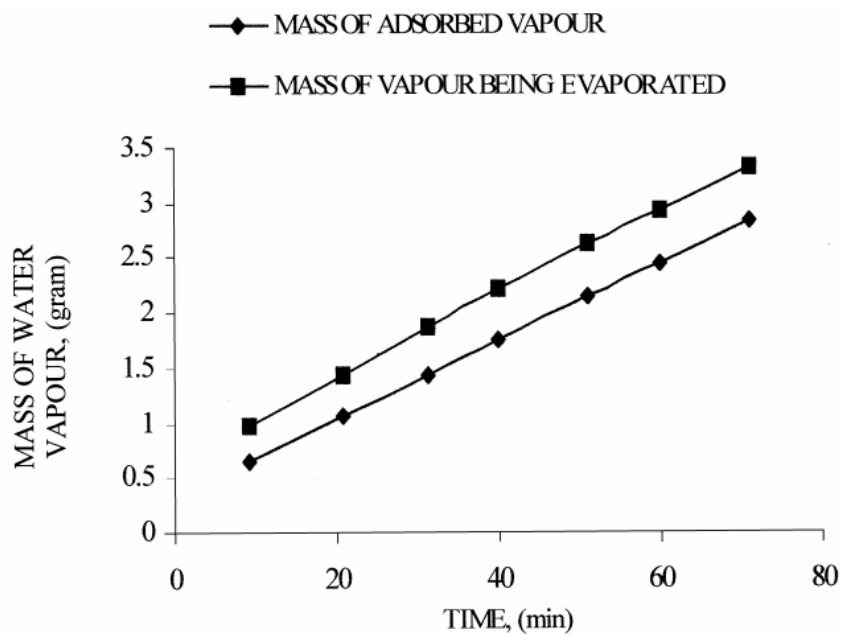


Figura 19: rata de vaporización y absorción de agua.

(Fuente: Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working, pair M.A. Tahat *,Department of Mechanical Engineering, PO Box 3030, Jordan University of Science and Technology (JUST), Irbid, Jordan)

El hecho que tan solo 3.5 gramos de agua se logren vaporizar por este medio forzado hace que las características físicas del modelo se vean limitadas. Por

tal motivo este debe tener el tamaño preciso para que se logre evidenciar el efecto de enfriamiento teniendo en cuenta que el calor que aporta el medio afecta significativamente la pérdida de calor sensible en el agua de medición.

Modelo general:

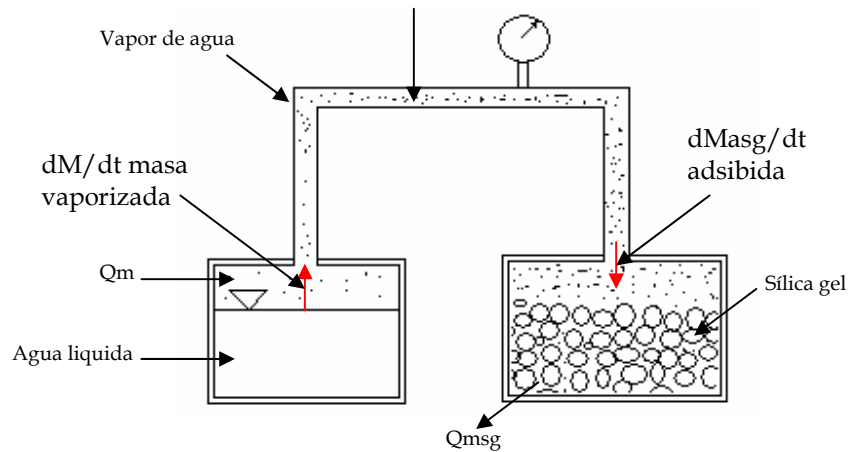


Figura 20: Modelo general de la vaporización y la absorción
(Fuente: Autor)

como podemos ver el calor Q_r aportado por el ambiente constituye la carga refrigerativa el cual debe ser medido indirectamente a través de la temperatura, por tal se debe tener un sistema donde sea posible leer esta temperatura y así determinar este calor, en la siguiente figura se propone el medio para hacerlo:

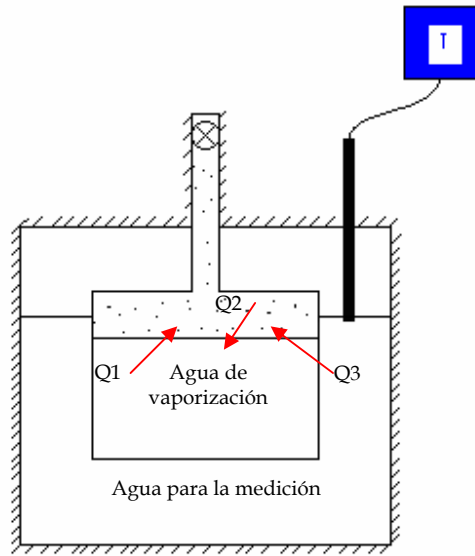


Figura 21: Balance de calor para la vaporización
(Fuente: autor)

Como vemos al vaporizarse el agua debido a la despresurización cambia su energía interna drásticamente obteniendo esa ganancia energética del medio circundante y de la misma masa de agua que aun no se a vaporizado, en términos generales de balance energético del sistema tenemos que:

$$\Delta E_{\text{int agua}} + Q = M_v * h_{fgprom} \quad (3.1)$$

Donde:

$$\Delta E_{\text{int agua}} = Q_1 \quad (3.2)$$

Y

Si tenemos en cuenta que el calor proviene de los materiales del recipiente y del agua donde se medirá la temperatura se da que:

$$Q = Q_2 + Q_3 \quad (3.3)$$

$$Q_2 = \Delta E_{mat} = M_{mat} * C_{p-mat} * \Delta T_{mat} \quad (3.4)$$

$$Q_3 = \Delta E_{amed} = M_{amed} * C_{p-amed} * \Delta T_{amed} \quad (3.5)$$

Ahora bien el calor Q_1 total esta dado en términos de:

$$Q_1 = \Delta E_{av} = M_i * C_{p-av} * T_i - M_f * C_{p-av} * T_f \quad (3.6)$$

Por tal la ecuación se transforma en:

$$M_i * C_{p-av} * T_i - M_f * C_{p-av} * T_f + M_{mat} * C_{p-mat} * \Delta T_{mat} + M_{amed} * C_{p-amed} * \Delta T_{amed} = M_v * h_{fgprom} \quad (3.7)$$

El término que se encuentra a la derecha según la investigación previa es cercano a:

$$M_v * h_{fgprom} = 3.5g * 2500 \frac{Kj}{Kg} * \frac{1Kg}{1000g} = 8.75Kj \quad (3.8)$$

Como la vaporización del agua no supera los 3.5 gramos¹⁰ , el agua que se destine para tal hecho podría suponerse inicialmente de 12g dándole así un margen alto, además, el material del que esta hecho el recipiente debe ser un buen conductor de calor y por costos se podría pensar en acero galvanizado para contrarrestar un poco los efectos de la oxidación, este material es usado en el transporte de gas domiciliario, por tal, se supone un buen comportamiento ante fugas.

La masa inicial de agua a vaporizar es de 12 gramos y la masa final de 8.5g la temperatura inicial del agua es de 300 Kelvin, la masa de agua en donde se realizara la medición podría ser, para la primera consideración, de 200g y la masa del metal para el experimento podría ser de 2 Kg.

Suponemos que pasado un buen tiempo el fenómeno adquirirá la estabilidad y se podría pensar que la temperatura final es la misma para todos los componentes.

Para calcular la temperatura final se tiene que:

$$C_{p-a} = 4.179 \frac{Kj}{Kg * K} \text{ y } C_{p-mat} = 0.434 \frac{Kj}{Kg * K}$$

Resolviendo la ecuación 3.7

¹⁰ Fuente: Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working, pair M.A. Tahat *,Department of Mechanical Engineering, PO Box 3030 Jordan University of Science and Technology (JUST), Irbid, Jordan

$$8.5Kj = 12g * 4.179\left(\frac{Kj}{Kg * K}\right) * 300K * \frac{1Kg}{1000g} - 8.5g * 4.179\left(\frac{Kj}{Kg * K}\right) * T_f(K) * \frac{1Kg}{1000g} +$$

$$2(Kg) * 0.434 \frac{Kj}{Kg * K} * (300 - T_f)(K) + 0.2(Kg) * 4.179 \frac{Kj}{Kg * K} * (300 - T_f)(K)$$

Despejando la temperatura final obtenemos que:

$$T_f = 297.63(K)$$

Como vemos el cambio de temperatura no es tan significativo por tal se debe reducir la cantidad de metal y agua para la medición.

Si disminuimos el metal a 500g y el agua para la medición a 50g obtenemos un cambio de temperatura de 10 (K) aproximadamente.

3.2 ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

3.2.1 Análisis de la masa del sistema

Como se puede notar para obtener un enfriamiento apreciable se debe tener una cantidad de agua para la medición y para la evaporación pequeña así como el metal que compone los recipientes contenedores, el modelo debe ser lo suficientemente pequeño para notar el cambio de temperatura. Podemos plantear una configuración de la siguiente forma:

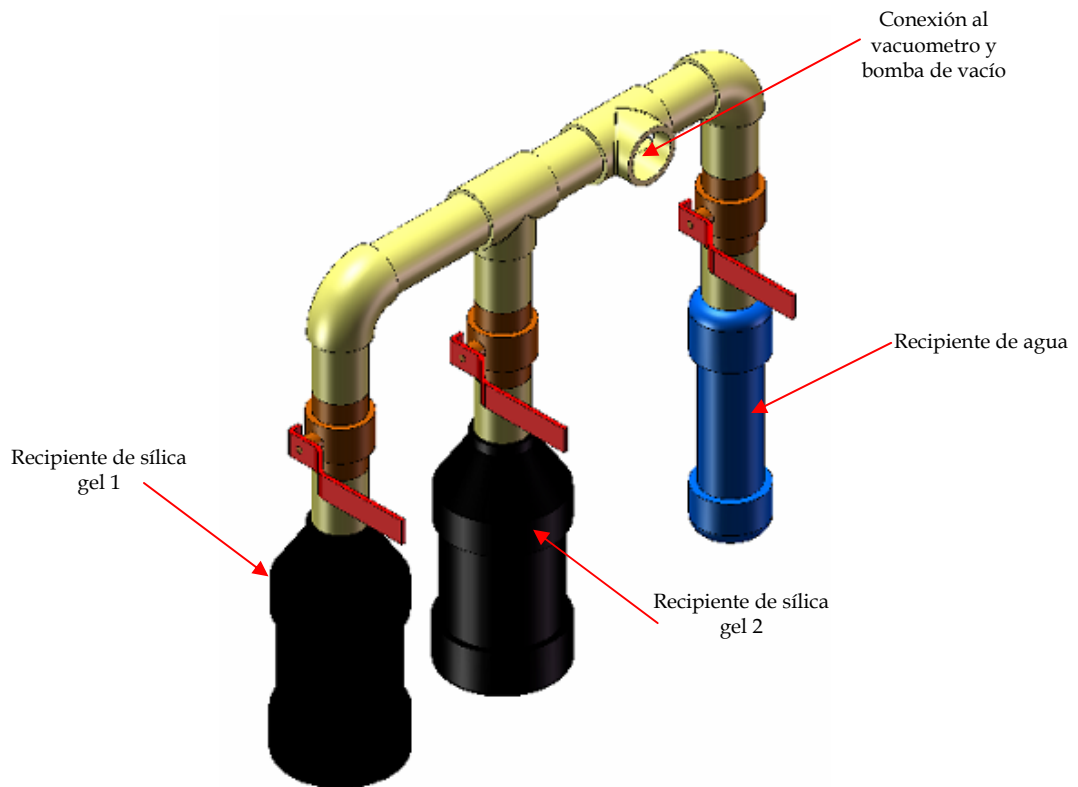


Figura 22: Dimencionamiento inicial del modelo.

(Fuente: Autor)

Debemos calcular la cantidad de agua que pueden contener los dos recipientes planteados tanto para el agua de vaporización como el del agua para la medición de la temperatura.

El volumen interno del recipiente donde se medirá la temperatura esta dado por:

$$V_c = A * L \tag{3.9}$$

Y

$$A = \Pi * r^2 \tag{3.10}$$

Si $r = 1.5 \text{ pulg}$ y $L = 15 \text{ cm}$ tenemos que:

$$V_c = 171 \text{ cm}^3$$

El diámetro exterior del tubo que contiene el agua a vaporizar es de aproximadamente $\frac{3}{4}$ pulgadas, así que:

$$V_v = 42.75 \text{ cm}^3$$

El volumen de agua que se puede agregar para la medición es de:

$$V_{amed} = V_c - V_v = 128.25 \text{ cm}^3$$

Si consideramos que la densidad del agua es de $\rho = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3}$ tenemos que la cantidad de agua en gramos sería de 128.25 g con el máximo que podemos agregar es de 50g la altura de los cilindros debe disminuirse a $\frac{1}{3}$ de la supuesta inicialmente con este cambio el volumen final de agua para la medición será de:

$$V_m = 42.75 \text{ cm}^3$$

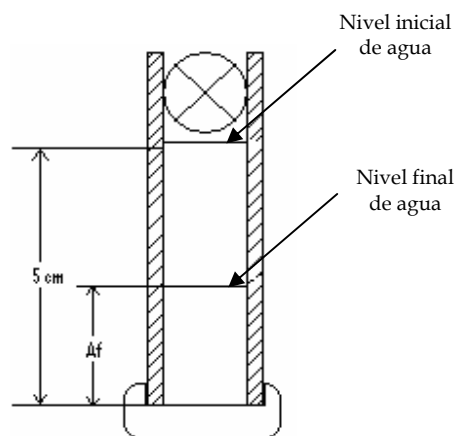
Y la masa

$$M_{amed} = 42.75 \text{ g}$$

Debido a esta modificación y teniendo en cuenta que el diámetro interno de tubo donde se almacenara el agua para la vaporización es de $\frac{1}{2}$ de pulg se tendrá una masa final de agua para la vaporización de:

$$M_{av} = 6.33g$$

En el siguiente grafico se observa el posible cambio de la columna de agua dentro del vaporizador:



**Figura 23: Cambio en la columna de agua a vaporizar
(Fuente: Autor)**

La altura final de la columna de agua esta dada por:

$$L_f = \frac{(6.33g - 3.5g) * 5cm}{6.33g} = 2.23cm$$

Esto con la suposición que tan solo 3.5g de agua se vaporizaran cabe anotar que esta suposición conlleva a creer que las condiciones termodinámicas finales no serán de vapor sobrecalentado si no de vapor saturado pues parte

del agua se quedara en estado liquido y en este punto puede que el proceso se de forma isotérmica.

3.2.2 Análisis general de la transferencia de calor.

Como podemos notar el cambio de la columna de agua es bastante grande y deberá tenerse en cuenta en el cálculo de la transferencia de calor: ver figura 23:

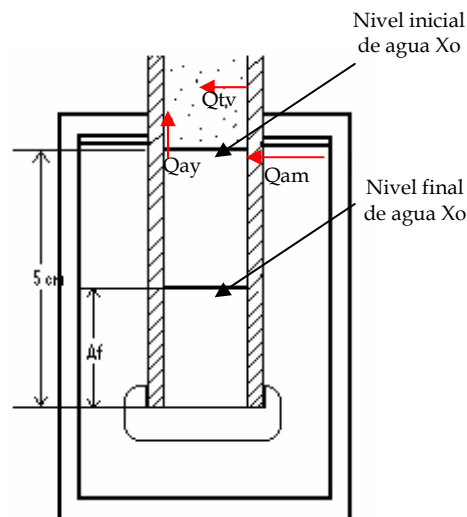


Figura 24: Transferencia de calor análisis discreto.

(Fuente: Autor)

Dividimos el problema en varias secciones y haremos un análisis del proceso de transferencia y vaporización en el tiempo, por tal empezaremos con la sección 1 suponiendo que al comienzo de proceso, únicamente el tubo que queda en contacto con el vapor y el agua que se va a vaporizar, son los únicos que están aportando el calor latente de vaporización.

$$\frac{\partial(M_v * h_v)}{\partial t} = Q_{av} + Q_{Tv} \quad (3.11)$$

A esas condiciones la entalpía del vapor se puede considerar función únicamente de la temperatura por tal:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} * h_{vi} + \frac{\partial h_v}{\partial t} * M_{vi} = Q_{av} + Q_{Tv} \quad (3.12)$$

Los valores de Q_{av} y Q_{Tv} están dados por

$$Q_{av} = \rho_a * C_{p-av} * A_o * \frac{\partial(L_{cai} * T_a)}{\partial t} = \rho_a * C_{p-av} * A_o * \frac{\partial L_{ca}}{\partial t} * T_{ai} + \rho_a * C_{p-av} * A_o * \frac{\partial T_a}{\partial t} * L_{caf} \quad (3.13)$$

Y

$$Q_{Tv} = \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * \frac{\partial(A_{cmat} * T_{mat})}{\partial t} = \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * \frac{\partial A_{cmat}}{\partial t} * T_{mi} + \rho_{amed} * C_{p-amed} * L_{camed} * \frac{\partial T_a}{\partial t} * A_{camedf} \quad (3.14)$$

Debemos tener en cuenta que:

$$\frac{\partial A_{cmat}}{\partial t} = 2 * \Pi * r * \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.15)$$

3.2.3 Planteamiento de la transitoriedad de forma explicita en el tuvo.

- **Primera etapa**

Usando un análisis de la transferencia en forma discreta con el método explícito para la transitoriedad, tenemos que:

$$\frac{\partial M_v}{\partial t} * C_{p-v} * T_i + \frac{\partial T_v}{\partial t} * C_{p-v} * M_{vf} = \rho_a * C_{p-a} * L_{ca} * A_o \frac{T_a^{p+1} - T_a^p}{\Delta t_1} + \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil} \frac{T_{mat-x0}^{p+1} - T_{mat-x0}^p}{\Delta t_1} \quad (3.16)$$

Las longitudes características se deben comparar con furrier para obtener un cálculo preciso.

- **Segunda etapa**

En una segunda fase del proceso se integran varias partes al aporte de calor, tenemos entonces que:

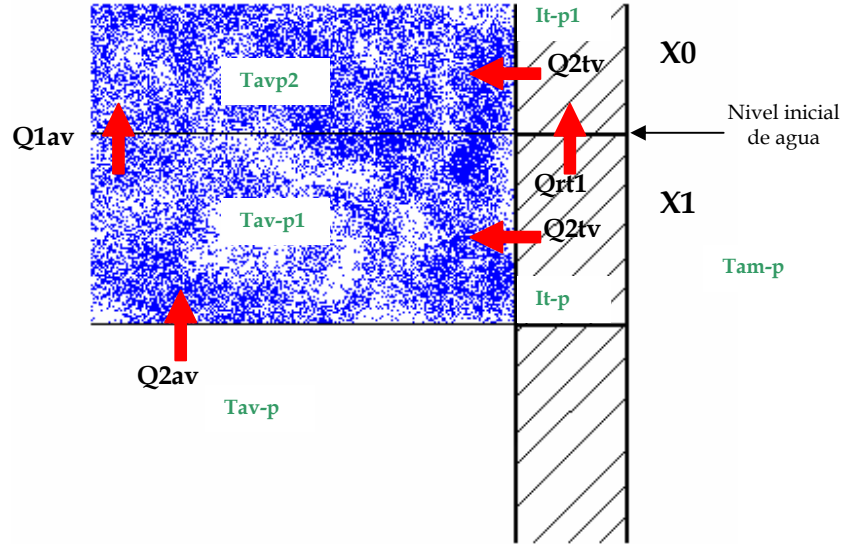


Figura 25: Transferencia de calor segunda etapa.

(Fuente: Autor)

Como podemos ver hay una interacción compleja en la transferencia y se hace necesario un análisis por partes:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\partial M_v}{\partial t} \right)_1 * C_{p-v} * T_1 + \left(\frac{\partial T_v}{\partial t} \right)_2 * C_{p-v} * M_{v2} = \\
 & \rho_a * C_{p-a} * L_{ca} * A_o \frac{T^{p+2}_a - T^{p+1}_a}{\Delta t_2} + \\
 & \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil} \frac{T^{p+2}_{mat-x0} - T^{p+1}_{mat-x0}}{\Delta t_2} + \\
 & \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil1} \frac{T^{p+1}_{mat-x1} - T^p_{mat-x1}}{\Delta t_2}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Existe una transferencia axial en el tubo por tal:

$$\rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil} \frac{T^{p+2}_{mat} - T^{p+1}_{mat}}{\Delta t_2} = Q_{1tv} + \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil1} \frac{T^{p+1}_{mat-x1} - T^p_{mat-x1}}{\Delta t_2} \quad (3.18)$$

- Tercera etapa

En una tercera fase del proceso el análisis para el valor se repite desde X0 hasta Xn pero el análisis en el tubo sufre una nueva variación y se debe replantear:

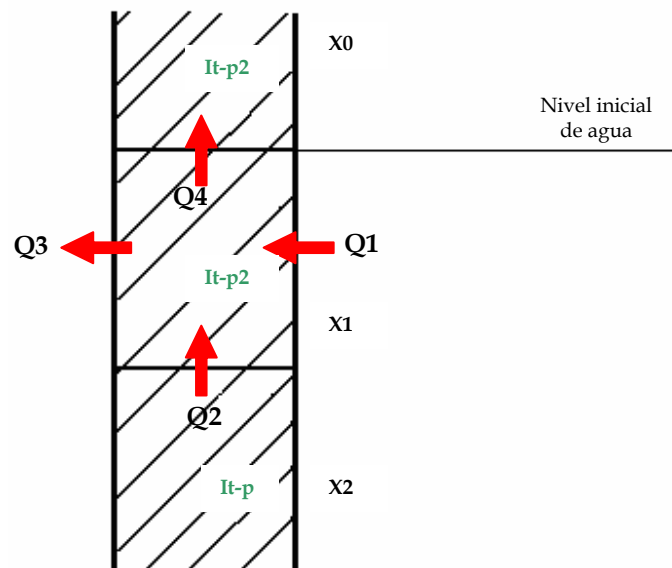


Figura 26: Transferencia de calor en el tubo tercera etapa.
(Fuente: Autor)

$$Q_{lamed} + Q_{x2T} - Q_{vt3} - Q_{x0T} = \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{cil1} \frac{T^{p+1}_{mat-x1} - T^p_{mat-x1}}{\Delta t_3} \quad (3.19)$$

Tenemos entonces que:

$$\begin{aligned} & \rho_{amed} * C_{p-amed} * L_{camed} * A_{omed} \frac{T^{p+1}_{amed1} - T^p_{amed1}}{\Delta t_3} \\ & + \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{ciltr} \frac{T^{p+1}_{mat-x2} - T^p_{mat-x2}}{\Delta t_3} - \\ & \rho_{va} * C_{p-va} * L_{cva} * A_{vo} \frac{T^{p+3}_{va} - T^{p+2}_{va}}{\Delta t_3} - \\ & \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cm} * A_{ciltr1} \frac{T^{p+3}_{mat-x0} - T^{p+2}_{mat-x0}}{\Delta t_2} = \\ & \rho_{mat} * C_{p-mat} * L_{cmat} * A_{ciltr1} \frac{T^{p+1}_{mat-x1} - T^p_{mat-x1}}{\Delta t_3} \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.2.4 Planteamiento de la transitoriedad de forma explicita en el agua.

El análisis que se debe hacer para el agua de medición es:

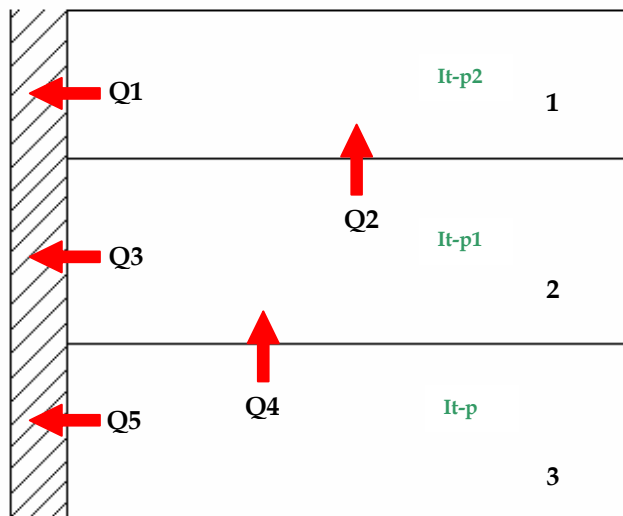


Figura 27: Transferencia de calor en el agua de medición.

(Fuente: Autor)

Como podemos ver, dividimos la masa de agua en tres secciones, se realizara el análisis en la sección 1 y 2 debido a que estas engloban el comportamiento general de toda la masa de agua.

Para la sección 1 tenemos que:

$$\rho_{am1} * C_{p-am} * V_{am1} \frac{T^{p+2}_{am-x1} - T^{p+1}_{am-x1}}{\Delta t_3} = Q_{2-1am} - Q_{1am-T1} \quad (3.21)$$

Para la sección 2 el análisis es realizado trascurrido un Δt tenemos entonces:

$$\rho_{am2} * C_{p-am} * V_{am2} \frac{T^{p+2}_{am-2} - T^{p+1}_{am-2}}{\Delta t_4} = Q_{3-2am} - Q_{2-1am} - Q_{2am-T2} \quad (3.22)$$

Los calores expuestos con anterioridad están dados por:

$$Q_{1amat-T1} = \frac{K_T * A_{mat-T} * \Delta T_{T1-t3}}{e * \Delta t} \quad (3.23)$$

$$Q_{2amed-T2} = \frac{K_T * A_{matT} * \Delta T_{T2-t4}}{e * \Delta t} \quad (3.24)$$

$$Q_{2-1amed} = \frac{K_a * A_{tr-a} * \Delta T_{2-1amed-t3}}{e * \Delta t} \quad (3.25)$$

$$Q_{3-2amed} = \frac{K_a * A_{tr-a} * \Delta T_{3-2amed-t4}}{e * \Delta t} \quad (3.26)$$

Donde e es el espesor del tubo.

El análisis se debe hacer teniendo en cuenta los límites impuestos por el modelo, los cuales serian:

$$\sum X_i = L_f \quad (3.27)$$

Donde L_f depende de la disminución de la columna producto de la vaporización y esta dada por:

$$\int \frac{\partial m}{\partial t} * \partial t = \rho * V \quad (3.28)$$

$$\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial m}{\partial t} * \partial t = V = A_o * L_f \quad (3.29)$$

Tenemos entonces que:

$$\frac{1}{\rho A_o} \int \frac{\partial m}{\partial t} * \partial t = L_f \quad (3.30)$$

El límite se transforma en:

$$\sum_{i=0}^n X_i = \frac{1}{\rho A_o} \int \frac{\partial m}{\partial t} * \partial t \quad (3.31)$$

Hasta este punto se supone un proceso de vaporización continuo, una disminución de la temperatura del vapor y del agua de la misma forma, pero si analizamos la función que se encuentra en la tesis doctoral del profesor David fuentes:

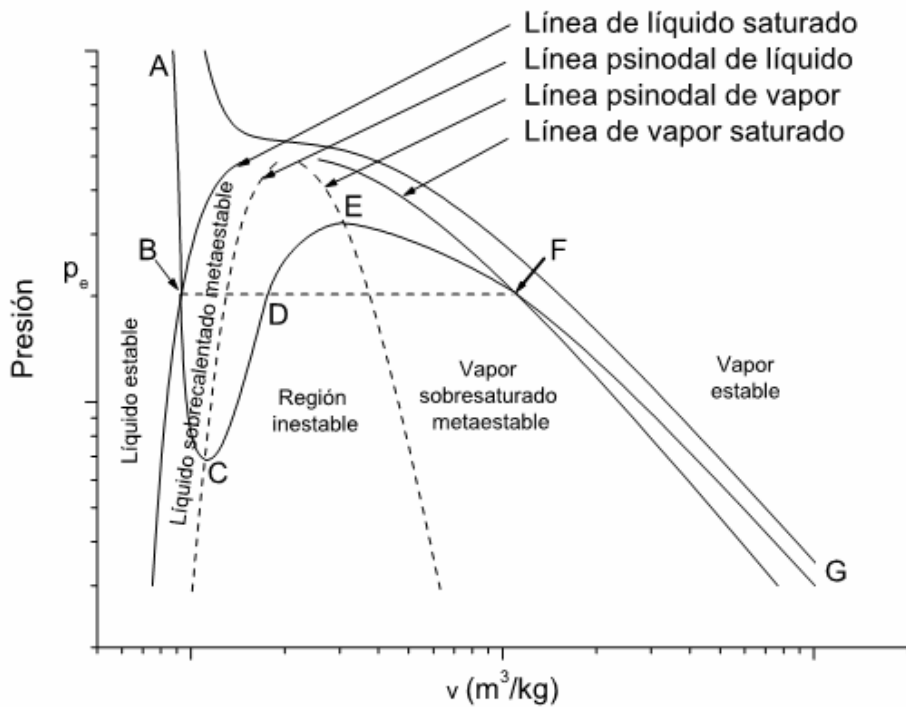


Figura 28: Meta-estabilidad del agua.

(Fuente: tesis doctoral de David fuentes)

Se podría dar que pasada la etapa de meta-estabilidad el comportamiento se produzca en términos generales como un proceso isotérmico en el cual se produciría la estabilidad de la transferencia de calor y el cálculo se reduciría al balance termodinámico en la presión de equilibrio.

Hay que recordar que la presión y la temperatura dependen de la generación de vapor y de la adsorción, estas a su vez de la energía libre de Gibbs así que la comprobación se dará por medio de la experimentación.

3.2.5 Resultados del modelo analítico.

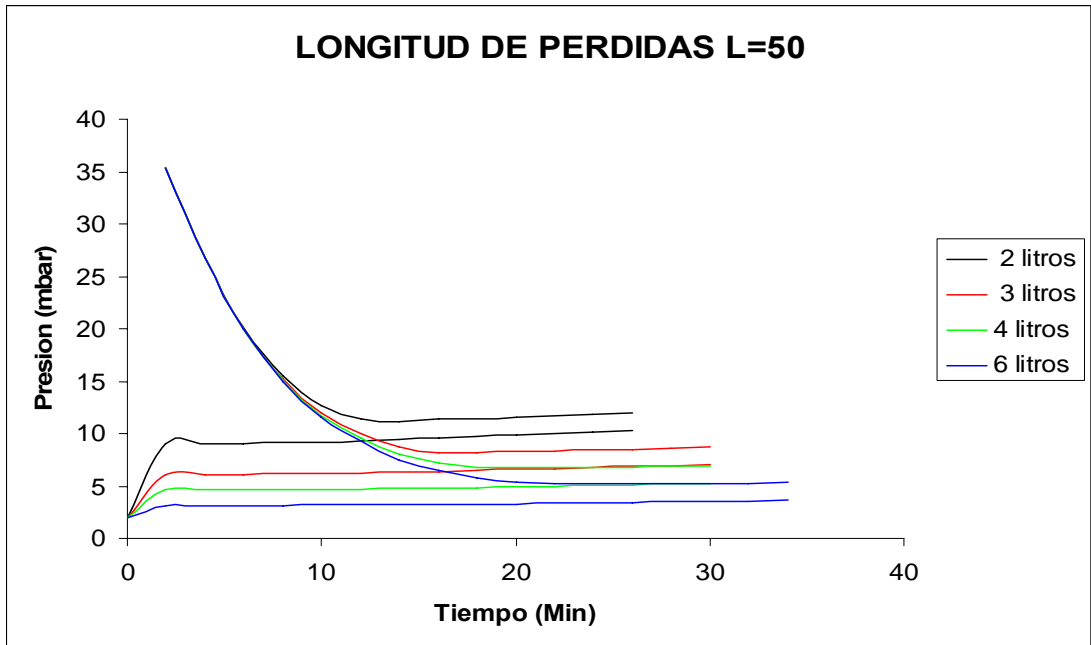
A continuación se presentan los resultados. Específicamente se analizarán la variación de la presión y el calor retirado del medio a enfriar contra el tiempo para diferentes condiciones relacionadas con la longitud de pérdidas, área de adsorción, volumen del sistema, presión inicial. Resolviendo las ecuaciones planteadas con anterioridad con la ayuda del programa EES¹¹

Para poder analizar el comportamiento del par sílica gel en el modelo matemático es importante observar cómo varían las diferentes variables; pérdidas de calor a través de una longitud característica denominada Longitud de pérdidas, volumen, área en contacto de la sílica gel con el vapor y presión de vacío, en este caso el análisis está supuesto para cuatro diferentes longitudes de pérdidas a diferentes volúmenes del sistema, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

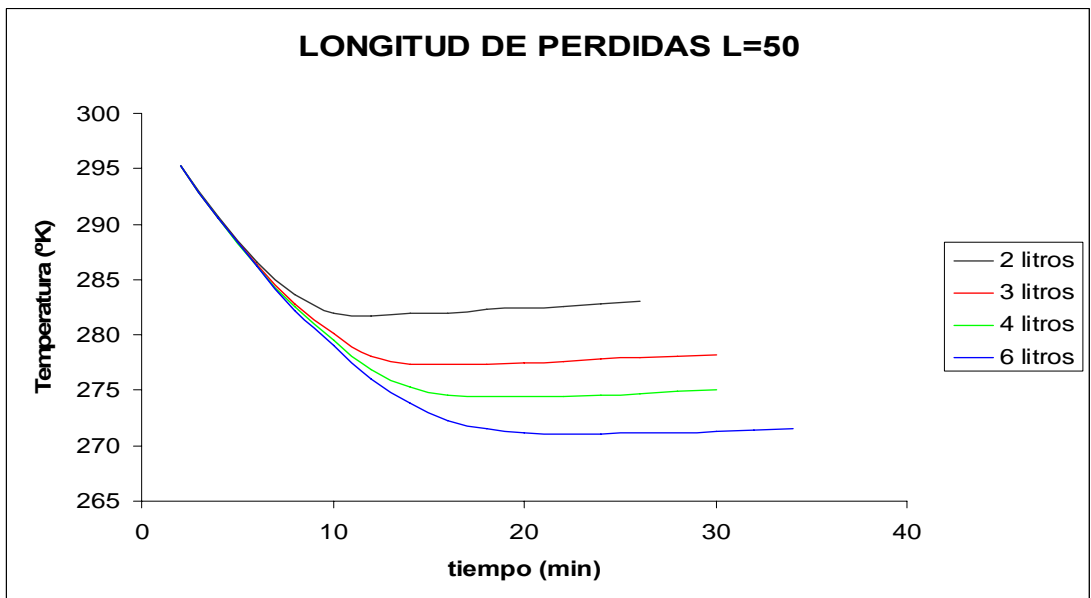
Variando la longitud del volumen de adsorción:

Variando la longitud del volumen de adsorción:

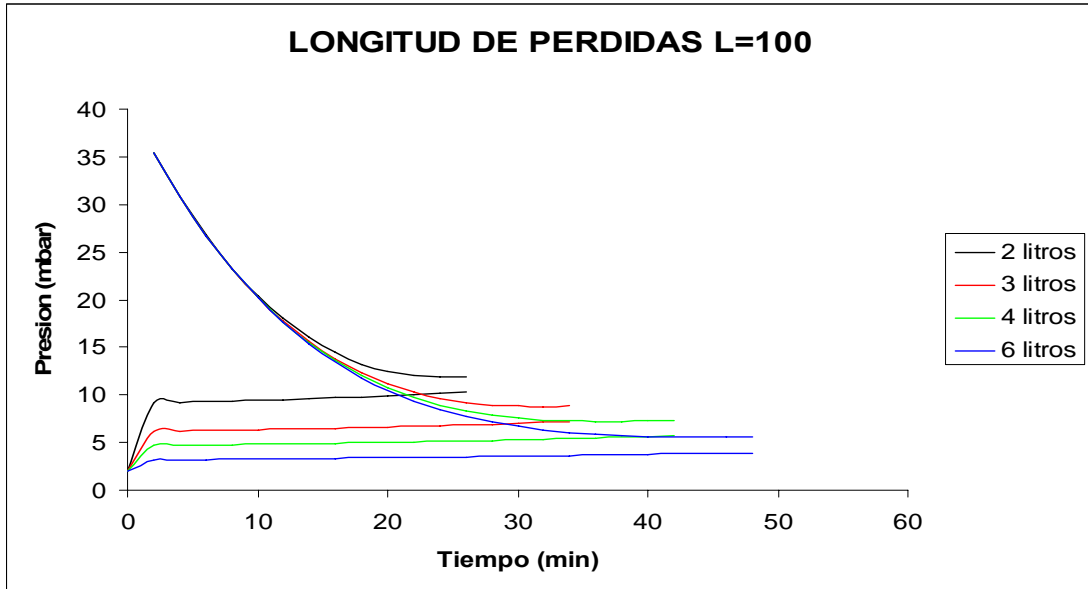
¹¹ Anexo 1 : Sistema de ecuaciones en el EES.



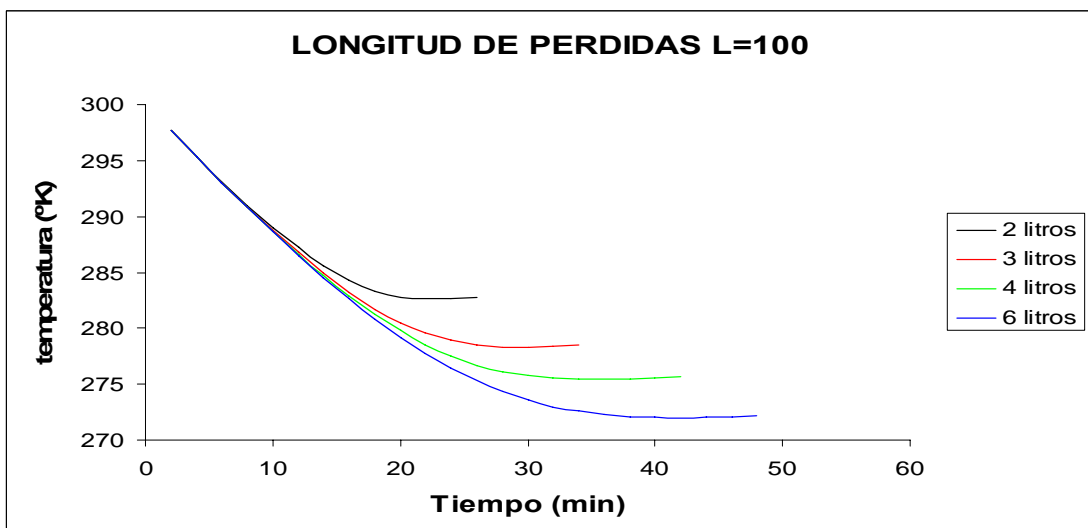
**Figura 29: presión contra tiempo para $L_{perdi} = 50$ (las graficas que descienden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**



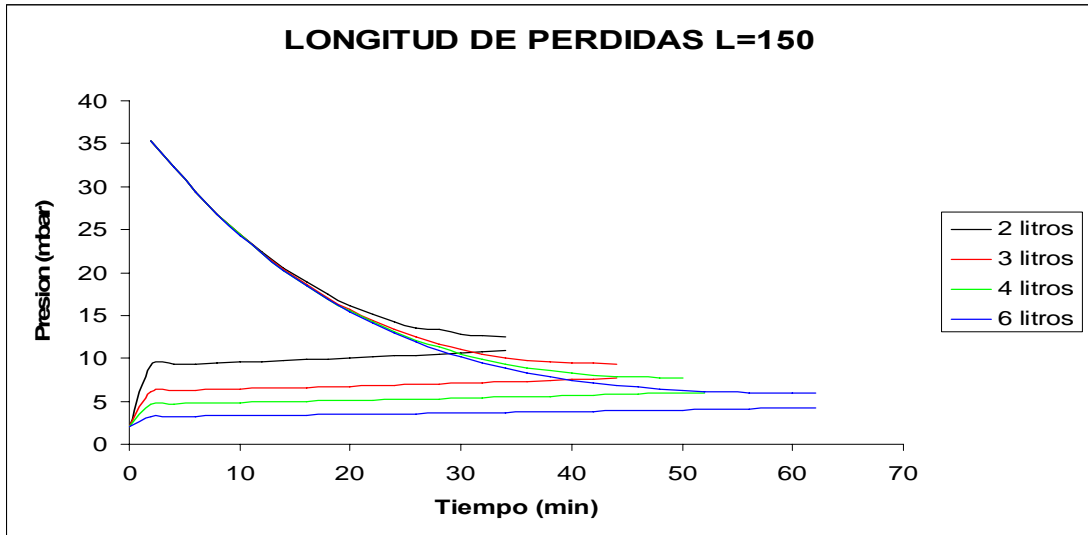
**Figura 30: temperatura contra tiempo para $L_{perdi} = 50$.
(Fuente: Autor)**



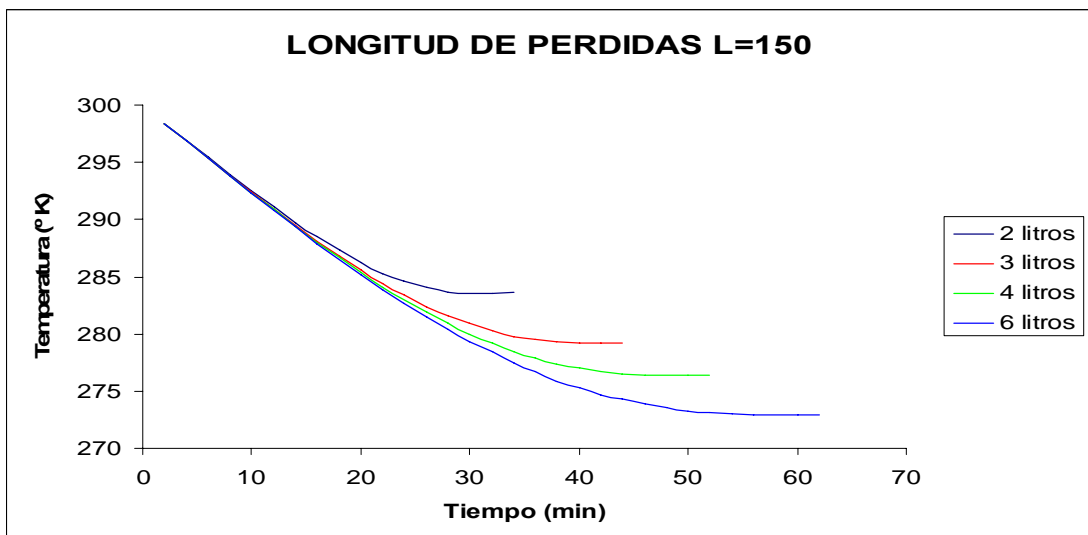
**Figura 31: presión contra tiempo para $L_{perdi} = 100$ (las graficas que descenden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**



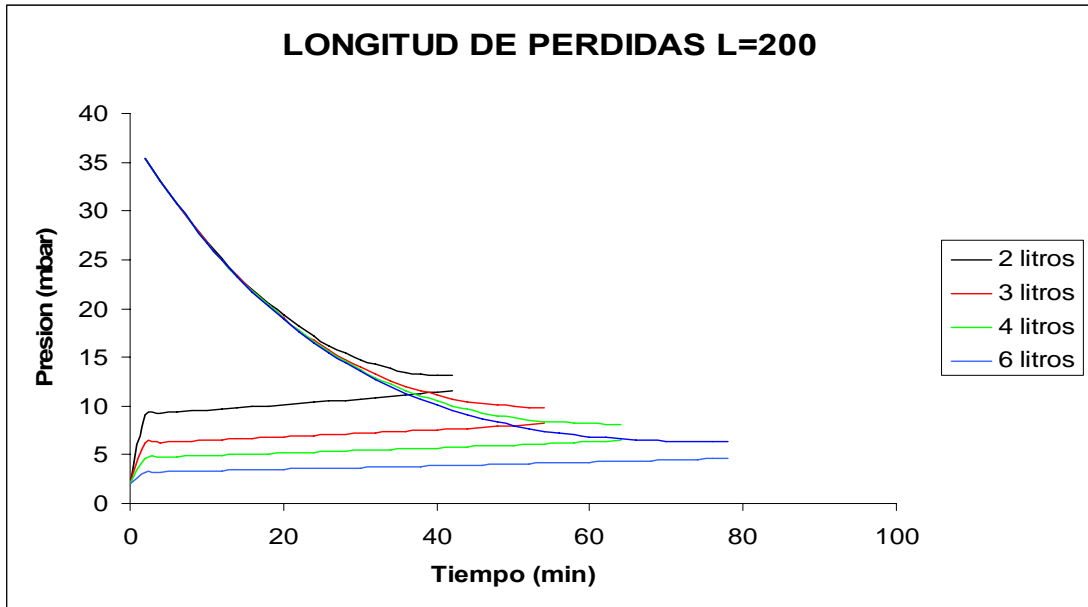
**Figura 32: Temperatura contra tiempo para $L_{perdi} = 100$.
(Fuente: Autor)**



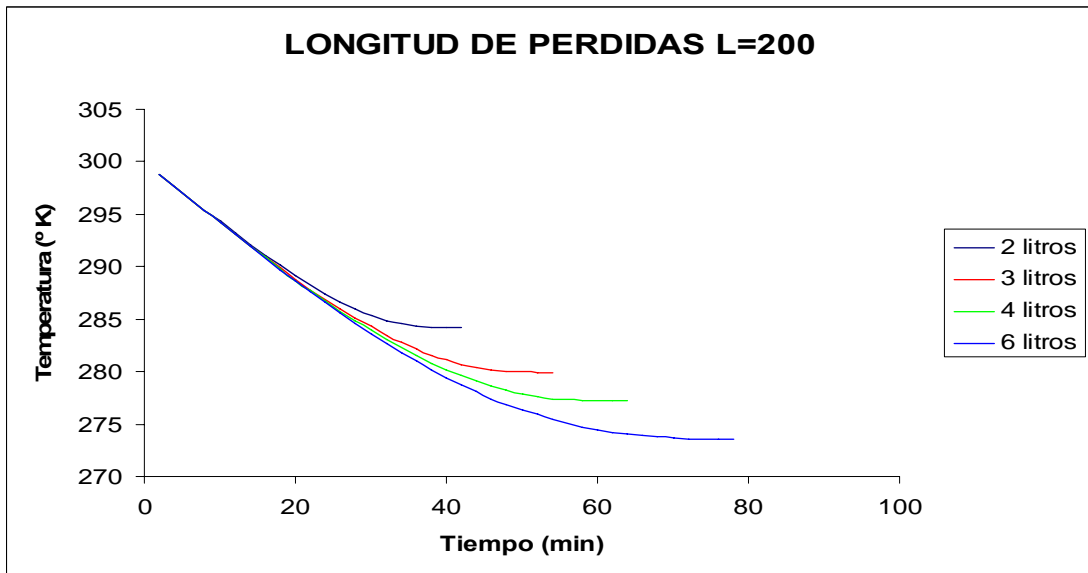
**Figura 33: Presión contra tiempo para L perdi= 150 (las graficas que descienden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**



**Figura 34: Temperatura contra tiempo para L perdi = 150.
(Fuente: Autor)**

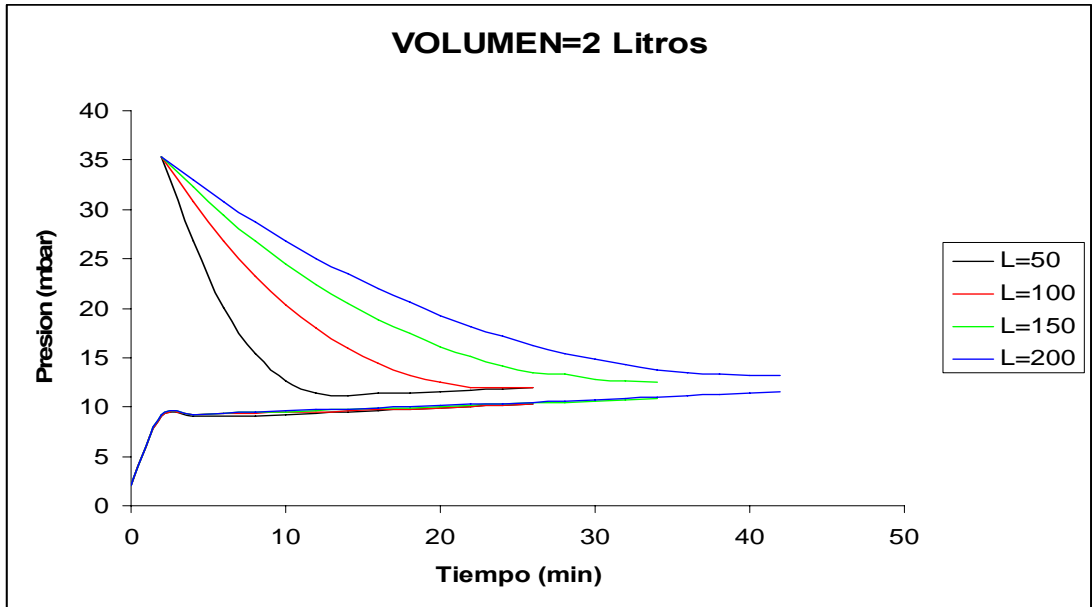


**Figura 35: Presión contra tiempo para $L_{perdi} = 200$ (las graficas que descienden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**

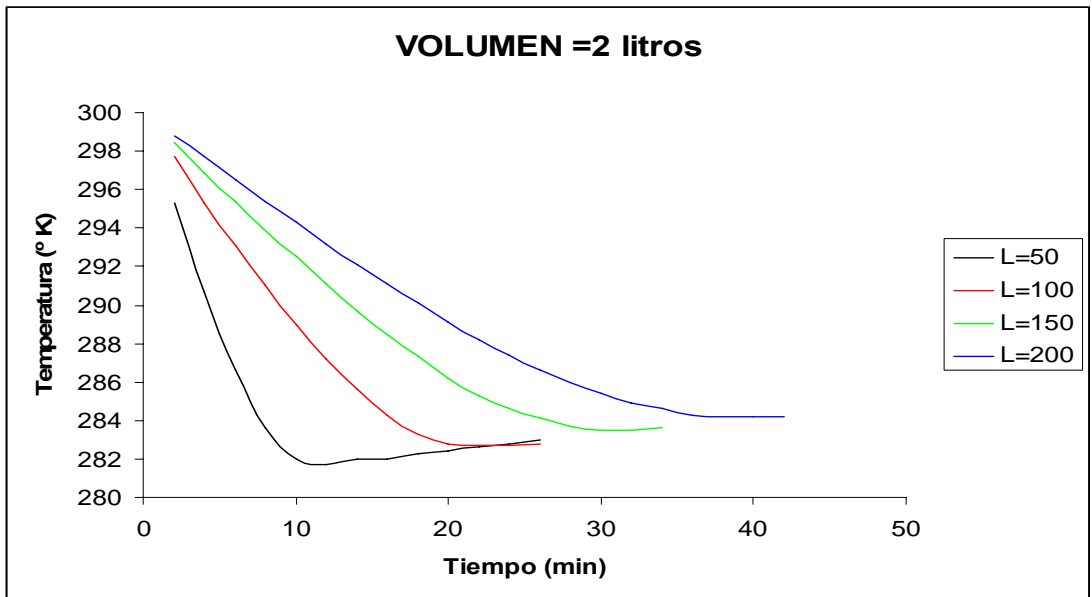


**Figura 36: temperatura contra tiempo para $L_{perdi} = 200$.
(Fuente: Autor)**

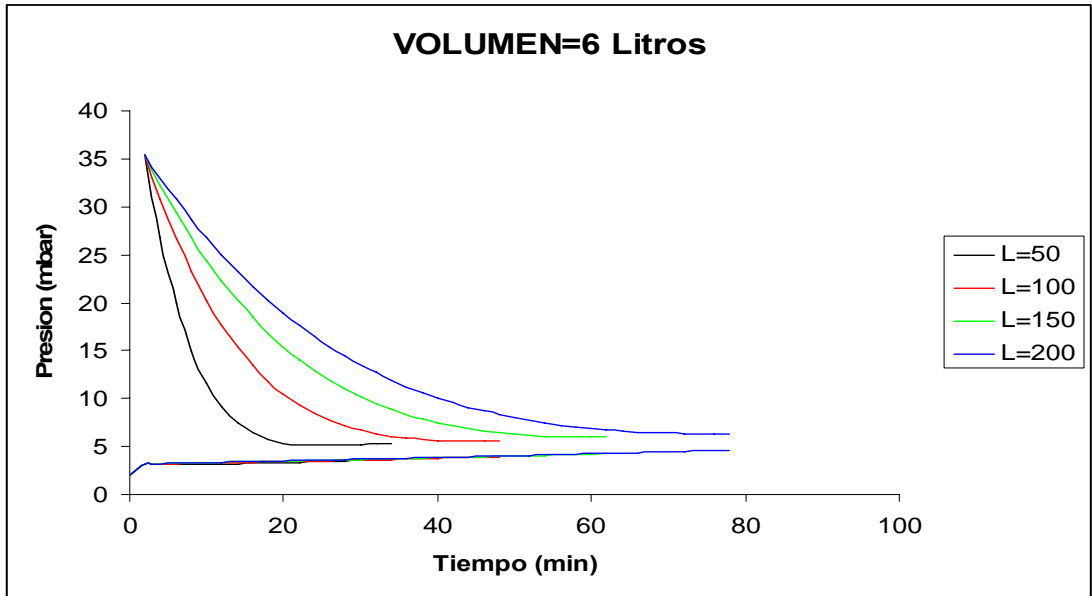
Variando la longitud de pérdidas:



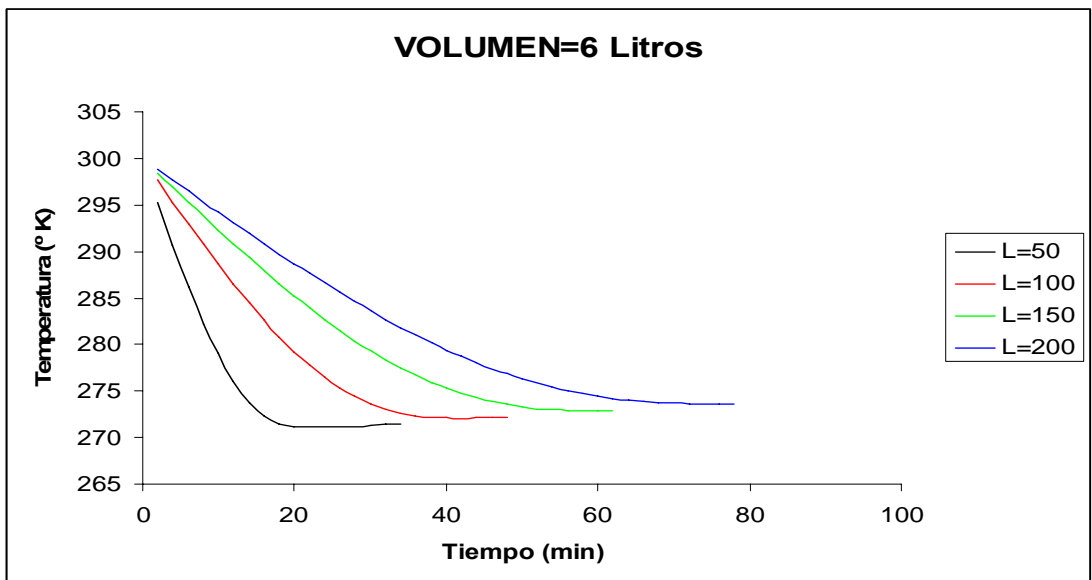
**Figura 37: Presión contra tiempo para $V = 2$ (las graficas que descienden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**



**Figura 38: Temperatura contra tiempo para $V = 2$.
(Fuente: Autor)**



**Figura 39: Presión contra tiempo para $V = 6$ (las graficas que descienden se refieren a la presión de saturación mientras la que aumentan son las presiones del sistema).
(Fuente: Autor)**



**Figura 40: Temperatura contra tiempo para $V = 6$.
(Fuente: Autor)**

Los resultados de las anteriores graficas muestran cuando se pone en contacto el recipiente del agua y el de la sílica gel pasado un determinado tiempo las dos presiones convergen a una presión de equilibrio, además, se puede notar que la caída de temperatura en el recipiente de almacenamiento de agua es bastante apreciable, haciendo atractivo el estudio pues lo que se busca es aprovechar este enfriamiento.

En las graficas anteriores se variaron las perdidas de calor y el volumen del sistema resolviendo las ecuaciones planteadas con anterioridad con la ayuda del programa EES, a continuación se variará la presión de vacío inicial graficando presión de sistema y presión del gas contra tiempo (fig 40 y 41) y temperatura contra tiempo (fig 42 y 43) para dos longitudes de perdidas diferentes.

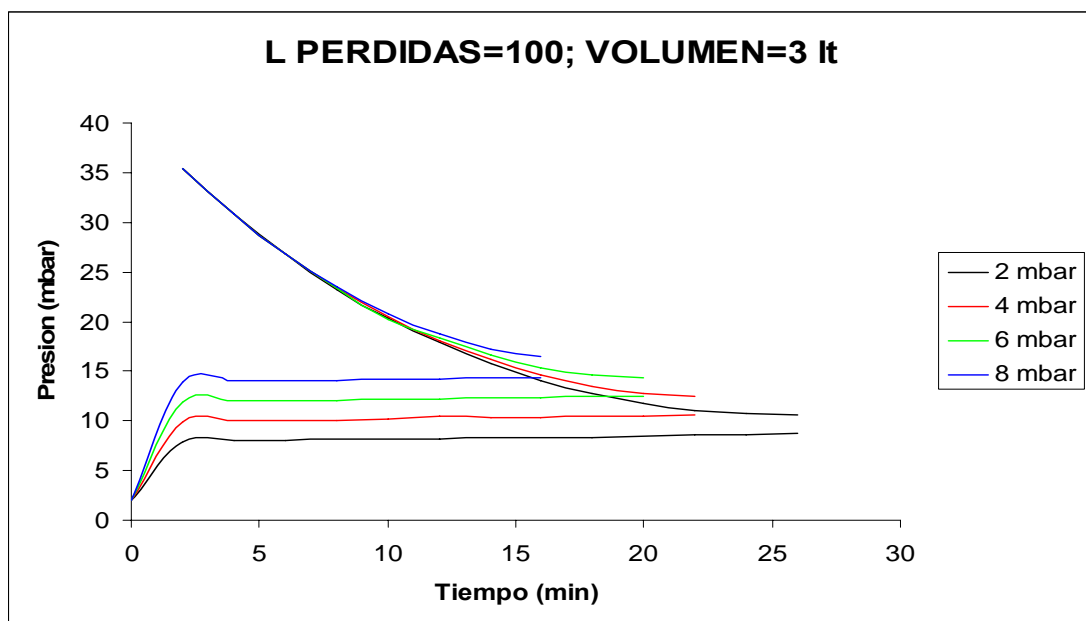


Figura 41: Presión contra tiempo para $L_{\text{perdidas}}=100$ y Volumen = 3lt.
(Fuente: Autor)

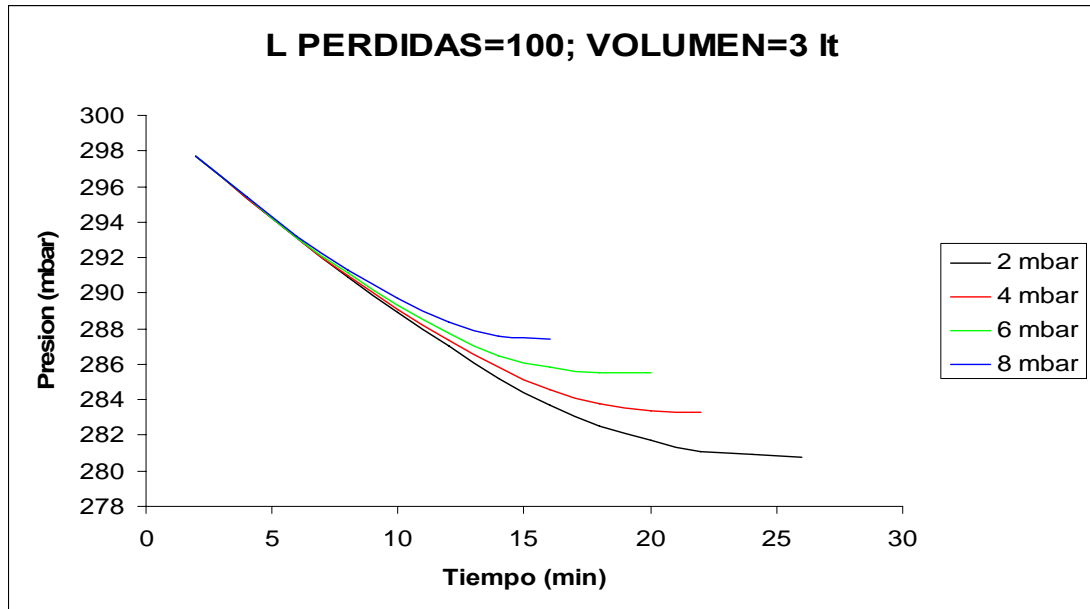
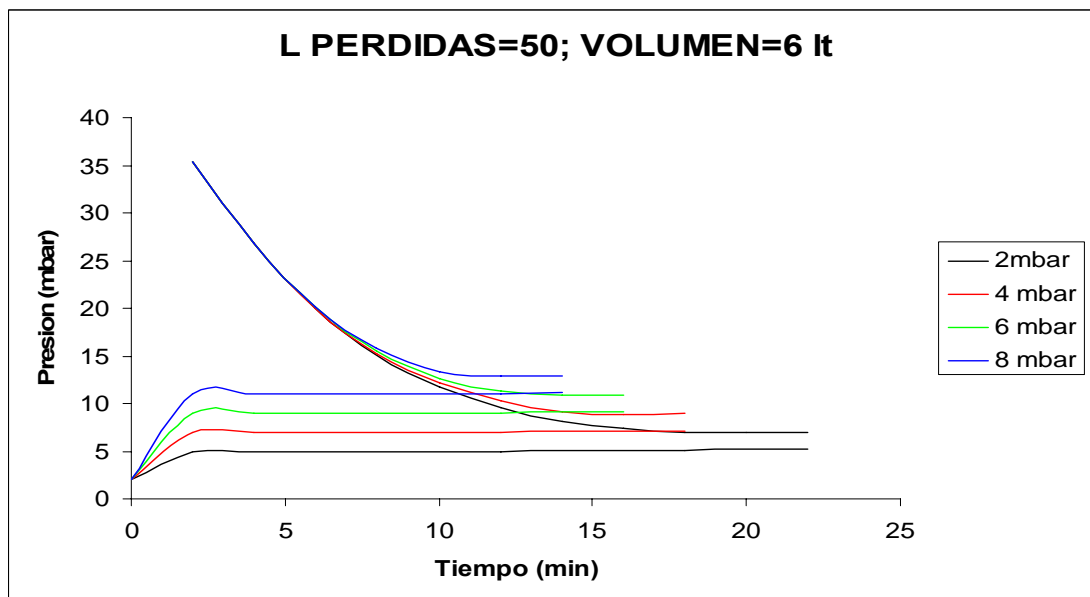
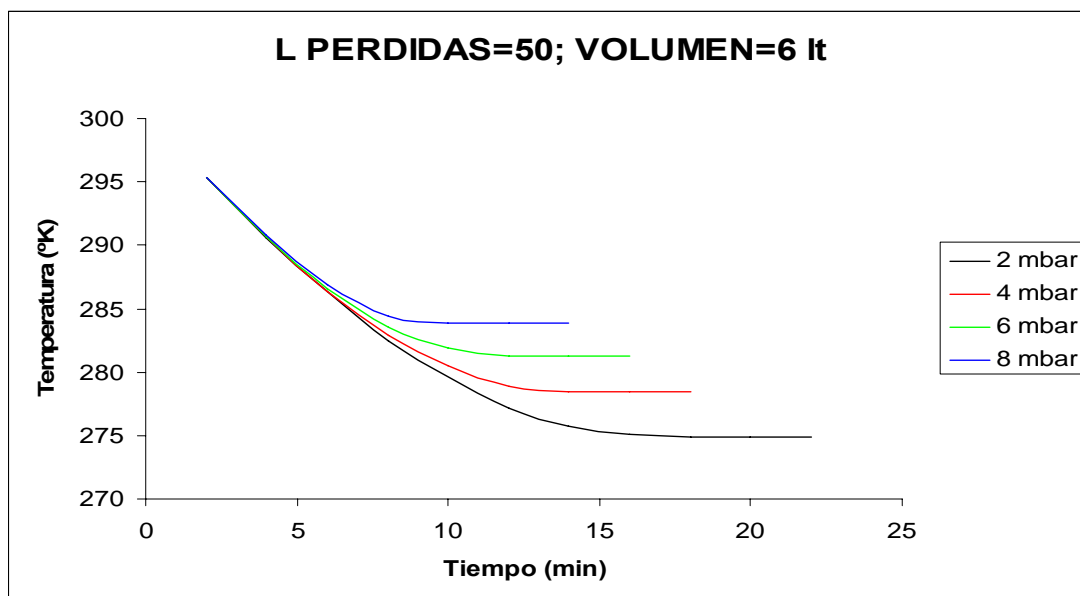


Figura 42: Temperatura contra tiempo para $L_{\text{perdidas}}=100$ y Volumen = 3lt.
(Fuente: Autor)



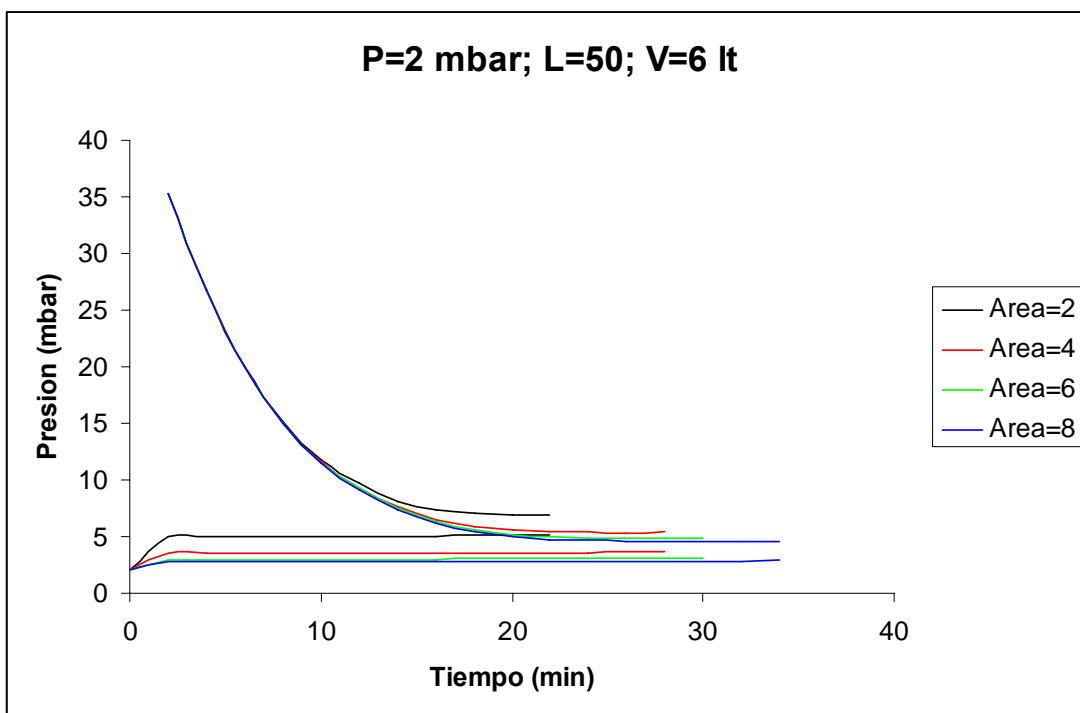
**Figura 43: Presión contra tiempo para $L_{\text{perdidas}}= 50$ y Volumen = 6lt.
(Fuente: Autor)**



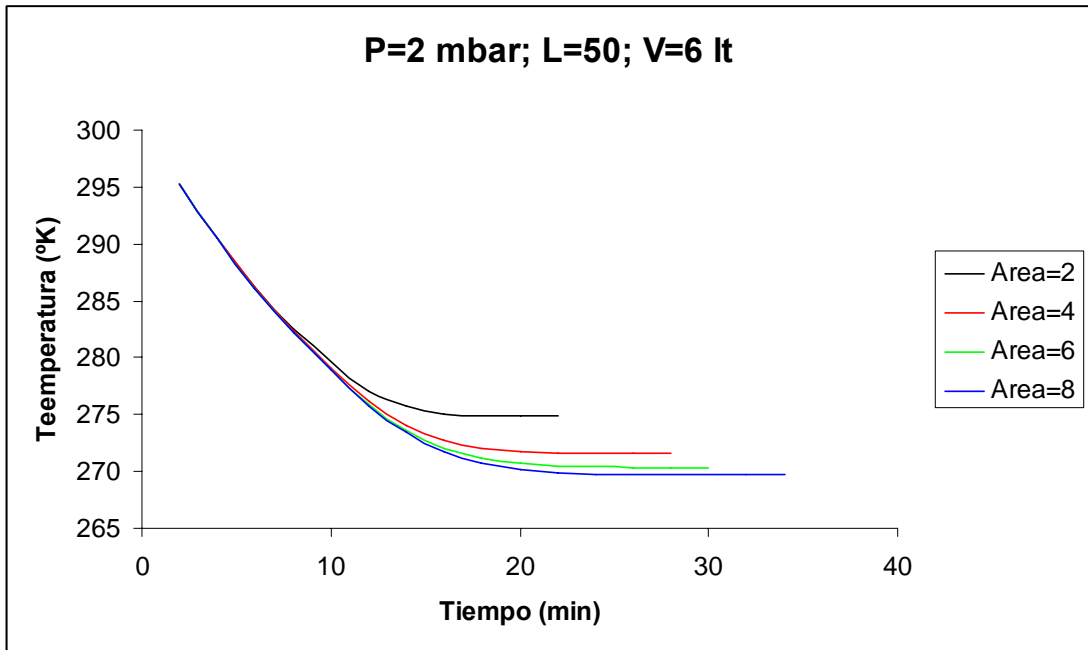
**Figura 44: Temperatura contra tiempo para $L_{\text{perdidas}}= 50$ y Volumen = 6lt.
(Fuente: Autor)**

Como podemos notar de las gráficas anteriores la temperatura esta ampliamente influida por la presión de vacío inicial que se alcance y su comportamiento es de forma exponencial lo que abre una serie de posibilidades futuras para este tipo de tecnología si se logran avances en desarrollo de bombas de vacío con presiones de operación mas bajas.

Para completar el análisis se debe variar el área de contacto del vapor con la sílica gel. A continuación se presentan los resultados gráficos obtenidos de la solución de las ecuaciones cuando variamos el área de absorción. Se tomo; la longitud de perdidas igual a 50, el volumen del sistema de 6lt y la presión de vacío inicial de 2mmbares los resultados fueron:



**Figura 45: Presión contra tiempo para Lperdidas= 50 y Volumen = 6lt y presión de vacío inicial = 2mmbar.
(Fuente: Autor)**



**Figura 46: Temperatura contra tiempo para Lperdidas= 50 y Volumen = 6lt y presión de vacío inicial = 2mmbar.
(Fuente: Autor)**

Como podemos ver la influencia del área de absorción es limitada y podría llegarse a plantear un modelo para hallar el área óptima de absorción, lo cual escapa de los alcances de este proyecto pero se deja planteado para una investigación posterior.

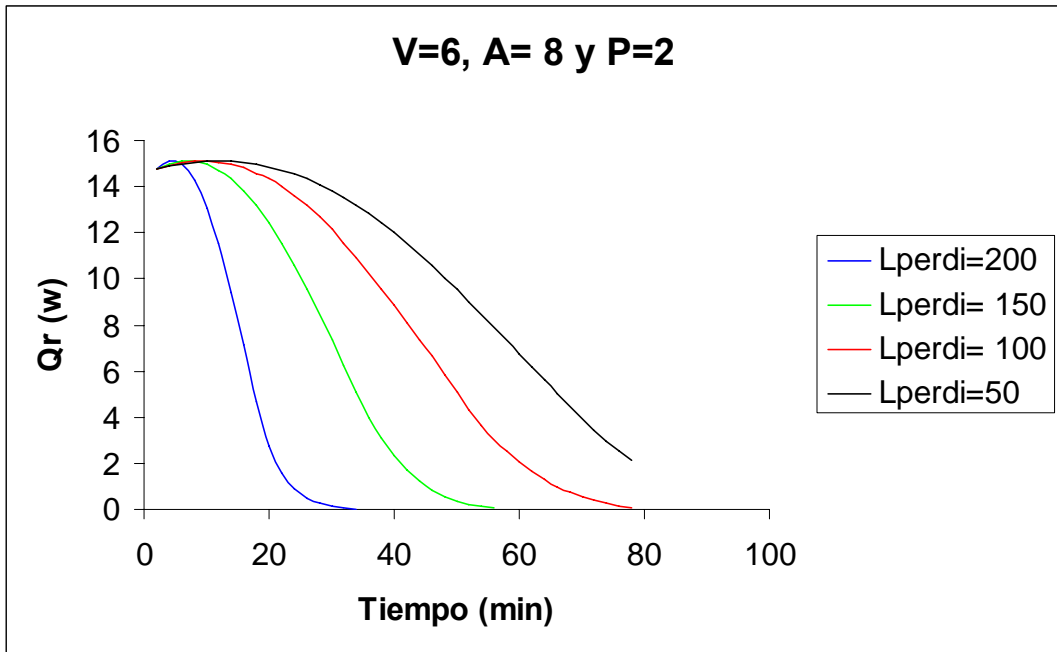


Figura 47: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes pérdidas de calor.

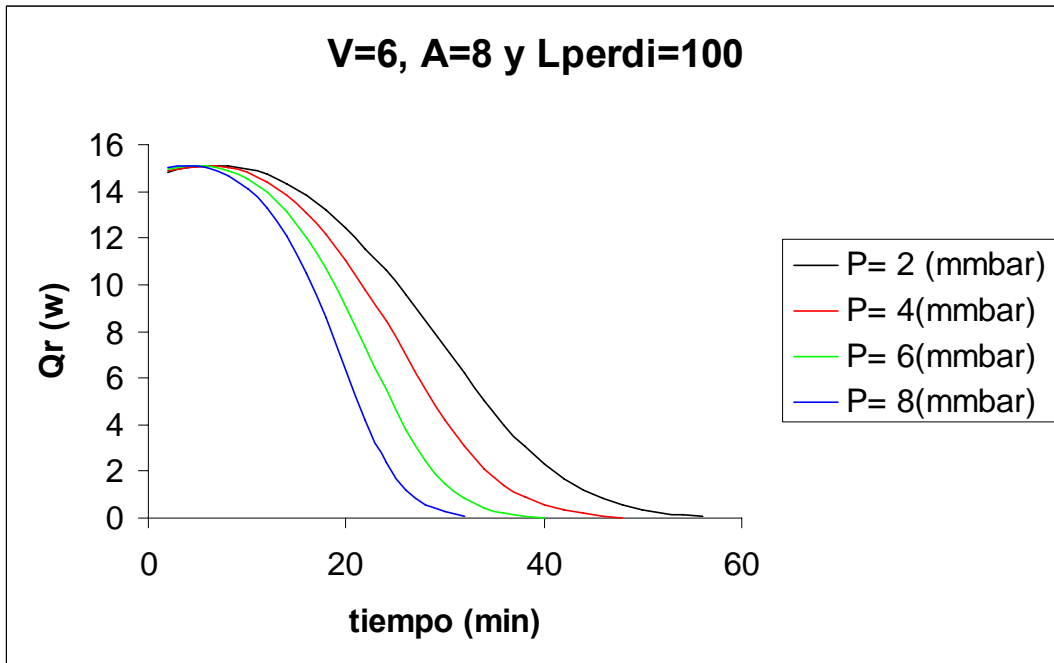


Figura 48: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes presiones iniciales.

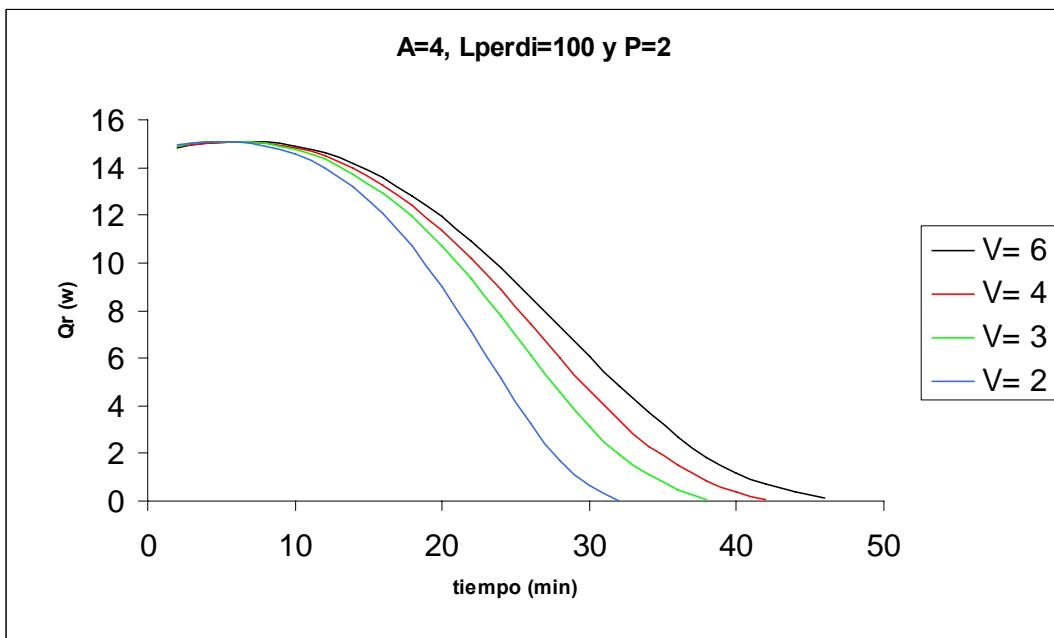


Figura 49: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes volúmenes del sistema.

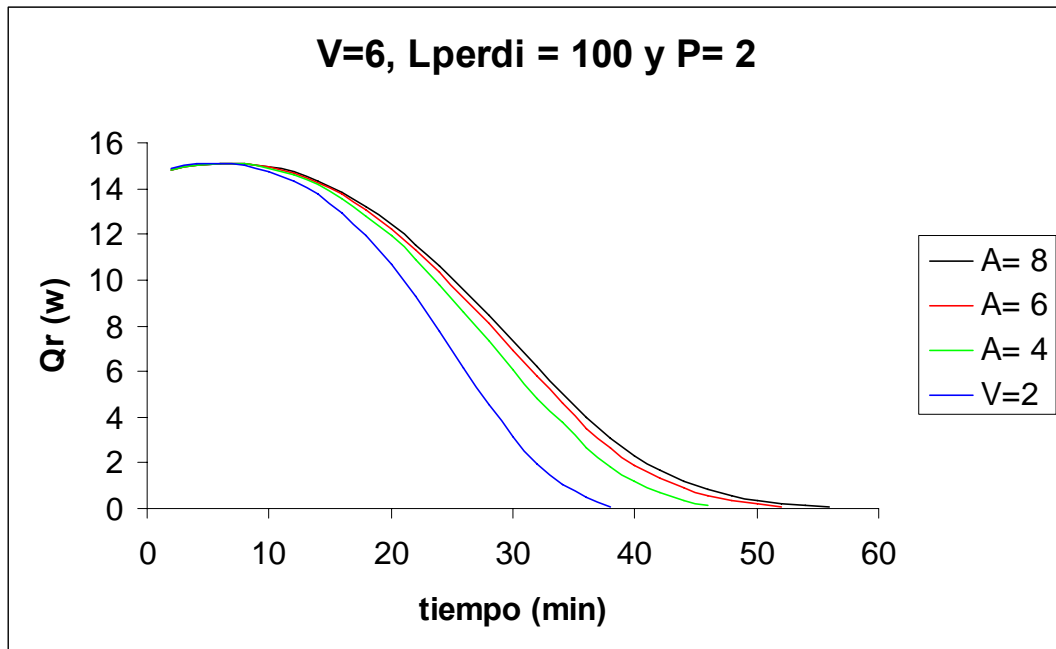


Figura 50: Cambio de la potencia en el tiempo a diferentes áreas de absorción de la sílica.

Como podemos notar la influencia en la capacidad refrigerativa de las diferentes variables no es proporcional y su combinación promoverá cambios significativos en la misma, siendo la presión inicial una de las una de la que aporta cambios más significativos y la que en ultimo caso concede propiedades al sistema para hacer viable su posterior estudio.

Se comprueba aquí que existe un área óptima de absorción, para la cual se debe crear un modelo para su cálculo, las graficas aquí consignadas podrían servir en un estudio posterior para la generación de modelos matemáticos mas precisos queque den una mayor luz de la aplicabilidad de esta tecnología.

De la grafica de las perdidas de calor se puede concluir que deben ser los mas pequeñas posibles para darle al modelo la posibilidad de sostener una potencia lo mas constante en el tiempo pues se nota que esta disminuye ostensiblemente ante el aumento de estas perdidas.

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONCENTRACION DE CALOR

3.3.1 Cálculo del área de captación de radiación

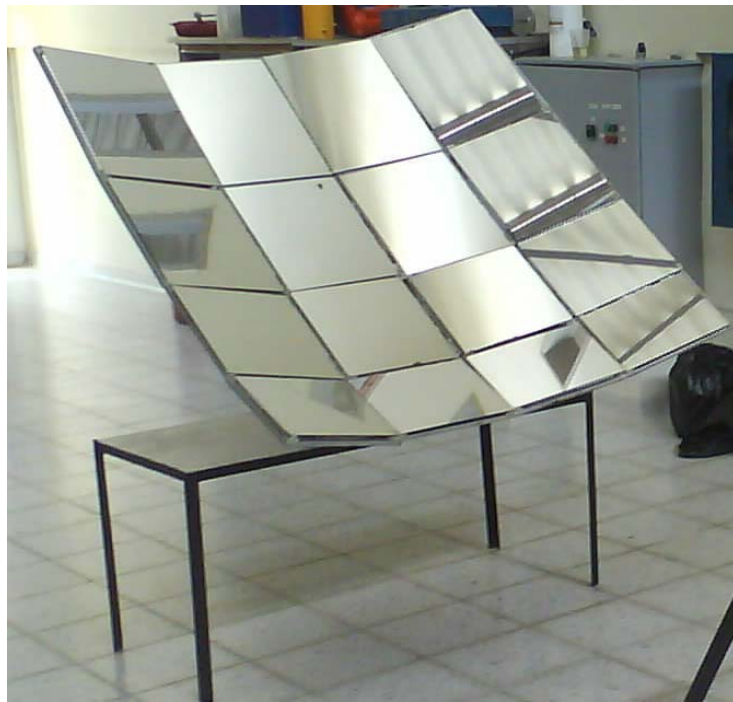


Figura 51: Concentrador solar.

(Fuente: Autor)

El cálculo del concentrador de calor debe partir de la radiación solar en la zona para poder realizar el cálculo del área necesaria para la captación de energía suficiente para los requerimientos de regeneración, de aquí tenemos que el calor de necesario depende del agua absorbida y se puede estimar en:

$$\dot{Q} = 475W$$

Si tenemos en cuenta que la radiación promedio en Bucaramanga es de $4,7KW.h/m^2$ podemos obtener que:

$4,5KW.h/m^2$ en 10 horas desde las 7:00 AM a las 5:00 PM

$$\frac{4,5KW.h/m^2}{10h} = 470 W/m^2 = Q/m^2$$

Ahora el área requerida para obtener la cantidad de energía requerida por el proceso de regeneración esta dada por:

$$A = \frac{475W}{470W/m^2} = 1,01m^2$$

3.3.2 Cálculo de los espejos.

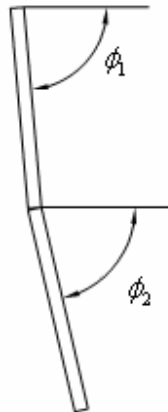


Figura 52: Angulo lateral.

(Fuente: Autor)

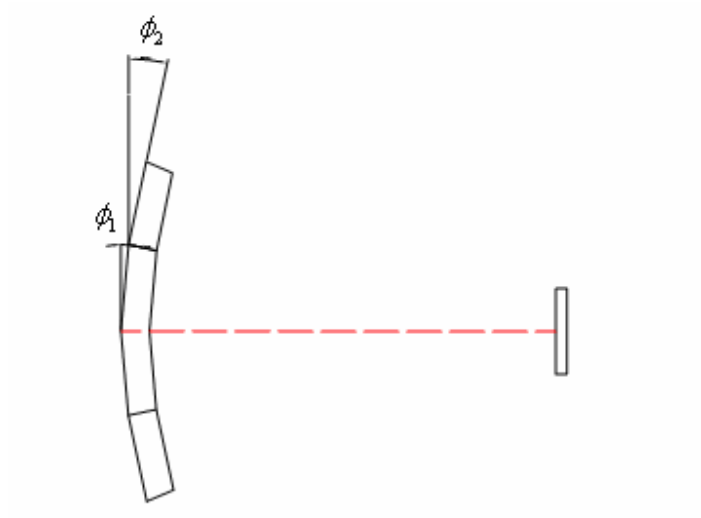


Figura 53: Vista superior del concentrador.
(Fuente: Autor)

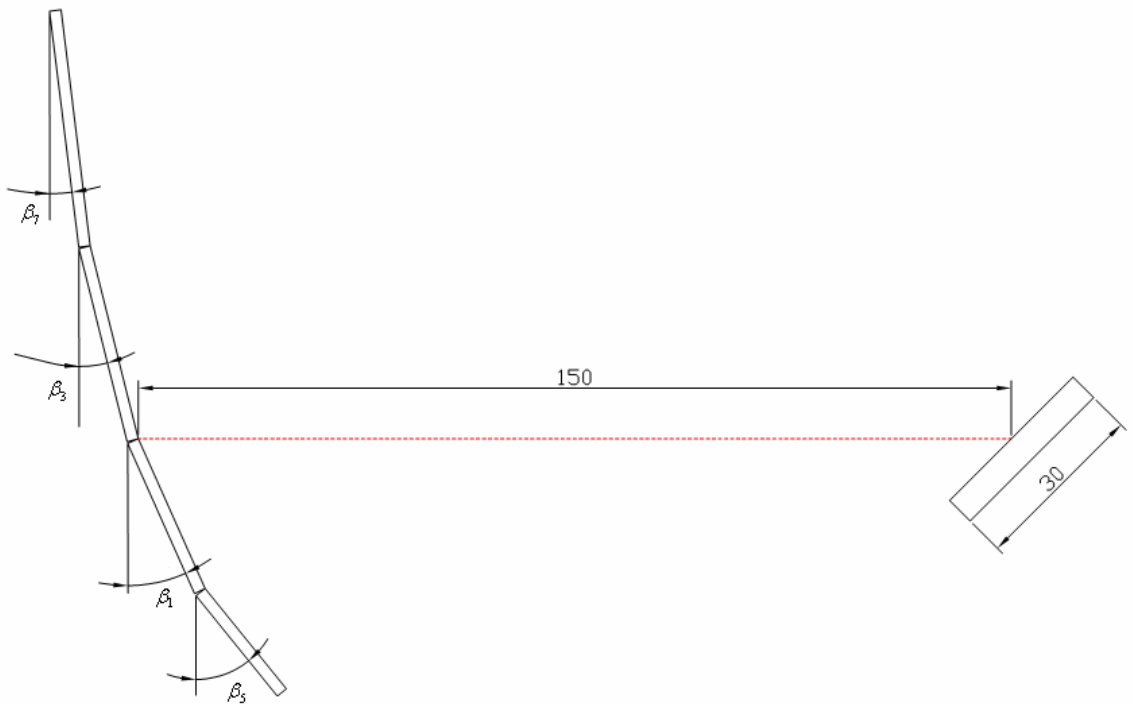


Figura 54: Angulo vertical.
(Fuente: Autor)



Figura 55: Angulo de inclinación del reactor.

(Fuente: Autor)

El concentrador contará con 3 filas y 4 columnas de espejos por lo cual se hace necesario calcular la ubicación espacial de los mismos.

La separación entre el reactor y el punto medio de los concentradores es de 1,5m y si el concentrador se encuentra inclinado 45% con respecto al angulote incidencia de la radiación tenemos:

$$\tan \Psi = \frac{0,15}{1,5} = 0,1$$

$$\Psi = \tan^{-1} 0,1 = 5^{\circ}42'3''$$

$$\cos \Psi = \frac{L1}{0,15}$$

$$L1 = \cos \alpha \times 0,15 = 0,14926m$$

Para el espejo 1, Se hace necesario el cálculo del área radiada en un espejo del concentrador, por tal teniendo L1 el área total del espejo esta dada por:

$$A_{es1R} = A_{esp1} \times \cos 45 = 0,063m^2$$

Para el espejo 2 que se encuentra a la derecha del espejo 1 tenemos que:

Tomaremos las líneas medias para el cálculo

Vista superior

$$je_2 = \cos \Psi \times 2Le_1 = 0,297m$$

$$fe_2 = \text{sen}\Psi \times 2Le_1 = 0,02964m$$

$$\tan \Psi_2 = \frac{0,15 + je_2}{1,5 - fe_2} = 0,304$$

$$\Psi_2 = 16^\circ 54' 34''$$

$$\cos \Psi_2 = \frac{L_2}{2 \times 0,15}$$

$$L_2 = 0,287m$$

El área total del espejo esta dada por:

$$A_{esp2} = 0,287 \times 0,3 = 0,0861$$

El área radiada esta dada por:

$$A_{esprad} = A_{esp2} \times \cos 45 = 0,06088m^2$$

En vista que el área radiada no cumpliría con las expectativas se hace necesario aumentar el número de filas a 4 y recalcular.

Los espejos tendrán todos una inclinación con respecto a Z y con respecto a X por lo cual se ubica en el plano tridimensional, los ángulos Ψ_1 y Ψ_2 calculados anteriormente son validos y funcionan para la nueva geometría que por su condición simétrica y su configuración espacial solo se hace necesario el calculo de los ángulos de inclinación con respecto al eje X los cuales se tendrán que hacer en los espejos 1, 3, 7 y 5 y los nombraremos con B1, B2, B7 y B5, estos ángulos modifican la geometría de los espejos y sin modificar las dimensiones L1 y L2 además cambiara el ángulo con respecto a los rayos solares y por esto cambiaran la superficie inclinada, como este ángulo se encuentra en el plano XY las geometrías la tomamos planas e

ignoraremos el ángulo con respecto al plano ZY también se calculara la altura de estos espejos:

$$X_{esp_3} = 0,15 \cos 45 = 0,106m$$

$$Y_{esp_3} = 0,15 \cos 45 = 0,106m$$

$$\tan \phi_3 = \frac{1,5 \times X_{esp1}}{Y_{esp1}} = 15,15 \quad (3.32)$$

$$\phi_3 = \tan^{-1} 15,15 = 86^\circ 13' 25''$$

$$\phi_3 + 2\tau_3 = 180$$

$$\tau_3 = 46^\circ$$

$$\phi_3 + \tau_1 + \beta_1 = 180 \quad (3.33)$$

$$\beta_3 = 46^\circ 53' 17''$$

$$\frac{\text{sen}(90 - \phi_2)}{Z_3} = \frac{\text{sen}(D_3 + \phi_3)}{1,5} \quad (3.34)$$

$$Z_3 = 0,1353$$

Espejo 7

$$Y_{esp_7} = 2Z_3 \cos \beta_3 = 0,185$$

$$X_{esp_7} = 2Z_3 \text{sen} \beta_3 = 0,1975$$

$$\tan \phi_7 = \frac{1,5 + X_{esp_3} - X_{esp_7}}{Y_{esp_3} + Y_{esp_7}} = 4,84 \quad (3.35)$$

$$\phi_7 = 78^\circ 19' 36''$$

$$J_1 = B_1 = 50^\circ 50' 11''$$

Para Z_1 tenemos que

$$\text{sen}(\phi_7 - 45) \times 0,3 = 0,1648 = G_{esp_7}$$

(3.36)

$$\text{sen}\beta_7 = \frac{G_{\text{esp}_7}}{2Z_7}$$

(3.37)

$$Z_7 = \frac{G_{\text{esp}_7}}{2\text{sen}\beta_7} = 0,1062 \quad (3.38)$$

Espejo 5

$$X_{\text{esp}_5} = \text{sen}\beta_1 \times 2Z_1 = 0,2276m$$

(3.39)

$$Y_{\text{esp}_5} = \cos\beta_1 \times 2Z_1 = 0,2456m$$

(3.39)

$$\tan\tau_5 = \frac{1,5 - 0,106 + 0,2276}{0,2456 + 0,106} = 4,612$$

$$\tau_5 = \tan^{-1} 4,612 = 77^\circ 45' 58''$$

$$B_5 = \frac{J_5}{2} = 38^\circ 52' 59''$$

$$\text{sen}(57^\circ 14' 2'') = \frac{G_{\text{esp}_5}}{0,3}$$

$$G_{\text{esp}_5} = 0,25226$$

$$\text{sen}\beta_5 = \frac{G_{\text{esp}_5}}{2Z_5}$$

$$Z_5 = 0,2009m$$

3.3.3 Cálculo del área total de radiación.

El cálculo del área de radiación se debe hacer por separado de cada espejo ya que las dimensiones y los ángulos cambian.

Espejo 1

$$A_{esp1} = 2Z_1 \times 2L_{esp2} = 0,09994$$

El área radiada efectiva depende del ángulo β_1 así:

$$A_{rad1} = A_{esp1} \times \text{sen}\beta_1 = 0,06794m^2$$

Espejo 2

$$A_{esp2} = 2Z_1 \times 2L_{esp2} = 0,09608$$

Como el ángulo de inclinación en el plano XY es el mismo se da:

$$A_{rad2} = A_{esp2} \times \text{sen}\beta_1 = 0,06532$$

Espejo 3

$$A_{esp3} = 2Z_3 \times 2L_{esp2} = 0,797m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp3} \times \text{sen}\beta_3 = 0,0582$$

Espejo 4

$$A_{esp4} = 2Z_3 \times 2L_{esp2} = 0,0777m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp4} \times \text{sen}\beta_3 = 0,057$$

Espejo 5

$$A_{esp5} = 2Z_5 \times 2L_{e1} = 0,12m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp5} \times \text{sen}\beta_5 = 0,07532$$

Espejo 6

$$A_{esp6} = 2Z_6 \times 2L_{esp1} = 0,1153m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp6} \times \text{sen}\beta_5 = 0,0724m^2$$

Espejo 7

$$A_{esp7} = 2Z_7 \times 2L_{esp1} = 0,0634m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp7} \times \text{sen}\beta_7 = 0,049162m^2$$

Espejo 8

$$A_{esp8} = 2Z_8 \times L_{esp2} = 0,061m^2$$

$$A_{efecrad} = A_{esp8} \times \text{sen} \beta_7 = 0,0473m^2$$

Aprovechando las simetrías tenemos que

$$A_{radT} = 2(A_{RE1} + A_{RE2} + A_{RE3} + A_{RE4} + A_{RE5} + A_{RE6} + A_{RE7} + A_{RE8})$$

$$A_{radT} = 0,9853 \quad m^2$$

Con esto cumplimos los requerimientos de regeneración de la sílica gel.

La ubicación geográfica de la nevera es de vital importancia ya que los rayos solares llegan a la tierra con una cierta inclinación la recomendación es inclinar el concentrador en una cantidad igual a la latitud del lugar mas de 10° en dirección norte por tal el concentrador cambia su geometría:

$$\text{Latitud Bucaramanga} = 7^\circ 07' 24''$$

$$\phi \text{ Inclinación} = 17^\circ 07' 24''$$

Los ángulos β quedan afectados por este ángulo ϕ .

3.3.4 Diseño del mecanismo de seguimiento solar



Figura 56: mecanismo de seguimiento solar.

(Fuente: Autor)

Este mecanismo debe ir a muy bajas revoluciones y con una potencia también muy baja, además, y como objetivo del proyecto es hacer un refrigerador en lo posible independiente de la energía eléctrica tradicional se hace necesario que este mecanismo sea manual por esto tenemos que las revoluciones a las que debe girar son aproximadamente de:

$$\omega_{concentrador} = 0,0007 \text{ rev / min}$$

La reducción que se da es de aproximadamente de un diámetro de piñón grande de 50 y del piñón de 5, tenemos que:

$$\omega_{piñonpequño} = 0,007 \text{ rev / min}$$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.1 Análisis del modelo

El análisis del modelo se basa en el principio de la bomba de calor o un sistema que proporciona calefacción y refrigeración transfiriendo calor de un lugar a otro, el par sílica gel agua es utilizada para las pruebas desarrolladas en el laboratorio debido a que es una alternativa en el desarrollo de nueva tecnología para la refrigeración utilizando como fuente de energía la radiación solar, esta tecnología es una buena opción y esta en desarrollo a nivel mundial debido a problemas que han tenido el monopolio de sistemas de refrigeración convencionales (refrigeración por compresión) y esta sumado a la sobreoferta de aire acondicionado, estos sistemas son alimentados por energía eléctrica causando el colapso de los plantas eléctricas en diferentes zonas del planeta, debido a la sobreoferta que actualmente se esta generando a nivel mundial.

La adsorción es un fenómeno en el cual los átomos o moléculas de una sustancia se concentran en la superficie, un calentamiento posterior, hace que la molécula retenida se libere. El sistema de refrigeración por adsorción utilizando como par de trabajo sílica gel agua es seleccionado para el modelo debido a la facilidad y la disposición en el mercado y su relativo bajo costo, además debido a que la temperatura de regeneración es muy baja comparada otros tipos de adsorbentes.

Tomando el sistema de adsorción sílica gel agua en recipientes separados expuestos a una diferencia de presiones (en vacío muy bajas en el orden de milibares) el agua líquida pasa a vapor y es absorbido por la sílica gel, por lo tanto el calor de evaporación está siendo retirado del agua transfiriéndolo al absorbente. Se produce la transferencia de calor del agua hacia la sílica gel, (ver la figura 53).

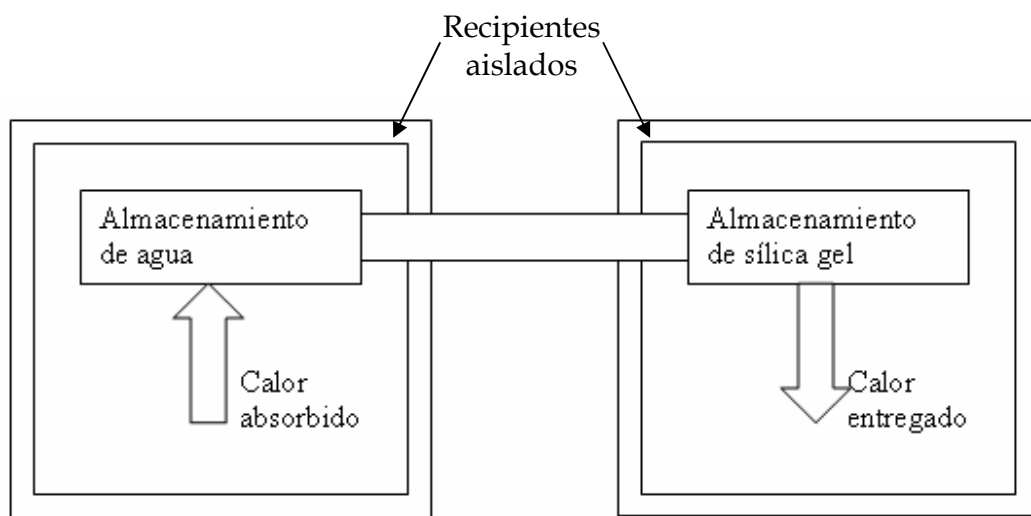


Figura 57: esquema de la bomba de calor.

(Fuente: autor)

4.1.2 Pruebas experimentales del prototipo

4.1.2.1 Prueba sílica gel. La sílica gel utilizada durante las pruebas es de color azul la cual es un indicador de saturación que desaparece gradualmente en la medida que la sílica gel absorbe la humedad cambiando de color azul a rosado cuando se satura, cabe destacar que esta clase de sílica gel que

proviene de un impregnado de Cloruro de Cobalto es tóxico, por tal razón es restringido al uso industrial.

Para esta prueba como en los demás es necesario e indispensable mantener la sílica gel totalmente regenerada o deshidratada, esta regeneración se desarrolla mediante la aplicación de calor para que la sílica gel desprenda en forma de vapor el agua adherida a ella, esto quiere decir que se debe utilizar una fuente de calor.

4.1.2.1.1 Regeneración de sílica gel utilizando como fuente de calor un horno a gas. Se introduce en el horno un recipiente metálico concéntrico de forma que el área en contacto es la interna donde la sílica es retenida por una malla metálica (ver figura).

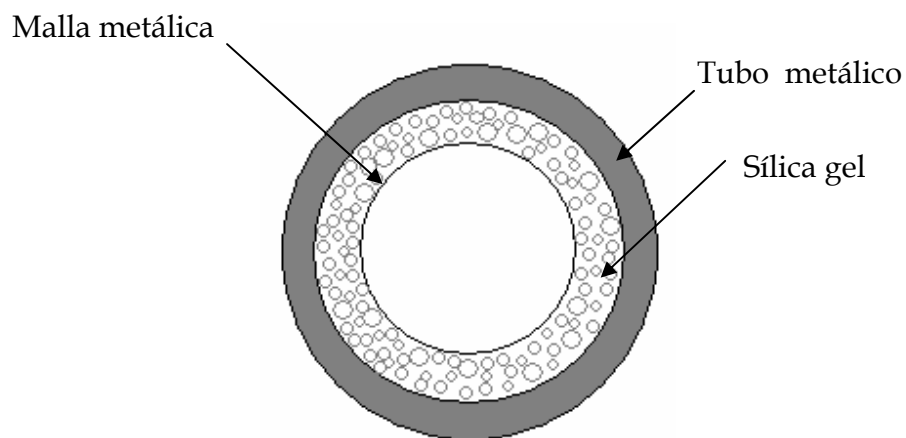


Figura 58: Recipiente de la sílica gel.

(Fuente: Autor)

Los datos obtenidos son los siguientes:

t (min)	Masa evaporada (gr) 200°	Masa evaporada (gr) 120°	Masa evaporada (gr) 180°
0	0	0	0
5	0,09	0,11	0,05
10	0,09	0,05	0,09
15	0,3	0,02	0,08
20	2,79	0,13	0,09
25	3,83	0,11	0,1
30	3,97	0,05	0,23
35	4,45	0,61	0,3
40	5	1,09	1,54
45	5,4	1,16	2,79
50	3,55	1,06	2,84
55	5,4	1,14	3,83
60	2,15	1,08	3,87
65	3,43	1,32	3,97
70	3,13	1,31	3,96
75	2,48	1,14	4,12
80	1,6	1,3	3,12
85	0,98	1,61	3,08
90	0,29	1,27	3,31
95	0,18	1,62	1,35
100	0,11	1,43	1,82
105	0,08	0,94	1,42
110	0	1,69	1,36
115	0	0,95	1,25
120	0	1,22	1,15
125	0	1,22	1,39
130	0	1,15	0,45
135	0	1,13	0,37
140	0	1,08	0,11
145	0	1,1	0
150	0	0,97	0
155	0	1,18	0
160	0	0,79	0
165	0	0,98	0
170	0	0,95	0
175	0	0,87	0
180	0	0,87	0

190	0	0,72	0
195	0	0,99	0
200	0	0,53	0
205	0	0,67	0
210	0	0,67	0
215	0	0,65	0
220	0	0,6	0
225	0	0,56	0
230	0	0,47	0
235	0	0,4	0

Tabla 2: Tiempos de regeneración de la sílica gel a diferentes temperaturas en horno a gas.

(Fuente: Autor)

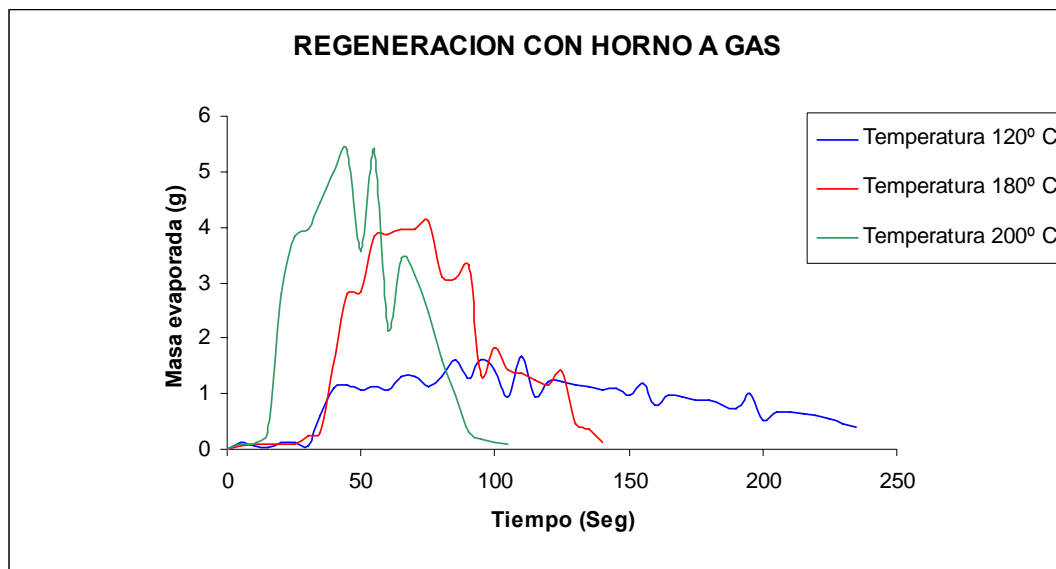


Figura 59: Regeneración con horno de gas

(Fuente: Autor)

Temperatura de regeneración	Masa inicial sílica gel	Masa final sílica gel	Masa evaporada o regenerada	% ADSORCION
120° C	196,5	155,54	40,96	26,33406198
180° C	197,03	148,99	48,04	32,24377475
200° C	197,27	147,97	49,3	33,31756437

Tabla 3: Porcentaje de adsorción y regeneración en horno a gas.

(Fuente: Autor)

La regeneración de la sílica gel en el horno a gas se realizó para tres temperaturas diferentes 120° C, 180° C, 200° C.

La adsorbibilidad de la sílica gel es medida con respecto al porcentaje de agua evaporada en masa, la adsorbibilidad promedio de la sílica gel regenerada en el horno es aproximadamente de 31.3% el cual muestra buenos resultados y puede ser utilizada en lo correspondiente al análisis de la bomba de calor.

Con respecto a la temperatura en la regeneración, comparando las tres muestras la temperatura más idónea es de 180° C para que la sílica gel sea reutilizada debido a que fue regenerada en menor tiempo que la muestra a 120° C y que no cambio de apariencia física conservando sus propiedades iniciales a diferencia de la muestra regenerada a 200° C donde una cantidad de sílica cambio a un color más oscuro (quemado) perdiendo así sus propiedades adsorptivas.

4.1.2.1.2 Regeneración de sílica gel utilizando el colector solar. Para la prueba se utilizó el mismo recipiente en la prueba de regeneración del horno, las pruebas se hicieron en 3 días donde las condiciones climáticas fueron aceptables:

Prueba 1: 14 de Agosto de 2008

Prueba 2: 16 de Agosto de 2008

Prueba 3: 23 de Agosto de 2008

Los datos obtenidos son los siguientes:

t (min)	Masa evaporada 1	Masa evaporada 2	Masa evaporada 3
0	0	0	0
5	0,1	0,11	0,05
10	0,11	0,33	0,2
15	0,05	0,49	0,26
20	0,02	0,58	0,32
25	0,13	3	1,54
30	0,11	4,35	2,85
35	0,05	3,2	2,23
40	0,61	3,13	2,32
45	1,09	3,15	2,31
50	1,16	3,65	3,1
55	1,06	3,12	3,3
60	1,14	3,65	2,54
65	1,08	3,15	2,82
70	1,32	3,32	2,29
75	2,03	3,11	2,32
80	2,13	3,12	2,11
85	2,15	2,65	2,13
90	2,5	2,13	1,95
95	2,64	2,35	1,85
100	2,65	2,31	1,65
105	2,31	2,11	1,52
110	2,25	1,98	1,89
115	2,12	1,15	1,36
120	1,95	1,13	1,64
125	1,98	1,17	1,39
130	2,02	1,12	1,27
135	2,32	1,27	1,13
140	1,13	0,96	1,22
145	1,08	0,98	1,13

150	1,1	0,74	1,22
155	0,97	0,52	1,13
160	1,18	0,33	1,15
165	1,35	0,35	1,07
170	1,11	0,24	0,99
175	1,36	0,13	1,02
180	1,25	0,15	0,97
190	0,98	0,12	0,96
195	1,13	0,11	0,99
200	1,5	0,09	0,64
205	1,52	0,08	0,65
210	1,64	0,07	0,85
215	1,35	0,07	0,36
220	1,23	0,06	0,54
225	0,92	0,01	0,25
230	0,75	0	0,15
235	0,86	0	0,6
240	0,35	0	0,01

Tabla 4: Tiempos de regeneración de la sílica gel a diferentes temperaturas en colector solar.
(Fuente: Autor)

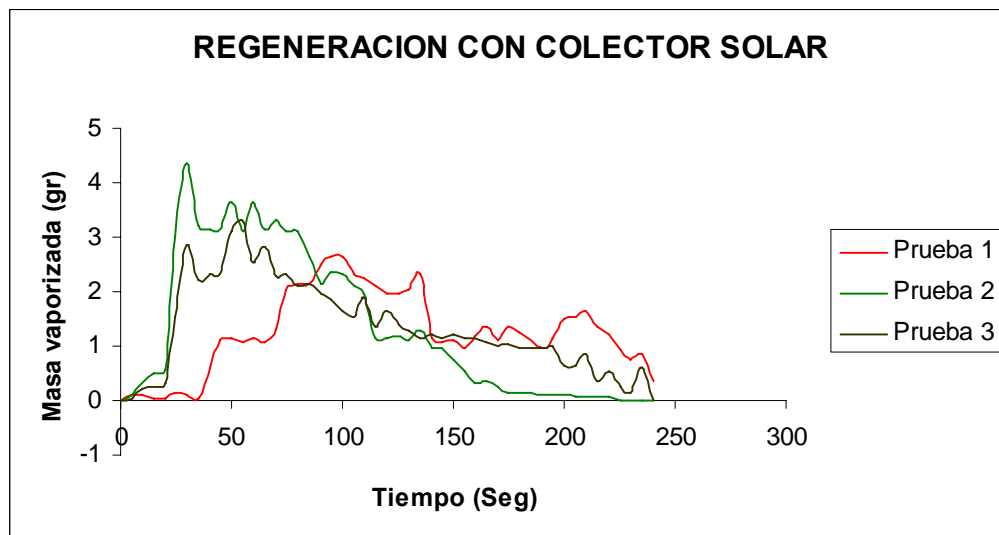


Figura 60: regeneración con colector solar.

(Fuente: Autor)

TEMPERATURA PROMEDIO DE REGENERACION 180° C			
	Masa inicial de sílica gel (gr)	Masa final de sílica gel (gr)	% ADSORCION
Prueba 1	196,85	59,84	30,3987808
Prueba 2	197,02	65,84	33,41792711
Prueba 3	197,01	64,24	32,60748185

Tabla 5: porcentaje de adsorción y regeneración en colector solar.

(Fuente: Autor)

Los resultados mostrados son favorables ya que la temperatura promedio alcanzada en el colector es de 180 °C y la sílica gel no perdió sus propiedades adsorptivas lo que indica que puede ser reutilizada.

La regeneración depende principalmente de las condiciones ambientales pues la disposición de energía solar depende de las condiciones climáticas, por esta causa se eligieron 3 días diferentes para la toma de datos.

4.1.2.2 Pruebas del modelo (bomba de calor). El modelo descrito en el capítulo 3 fue utilizado durante las pruebas a condiciones de alto vacío.

El análisis fue realizado en cada recipiente tanto en el de agua como en el de sílica gel los resultados se presentan a continuación.

t (min)	Prueba 1 T (°C)	Prueba 2 T (°C)	Prueba 3 T (°C)
0	25,1	27,9	26
2	33	31,2	28,5
4	38,1	33,1	29,3
6	40,2	34,3	32,1

8	38,2	34	32,2
10	36	33,8	31,8
12	35	33,8	31,8
14	35,5	33,6	31,6
16	34	33,7	31,5
18	33,5	33,5	31,5
20	33,1	33,5	31
22	32,8	33,4	31
24	31,5	33,3	31
26	31,2	33,4	30,9
28	31	33,2	30,5
30	31	33,2	30,4

Tabla 6: temperatura y tiempo en la sílica gel
(Fuente: Autor)

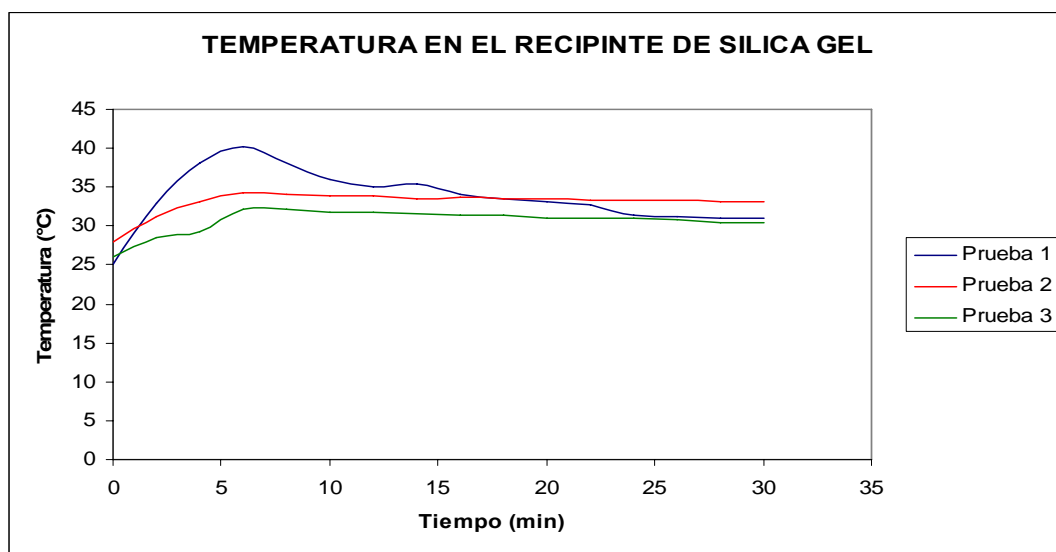


Figura 61: Temperatura en el recipiente de sílica gel.
(Fuente: Autor)

Análisis en el recipiente de sílica gel

t (min)	Prueba 1 T (°C)	Prueba 2 T (°C)	Prueba 3 T (°C)
0	27,1	27,8	27

2	22	25,1	24,5
4	20,5	24,3	24,1
6	18,7	23,7	23,6
8	18,5	23,2	23,3
10	18	22,8	22
12	18,2	22,1	21,5
14	18,2	22,1	21,4
16	18,2	21,8	21,4
18	18,1	21,7	21,2
20	18,1	21,7	21,2
22	18,1	21,7	21,3
24	18	21,6	21,4
26	18	21,6	21,2
28	18	21,5	21,1
30	17.9	21,5	20

Tabla 7: Temperatura en el vaporizador.

(Fuente: Autor)

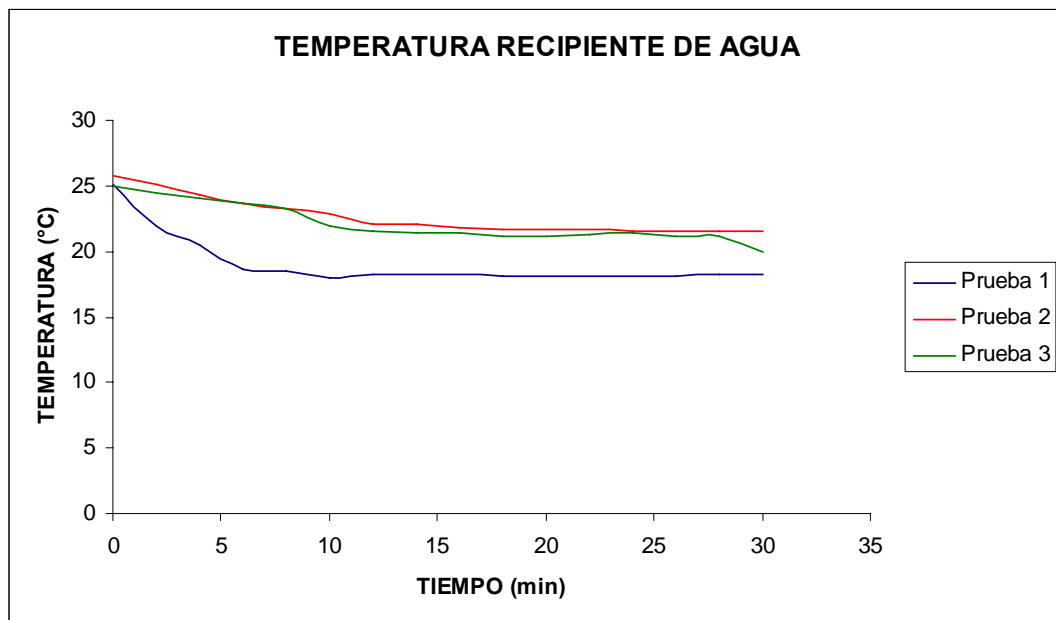


Figura 62: Temperatura en el recipiente de agua o vaporizador.

(Fuente: Autor)

Cambio en la medida de presión (presión medida en el vacuometro)

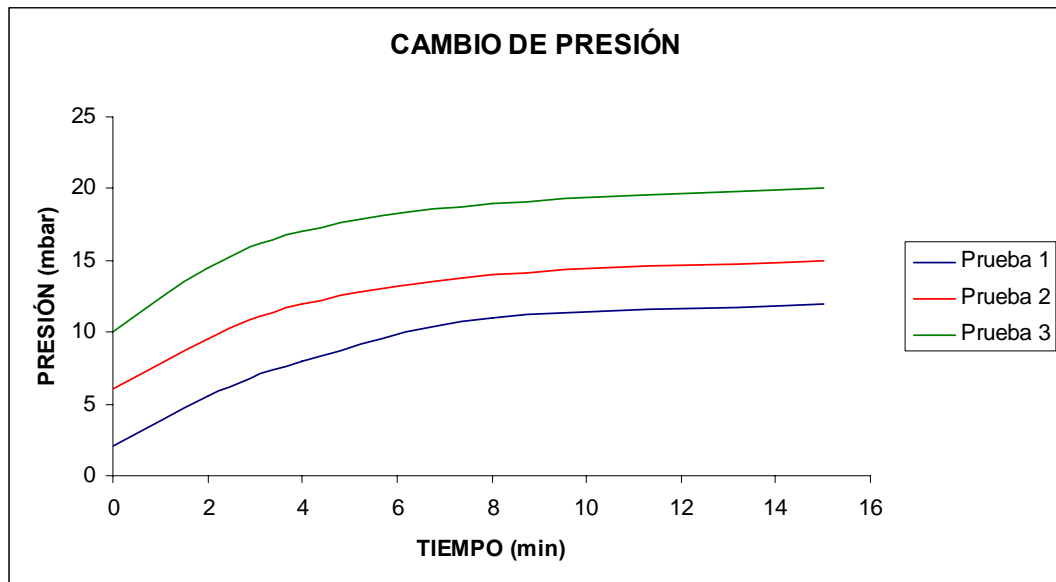


Figura 63: Cambio de presión en el sistema.

(Fuente: Autor)

Los resultados obtenidos fueron dados a partir de diferentes presiones de vacío.

Al hacer un análisis de lo que se obtuvo experimentalmente y lo planteado teóricamente, se puede apreciar que la longitud de perdidas del modelo construido supera los 200cm y el volumen interno comprendido entre la sílica y el agua de vaporización es inferior a 2 litros.

4.1.1.1 Análisis de la regeneración.

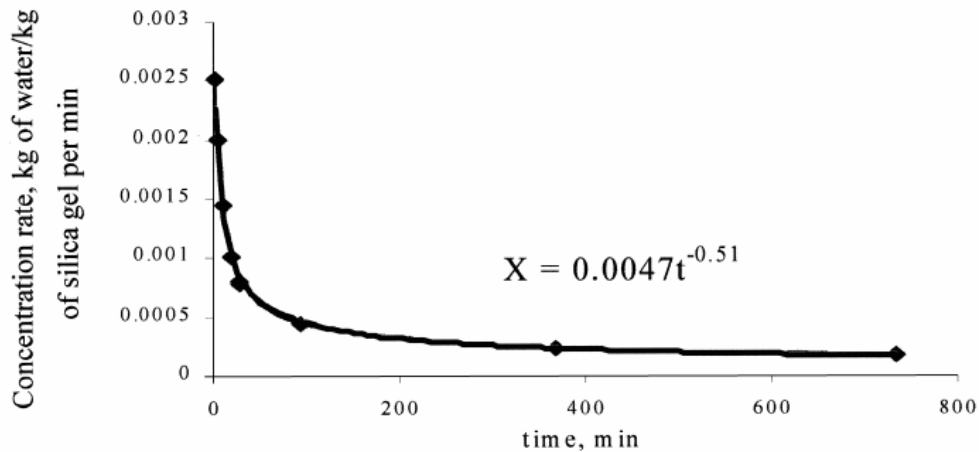


Figura 64: regeneración de la sílica gel.

Fuente: Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working pair M.A. Tahat *,Department of Mechanical Engineering, PO Box 3030, Jordan University of Science and Technology (JUST), Irbid, Jordan).

En la figura 52 se observa una tasa de regeneración que no coincide con lo obtenido experimentalmente en el modelo, esto se puede deber a que la temperatura era tomada en el medio de regeneración y no en la sílica, así, pues es normal que inicialmente la tasa de desorción sea baja, si analizamos la grafica en el momento que comienza a descender la similitud es apreciable. Los saltos apreciados en las graficas experimentales son el resultado de las variaciones en la radiación solar.

CONCLUSIONES

- En la experimentación de refrigeración adsorptiva usando el par sílica gel agua y la radiación solar como fuente de energía, se construyo un modelo físico y uno matemático, cumpliendo los objetivos planteados para este proyecto.
- Al utilizar experimentalmente la sílica gel y la bomba de vacío, se observaron los siguientes hechos.

Sílica gel:

- Se obtuvo una adsorción en masa de agua de 32% la cual permite que sea una alternativa en el desarrollo de sistemas de refrigeración con estas características.
- Según los resultados obtenidos en el horno a gas del laboratorio de transferencia de calor aplicada, se requiere para la regeneración una temperatura de 180° C. El colector solar diseñado y construido en el proceso de experimentación, presento valores promedio a la temperatura requerida para la reutilización de la sílica gel en la experimentación del modelo.

Bomba de vacío:

- La presión lograda por la bomba de vacío (2mbar) no es suficiente para producir una capacidad refrigerativa aplicable en medios industriales o caseros.
- En el modelo matemático desarrollado, se visualizaron los siguientes parámetros que permiten predecir el resultado de la caída de temperatura:
 - El área de adsorción de la sílica gel debe ser lo suficientemente grande.
 - La presión de vacío inicial debe estar por debajo de 2 mbar.
 - El volumen del recipiente debe ser lo mas grande posible.
 - El sistema de evaporación expuesto al ambiente debe estar altamente aislado.

- Los parámetros del modelo matemático que se definieron para comparar los resultados analíticos y experimentales en la caída de temperatura en el vaporizador fueron:

Modelo	Volumen (lt)	L perdidas (cm)	Area silica gel (pulg2)	Presion inicial	ΔT
Experimental	2,45	100	10	2 mbar	9.3
Analítico 1	2,45	110	10	2 mbar	9.8
Analítico 2	2,45	120	10	2 mbar	9.6
Analítico 3	2,45	130	10	2 mbar	9.5
Analítico 4	2,45	140	10	2 mbar	9.4
Analítico 5	2,45	150	10	2 mbar	9.3
Analítico 6	2,45	160	10	2 mbar	9.2

Como se puede notar la caída de temperatura para el modelo experimental es menor que los resultados obtenidos, en condiciones similares, del modelo analítico 1, sin embargo, se puede concluir que al aumentar de forma progresiva las perdidas de calor (L), como se muestra en la tabla, en los modelos analíticos 2, 3, 4, la caída de la temperatura (T), se aproxima a la del modelo experimental. Por consiguiente, según el modelo matemático para la caída de la temperatura llegue a 9° C, en el modelo experimental, la pérdida de calor es de 150 cm.

- El futuro de esta tecnología depende de los avances que se logren en bombas de vacío y materiales que cumplan con los requerimientos (nivel de porosidad bajo y no conductor del calor), sin embargo se pueden realizar investigaciones en varias áreas del proyecto tales como análisis de la transferencia de masa de agua a la sílica gel para conseguir el valor de B, calculo del área óptima de absorción de la sílica gel para sistemas de refrigeración adsortiva y en vaporización de agua debido a presiones de vacío.

RECOMENDACIONES

- El par sílica gel agua presenta resultados favorables por una investigación minuciosa y aplicable utilizando, materiales, bombas de vacío y demás elementos, con tecnología de última generación. Por el momento se hace más conveniente usar el par de trabajo amoníaco-agua pues presenta grandes ventajas actualmente, sin embargo la necesidad de un sistema con gran versatilidad, aplicabilidad y que sea amable con el medio ambiente, exige la investigación continua en estos nuevos pares, donde los adsorbente y absorbentes sólidos ofrecen amplias posibilidades para cumplirlos requerimientos.
- Para generar un enfriamiento utilizable con este par se hace necesario disminuir aún más la presión inicial, aislar completamente el sistema y procurar una adsorción óptima en la sílica gel, además para una posterior investigación se recomienda usar una bomba de difusión para lograr la presión de vacío necesaria, materiales como acareo inoxidable que tienen una baja porosidad y vacuómetros muy sensibles del orden de 10^{-6} mmHg, para concentrarse en la consecución del valor de B que describe el nivel de afinidad del par, y en la descripción matemática de la vaporización del agua a estas presiones.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ **MOISÉS, Alberto y TORRES, German.** Diseño de una cámara de refrigeración por absorción aprovechando la radiación solar como fuente de energía. Universidad Industrial de Santander. 1997.
- ✓ **Organización de las naciones unidas.** Tecnología para aprovechar la energía solar. 1979.

- ✓ **DUFFIE, John.** Solar engineering of thermal processes. John wiley and sons. 1991.

- ✓ **NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES.** Energy for rural development. 1976.

- ✓ **WILLIAMS, J. Richard.** Solar energy, technology and applications. Ann Arbov science publishers 1977.

- ✓ **MCVEIGH, J. C.** Sun power. William clawes and sons limited.

- ✓ **SERWAY, Raimond.** Fisica. Mc Graw Hill. 1994

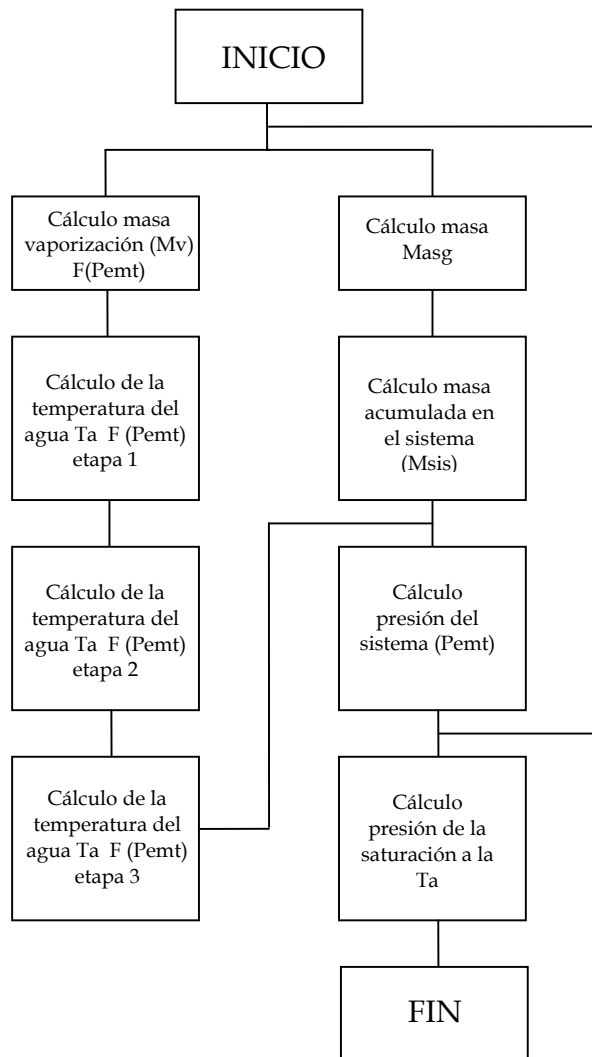
- ✓ **MARADEY CHARRIS, Juan Francisco.** Termodinámica aplicada. UIS. 2002
- ✓ **SIMPOSIO SOBRE FUENTES ENERGÉTICAS RENOVABLES.** Panamá. 1978.

- ✓ **Ramos Horn, Miguel, Manfred Espinoza, Rafael.** Actividades de Investigación y Desarrollo en el Área de Enfriamiento Solar. Universidad Nacional de Ingeniería en Lima. Disponible en internet en: [.http://www.riraas.net/documentacion/CD_10/art-refrigeracion-Colombia-rp2.doc.pdf](http://www.riraas.net/documentacion/CD_10/art-refrigeracion-Colombia-rp2.doc.pdf).

- ✓ **HOLMAN, J. P.** Transferencia de calor. Mc Graw Hill. 1998.
- ✓ **PARACUELLOS, Jesús Guayar, CALVO, Isabel Lorente.** Estudio y modelización de sistemas de climatización con adsorción., Universidad de Zaragoza, 2004. Disponible en Internet en: www.uned.es/ribim/volumenes/Vol9N2Julio_2005/V9N2A04%20Guallar.pdf –
- ✓ **M.A. Tahat,** Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working pair, Department of Mechanical Engineering, PO Box 3030, Jordan University of Science and Technology (JUST), Irbid, Jordan. Disponible en internet en: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=970822>
- ✓ **Sánchez CELIS, Alfonso, SANTOS AMAYA, Leowaldo,** Evaluación del potencial para la producción de vapor mediante el aprovechamiento de la energía solar a través de sistemas colectores de concentración cilíndrico parabólicos y desarrollando un prototipo a pequeña escala. Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, 2008.
- ✓ **IBÁÑEZ PLANA, Manuel,** Tecnología Solar, Mundi prensa libros, 2005.
- ✓ **VALDEZ SALS, Benjamín,** Tecnología en la UABC, Consorcio de universidades Mexicanas, 2006.
- ✓ **FUENTES DÍAZ, David Alfredo,** estudio y modelación de flujo a través de tubos capilares adiabáticos en equipos de refrigeración, universidad politécnica de valencia, julio 2006.

ANEXOS

Diagrama de flujo



PROGRAMA EES

"la masa de agua vaporizada esta en gramos y debe ser convertida a kilogramos cuando se use en la ecuacion de coeficiente global de la transferencia"
Mv1=-0,1101*(ln(Pt1-Pemt1))^2+0,685*ln(Pt1-Pemt1)-0,3404
t1=2

"variables a modificar"

Paire=2
Vsis=2
Aexp = 4
Lperdi=100
deltat =120

"eldeltadetiempo viene en segundos"

Ao= (pi*(0,25*2,54)^2)
Lc1=Mv1/Ao
Acil= 2*pi*0,25*2,54*Lc1
Lcil= 0,002
densidad_agua=1000
densidad_metal=7850
hv=2500
Cpa=4,179
Cpm=0,434
La=0,05575
Va1=Ao*La/1000000
Vm1=Acil*(Lcil+Lperdi)/1000000
(Mv1*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta1_1-Ta1_0))/deltat)-
((densidad_metal*Vm1*Cpm*(Tm1_1-Tm1_0))/deltat)
Tm1_1=Ta1_1
Ta1_0=300
Tm1_0=300
Mv2=-0,1101*(ln(Pt2-Pemt2))^2+0,685*ln(Pt2-Pemt2)-0,3404
t2=4
Lc2=(Mv2/Ao)
Acil2= 2*pi*0,25*2,54*Lc2
Vm2=(Acil2*Lcil)/1000000
(Mv2*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta2_1-Ta1_0))/deltat)-
((densidad_metal*Vm2*Cpm*(Tm2_1-Tm1_0))/deltat)--((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta1_2-
Ta1_1))/deltat)- ((densidad_metal*Vm1*Cpm*(Tm1_2-Tm1_1))/deltat)
Ta2_1=Tm2_1
Tm2_1=Ta1_2
Ta1_2=Tm1_2
"agregamos ahora elefecto del agua de medicion"
(Mv3*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta3_1-Ta1_0))/deltat)-
((densidad_metal*Vm3*Cpm*(Tm3_1-Tm1_0))/deltat)--((densidad_agua*Va2*Cpa*(Ta2_3-
Ta1_2))/deltat)- ((densidad_metal*Vm2*Cpm*(Tm2_3-Tm2_1))/deltat)-
((densidad_agua*Vam1*Cpa*(Tam1_1-Ta1_0))/deltat)
Mv3= -0,1101*(ln(Pt3-Pemt3))^2+0,685*ln(Pt3-Pemt3)-0,3404
t3=6
Lc3=(Mv3/Ao)

$Acil3 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc3$
 $Vam1 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc1 / 4000000$
 $Vm3 = (Acil3 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx2 = Vm1 + Vm2$
 $Va2 = 2 * Ao * La / 1000000$
 $Ta3_1 = Tm3_1$
 $Tm3_1 = Ta2_3$
 $Ta2_3 = Tmx_3$
 $Tmx_3 = Tam1_1$
 "para la segunda etapa en el aguade medición tenemos que:"
 $(Mv4 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta4_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm4 * Cpm * (Tm4_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va3 * Cpa * (Ta3_4 -$
 $Ta2_3)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * Vmx3 * Cpm * (Tmx_4 - Tmx_3)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam1 * Cpa * (Tam1_2 - Ta1_1)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam2 * Cpa * (Tam2_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv4 = -0,1101 * (\ln(Pt4 - Pemt4))^2 + 0,685 * \ln(Pt4 - Pemt4) - 0,3404$
 $t4 = 8$
 $Lc4 = (Mv4 / Ao)$
 $Acil4 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc4$
 $Vam2 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc2 / 4000000$
 $Vm4 = (Acil4 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx3 = Vm3 + Vmx2$
 $Va3 = 3 * Ao * La / 1000000$
 $Ta4_1 = Tm4_1$
 $Tm4_1 = Ta3_4$
 $Ta3_4 = Tmx_4$
 $Tmx_4 = Tam1_2$
 $Tam1_2 = Tam2_1$
 $(Mv5 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta5_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm5 * Cpm * (Tm5_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va4 * Cpa * (Ta4_5 -$
 $Ta3_4)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * Vmx4 * Cpm * (Tmx_5 - Tmx_4)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam2 * Cpa * (Tam2_3 - Ta1_2)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam3 * Cpa * (Tam3_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv5 = -0,1101 * (\ln(Pt5 - Pemt5))^2 + 0,685 * \ln(Pt5 - Pemt5) - 0,3404$
 $t5 = 10$
 $Lc5 = (Mv5 / Ao)$
 $Acil5 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc5$
 $Vamx2 = Vam1 + Vam2$
 $Vam3 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc3 / 4000000$
 $Vm5 = (Acil5 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx4 = Vm4 + Vmx3$
 $Va4 = 4 * Ao * La / 1000000$
 $Ta5_1 = Tm5_1$
 $Tm5_1 = Ta4_5$
 $Ta4_5 = Tmx_5$
 $Tmx_5 = Tamx2_3$
 $Tamx2_3 = Tam3_1$
 "apartir de este punto la ecuacion general se repite sin modificaciones en su estructura lo que cambia son las temperaturas y los volúmenes"
 $(Mv6 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta6_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm6 * Cpm * (Tm6_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va5 * Cpa * (Ta5_6 -$
 $Ta4_5)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * Vmx5 * Cpm * (Tmx_6 - Tmx_5)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vamx3 * Cpa * (Tamx3_4 - Tamx2_3)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam4 * Cpa * (Tam4_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$

$Mv6 = -0,1101 * (\ln(Pt6 - Pemt6))^2 + 0,685 * \ln(Pt6 - Pemt6) - 0,3404$
 $t6 = 12$
 $Lc6 = (Mv6 / Ao)$
 $Acil6 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc6$
 $Vamx3 = Vamx2 + Vam3$
 $Vam4 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc4 / 4000000$
 $Vm6 = (Acil6 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx5 = Vm5 + Vmx4$
 $Va5 = 5 * Ao * La / 1000000$
 $Ta6_1 = Tm6_1$
 $Tm6_1 = Ta5_6$
 $Ta5_6 = Tmx_6$
 $Tmx_6 = Tamx3_4$
 $Tamx3_4 = Tam4_1$
 $(Mv7 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta7_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm7 * Cpm * (Tm7_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va6 * Cpa * (Ta6_7 -$
 $Ta5_6)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * Vmx6 * Cpm * (Tmx_7 - Tmx_6)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vamx4 * Cpa * (Tamx4_5 - Tamx3_4)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam5 * Cpa * (Tam5_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv7 = -0,1101 * (\ln(Pt7 - Pemt7))^2 + 0,685 * \ln(Pt7 - Pemt7) - 0,3404$
 $t7 = 14$
 $Lc7 = (Mv7 / Ao)$
 $Acil7 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc7$
 $Vamx4 = Vamx3 + Vam4$
 $Vam5 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc5 / 4000000$
 $Vm7 = (Acil7 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx6 = Vm6 + Vmx5$
 $Va6 = 6 * Ao * La / 1000000$
 $Ta7_1 = Tm7_1$
 $Tm7_1 = Ta6_7$
 $Ta6_7 = Tmx_7$
 $Tmx_7 = Tamx4_5$
 $Tamx4_5 = Tam5_1$
 $(Mv8 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta8_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm8 * Cpm * (Tm8_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va7 * Cpa * (Ta7_8 -$
 $Ta6_7)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * Vmx7 * Cpm * (Tmx_8 - Tmx_7)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vamx5 * Cpa * (Tamx5_6 - Tamx4_5)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam6 * Cpa * (Tam6_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv8 = -0,1101 * (\ln(Pt8 - Pemt8))^2 + 0,685 * \ln(Pt8 - Pemt8) - 0,3404$
 $t8 = 16$
 $Lc8 = (Mv8 / Ao)$
 $Acil8 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc8$
 $Vamx5 = Vamx4 + Vam5$
 $Vam6 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc6 / 4000000$
 $Vm8 = (Acil8 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx7 = Vm7 + Vmx6$
 $Va7 = 7 * Ao * La / 1000000$
 $Ta8_1 = Tm8_1$
 $Tm8_1 = Ta7_8$
 $Ta7_8 = Tmx_8$
 $Tmx_8 = Tamx5_6$
 $Tamx5_6 = Tam6_1$
 $(Mv9 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta9_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm9 * Cpm * (Tm9_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * Va8 * Cpa * (Ta8_9 -$

$$\begin{aligned}
& \text{Ta7_8})/\text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * \text{Vm}x8 * \text{Cpm} * (\text{Tmx}_9 - \text{Tmx}_8))/\text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}x6 * \text{Cpa} * (\text{Tam}x6_7 - \text{Tam}x5_6))/\text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}7 * \text{Cpa} * (\text{Tam}7_1 - \text{Ta}1_0))/\text{deltat}) \\
& \text{Mv}9 = -0,1101 * (\ln(\text{Pt}9 - \text{Pemt}9))^2 + 0,685 * \ln(\text{Pt}9 - \text{Pemt}9) - 0,3404 \\
& t9 = 18 \\
& \text{Lc}9 = (\text{Mv}9 / \text{Ao}) \\
& \text{Acil}9 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * \text{Lc}9 \\
& \text{Vam}x6 = \text{Vam}x5 + \text{Vam}6 \\
& \text{Vam}7 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * \text{Lc}7 / 4000000 \\
& \text{Vm}9 = (\text{Acil}9 * \text{Lcil}) / 1000000 \\
& \text{Vm}x8 = \text{Vm}8 + \text{Vm}x7 \\
& \text{Va}8 = 8 * \text{Ao} * \text{La} / 1000000 \\
& \text{Ta}9_1 = \text{Tm}9_1 \\
& \text{Tm}9_1 = \text{Ta}8_9 \\
& \text{Ta}8_9 = \text{Tmx}_9 \\
& \text{Tmx}_9 = \text{Tam}x6_7 \\
& \text{Tam}x6_7 = \text{Tam}7_1 \\
& (\text{Mv}10 * \text{hv}) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * \text{Va}1 * \text{Cpa} * (\text{Ta}10_1 - \text{Ta}1_0)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_metal} * \text{Vm}10 * \text{Cpm} * (\text{Tm}10_1 - \text{Tm}1_0)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Va}9 * \text{Cpa} * (\text{Ta}9_10 - \text{Ta}8_9)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} * \text{Vm}x9 * \text{Cpm} * (\text{Tmx}_10 - \\
& \text{Tmx}_9)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}x7 * \text{Cpa} * (\text{Tam}x7_8 - \text{Tam}x6_7)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}8 * \text{Cpa} * (\text{Tam}8_1 - \text{Ta}1_0)) / \text{deltat}) \\
& \text{Mv}10 = -0,1101 * (\ln(\text{Pt}10 - \text{Pemt}10))^2 + 0,685 * \ln(\text{Pt}10 - \text{Pemt}10) - 0,3404 \\
& t10 = 20 \\
& \text{Lc}10 = (\text{Mv}10 / \text{Ao}) \\
& \text{Acil}10 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * \text{Lc}10 \\
& \text{Vam}x7 = \text{Vam}x6 + \text{Vam}7 \\
& \text{Vam}8 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * \text{Lc}8 / 4000000 \\
& \text{Vm}10 = (\text{Acil}10 * \text{Lcil}) / 1000000 \\
& \text{Vm}x9 = \text{Vm}9 + \text{Vm}x8 \\
& \text{Va}9 = 9 * \text{Ao} * \text{La} / 1000000 \\
& \text{Ta}10_1 = \text{Tm}10_1 \\
& \text{Tm}10_1 = \text{Ta}9_10 \\
& \text{Ta}9_10 = \text{Tmx}_10 \\
& \text{Tmx}_10 = \text{Tam}x7_8 \\
& \text{Tam}x7_8 = \text{Tam}8_1 \\
& (\text{Mv}11 * \text{hv}) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * \text{Va}1 * \text{Cpa} * (\text{Ta}11_1 - \text{Ta}1_0)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_metal} * \text{Vm}11 * \text{Cpm} * (\text{Tm}11_1 - \text{Tm}1_0)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Va}10 * \text{Cpa} * (\text{Ta}10_11 - \text{Ta}9_10)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_metal} * \text{Vm}x10 * \text{Cpm} * (\text{Tmx}_11 - \text{Tmx}_10)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}x8 * \text{Cpa} * (\text{Tam}x8_9 - \text{Tam}x7_8)) / \text{deltat}) - \\
& ((\text{densidad_agua} * \text{Vam}9 * \text{Cpa} * (\text{Tam}9_1 - \text{Ta}1_0)) / \text{deltat}) \\
& \text{Mv}11 = -0,1101 * (\ln(\text{Pt}11 - \text{Pemt}11))^2 + 0,685 * \ln(\text{Pt}11 - \text{Pemt}11) - 0,3404 \\
& t11 = 22 \\
& \text{Lc}11 = (\text{Mv}11 / \text{Ao}) \\
& \text{Acil}11 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * \text{Lc}11 \\
& \text{Vam}x8 = \text{Vam}x7 + \text{Vam}8 \\
& \text{Vam}9 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * \text{Lc}9 / 4000000 \\
& \text{Vm}11 = (\text{Acil}11 * \text{Lcil}) / 1000000 \\
& \text{Vm}x10 = \text{Vm}10 + \text{Vm}x9 \\
& \text{Va}10 = 10 * \text{Ao} * \text{La} / 1000000 \\
& \text{Ta}11_1 = \text{Tm}11_1 \\
& \text{Tm}11_1 = \text{Ta}10_11 \\
& \text{Ta}10_11 = \text{Tmx}_11
\end{aligned}$$

$T_{mx_11} = T_{amx8_9}$
 $T_{amx8_9} = T_{am9_1}$
 $(Mv12 \cdot hv) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta12_1 - Ta1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm12 \cdot Cpm \cdot (Tm12_1 - Tm1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va11 \cdot Cpa \cdot (Ta11_12 - Ta10_11)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx11 \cdot Cpm \cdot (Tmx_12 - Tmx_11)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx9 \cdot Cpa \cdot (Tamx9_10 - Tamx8_9)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam10 \cdot Cpa \cdot (Tam10_1 - Ta1_0)) / \Delta t)$
 $Mv12 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt12 - Pemt12))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt12 - Pemt12) - 0,3404$
 $t12 = 24$
 $Lc12 = (Mv12 / Ao)$
 $Acil12 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc12$
 $Vamx9 = Vamx8 + Vam9$
 $Vam10 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc10 / 4000000$
 $Vm12 = (Acil12 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx11 = Vm11 + Vmx10$
 $Va11 = 11 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta12_1 = Tm12_1$
 $Tm12_1 = Ta11_12$
 $Ta11_12 = Tmx_12$
 $Tmx_12 = Tamx9_10$
 $Tamx9_10 = Tam10_1$
 $(Mv13 \cdot hv) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta13_1 - Ta1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm13 \cdot Cpm \cdot (Tm13_1 - Tm1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va12 \cdot Cpa \cdot (Ta12_13 - Ta11_12)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx12 \cdot Cpm \cdot (Tmx_13 - Tmx_12)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx10 \cdot Cpa \cdot (Tamx10_11 - Tamx9_10)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam11 \cdot Cpa \cdot (Tam11_1 - Ta1_0)) / \Delta t)$
 $Mv13 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt13 - Pemt13))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt13 - Pemt13) - 0,3404$
 $t13 = 26$
 $Lc13 = (Mv13 / Ao)$
 $Acil13 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc13$
 $Vamx10 = Vamx9 + Vam10$
 $Vam11 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc11 / 4000000$
 $Vm13 = (Acil13 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx12 = Vm12 + Vmx11$
 $Va12 = 12 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta13_1 = Tm13_1$
 $Tm13_1 = Ta12_13$
 $Ta12_13 = Tmx_13$
 $Tmx_13 = Tamx10_11$
 $Tamx10_11 = Tam11_1$
 $(Mv14 \cdot hv) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta14_1 - Ta1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm14 \cdot Cpm \cdot (Tm14_1 - Tm1_0)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va13 \cdot Cpa \cdot (Ta13_14 - Ta12_13)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx13 \cdot Cpm \cdot (Tmx_14 - Tmx_13)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx11 \cdot Cpa \cdot (Tamx11_12 - Tamx10_11)) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam12 \cdot Cpa \cdot (Tam12_1 - Ta1_0)) / \Delta t)$
 $Mv14 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt14 - Pemt14))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt14 - Pemt14) - 0,3404$
 $t14 = 28$
 $Lc14 = (Mv14 / Ao)$
 $Acil14 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc14$
 $Vamx11 = Vamx10 + Vam11$
 $Vam12 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc12 / 4000000$

$Vm14=(Acil14*Lcil)/1000000$
 $Vmx13=Vm13+Vmx12$
 $Va13=13*Ao*La/1000000$
 $Ta14_1=Tm14_1$
 $Tm14_1=Ta13_14$
 $Ta13_14=Tmx_14$
 $Tmx_14=Tamx11_12$
 $Tamx11_12=Tam12_1$
 $(Mv15*hv)/(deltat*1000)=-((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta15_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm15*Cpm*(Tm15_1-Tm1_0))/deltat)--$
 $((densidad_agua*Va14*Cpa*(Ta14_15-Ta13_14))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vmx14*Cpm*(Tmx_15-Tmx_14))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vamx12*Cpa*(Tamx12_13-Tamx11_12))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vam13*Cpa*(Tam13_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv15=-0,1101*(ln(Pt15-Pemt15))^2+0,685*ln(Pt15-Pemt15)-0,3404$
 $t15=30$
 $Lc15=(Mv15/Ao)$
 $Acil15= 2*pi*0,25^2*2,54*Lc15$
 $Vamx12=Vamx11+Vam12$
 $Vam13=pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc13/4000000$
 $Vm15=(Acil15*Lcil)/1000000$
 $Vmx14=Vm14+Vmx13$
 $Va14=14*Ao*La/1000000$
 $Ta15_1=Tm15_1$
 $Tm15_1=Ta14_15$
 $Ta14_15=Tmx_15$
 $Tmx_15=Tamx12_13$
 $Tamx12_13=Tam13_1$
 $(Mv16*hv)/(deltat*1000)=-((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta16_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm16*Cpm*(Tm16_1-Tm1_0))/deltat)--$
 $((densidad_agua*Va15*Cpa*(Ta15_16-Ta14_15))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vmx15*Cpm*(Tmx_16-Tmx_15))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vamx13*Cpa*(Tamx13_14-Tamx12_13))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vam14*Cpa*(Tam14_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv16=-0,1101*(ln(Pt16-Pemt16))^2+0,685*ln(Pt16-Pemt16)-0,3404$
 $t16=32$
 $Lc16=(Mv16/Ao)$
 $Acil16= 2*pi*0,25^2*2,54*Lc16$
 $Vamx13=Vamx12+Vam13$
 $Vam14=pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc14/4000000$
 $Vm16=(Acil16*Lcil)/1000000$
 $Vmx15=Vm15+Vmx14$
 $Va15=15*Ao*La/1000000$
 $Ta16_1=Tm16_1$
 $Tm16_1=Ta15_16$
 $Ta15_16=Tmx_16$
 $Tmx_16=Tamx13_14$
 $Tamx13_14=Tam14_1$
 $(Mv17*hv)/(deltat*1000)=-((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta17_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm17*Cpm*(Tm17_1-Tm1_0))/deltat)--$
 $((densidad_agua*Va16*Cpa*(Ta16_17-Ta15_16))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vmx16*Cpm*(Tmx_17-Tmx_16))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vamx14*Cpa*(Tamx14_15-Tamx13_14))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vam15*Cpa*(Tam15_1-Ta1_0))/deltat)$

$Mv17 = -0,1101 * (\ln(Pt17 - Pemt17))^2 + 0,685 * \ln(Pt17 - Pemt17) - 0,3404$
 $t17 = 34$
 $Lc17 = (Mv17 / Ao)$
 $Acil17 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc17$
 $Vamx14 = Vamx13 + Vam14$
 $Vam15 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc15 / 4000000$
 $Vm17 = (Acil17 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx16 = Vm16 + Vmx15$
 $Va16 = 16 * Ao * La / 1000000$
 $Ta17_1 = Tm17_1$
 $Tm17_1 = Ta16_17$
 $Ta16_17 = Tmx_17$
 $Tmx_17 = Tamx14_15$
 $Tamx14_15 = Tam15_1$
 $(Mv18 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta18_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm18 * Cpm * (Tm18_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Va17 * Cpa * (Ta17_18 - Ta16_17)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vmx17 * Cpm * (Tmx_18 - Tmx_17)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vamx15 * Cpa * (Tamx15_16 - Tamx14_15)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam16 * Cpa * (Tam16_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv18 = -0,1101 * (\ln(Pt18 - Pemt18))^2 + 0,685 * \ln(Pt18 - Pemt18) - 0,3404$
 $t18 = 36$
 $Lc18 = (Mv18 / Ao)$
 $Acil18 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc18$
 $Vamx15 = Vamx14 + Vam15$
 $Vam16 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc16 / 4000000$
 $Vm18 = (Acil18 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx17 = Vm17 + Vmx16$
 $Va17 = 17 * Ao * La / 1000000$
 $Ta18_1 = Tm18_1$
 $Tm18_1 = Ta17_18$
 $Ta17_18 = Tmx_18$
 $Tmx_18 = Tamx15_16$
 $Tamx15_16 = Tam16_1$
 $(Mv19 * hv) / (\text{deltat} * 1000) = -((\text{densidad_agua} * Va1 * Cpa * (Ta19_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vm19 * Cpm * (Tm19_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Va18 * Cpa * (Ta18_19 - Ta17_18)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} * Vmx18 * Cpm * (Tmx_19 - Tmx_18)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vamx16 * Cpa * (Tamx16_17 - Tamx15_16)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} * Vam17 * Cpa * (Tam17_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv19 = -0,1101 * (\ln(Pt19 - Pemt19))^2 + 0,685 * \ln(Pt19 - Pemt19) - 0,3404$
 $t19 = 38$
 $Lc19 = (Mv19 / Ao)$
 $Acil19 = 2 * \pi * 0,25 * 2,54 * Lc19$
 $Vamx16 = Vamx15 + Vam16$
 $Vam17 = \pi * ((1,5 - 0,75) * 2,54)^2 * Lc17 / 4000000$
 $Vm19 = (Acil19 * Lcil) / 1000000$
 $Vmx18 = Vm18 + Vmx17$
 $Va18 = 18 * Ao * La / 1000000$
 $Ta19_1 = Tm19_1$
 $Tm19_1 = Ta18_19$
 $Ta18_19 = Tmx_19$
 $Tmx_19 = Tamx16_17$
 $Tamx16_17 = Tam17_1$

$(Mv20*hv)/(deltat*1000) = -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta20_1-Ta1_0))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vm20*Cpm*(Tm20_1-Tm1_0))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Va19*Cpa*(Ta19_20-Ta18_19))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vmx19*Cpm*(Tmx_20-Tmx_19))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vamx17*Cpa*(Tamx17_18-Tamx16_17))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vam18*Cpa*(Tam18_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv20 = -0,1101*(\ln(Pt20-Pemt20))^2 + 0,685*\ln(Pt20-Pemt20) - 0,3404$
 $t20 = 40$
 $Lc20 = (Mv20/Ao)$
 $Acil20 = 2*pi*0,25^2*54*Lc20$
 $Vamx17 = Vamx16 + Vam17$
 $Vam18 = pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc18/4000000$
 $Vm20 = (Acil20*Lcil)/1000000$
 $Vmx19 = Vm19 + Vmx18$
 $Va19 = 19* Ao * La / 1000000$
 $Ta20_1 = Tm20_1$
 $Tm20_1 = Ta19_20$
 $Ta19_20 = Tmx_20$
 $Tmx_20 = Tamx17_18$
 $Tamx17_18 = Tam18_1$
 $(Mv21*hv)/(deltat*1000) = -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta21_1-Ta1_0))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vm21*Cpm*(Tm21_1-Tm1_0))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Va20*Cpa*(Ta20_21-Ta19_20))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vmx20*Cpm*(Tmx_21-Tmx_20))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vamx18*Cpa*(Tamx18_19-Tamx17_18))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vam19*Cpa*(Tam19_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv21 = -0,1101*(\ln(Pt21-Pemt21))^2 + 0,685*\ln(Pt21-Pemt21) - 0,3404$
 $t21 = 42$
 $Lc21 = (Mv21/Ao)$
 $Acil21 = 2*pi*0,25^2*54*Lc21$
 $Vamx18 = Vamx17 + Vam18$
 $Vam19 = pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc19/4000000$
 $Vm21 = (Acil21*Lcil)/1000000$
 $Vmx20 = Vm20 + Vmx19$
 $Va20 = 20* Ao * La / 1000000$
 $Ta21_1 = Tm21_1$
 $Tm21_1 = Ta20_21$
 $Ta20_21 = Tmx_21$
 $Tmx_21 = Tamx18_19$
 $Tamx18_19 = Tam19_1$
 $(Mv22*hv)/(deltat*1000) = -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta22_1-Ta1_0))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vm22*Cpm*(Tm22_1-Tm1_0))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Va21*Cpa*(Ta21_22-Ta20_21))/deltat) -$
 $((densidad_metal*Vmx21*Cpm*(Tmx_22-Tmx_21))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vamx19*Cpa*(Tamx19_20-Tamx18_19))/deltat) -$
 $((densidad_agua*Vam20*Cpa*(Tam20_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv22 = -0,1101*(\ln(Pt22-Pemt22))^2 + 0,685*\ln(Pt22-Pemt22) - 0,3404$
 $t22 = 44$
 $Lc22 = (Mv22/Ao)$
 $Acil22 = 2*pi*0,25^2*54*Lc22$
 $Vamx19 = Vamx18 + Vam19$
 $Vam20 = pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc20/4000000$
 $Vm22 = (Acil22*Lcil)/1000000$
 $Vmx21 = Vm21 + Vmx20$

$Va21=21 \cdot A_o \cdot La / 1000000$
 $Ta22_1 = Tm22_1$
 $Tm22_1 = Ta21_22$
 $Ta21_22 = Tmx_22$
 $Tmx_22 = Tamx19_20$
 $Tamx19_20 = Tam20_1$
 $(Mv23 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta23_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm23 \cdot Cpm \cdot (Tm23_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va22 \cdot Cpa \cdot (Ta22_23 - Ta21_22)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx22 \cdot Cpm \cdot (Tmx_23 - Tmx_22)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx20 \cdot Cpa \cdot (Tamx20_21 - Tamx19_20)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam21 \cdot Cpa \cdot (Tam21_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv23 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt23 - Pemt23))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt23 - Pemt23) - 0,3404$
 $t23 = 46$
 $Lc23 = (Mv23 / A_o)$
 $Acil23 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25^2 \cdot 54 \cdot Lc23$
 $Vamx20 = Vamx19 + Vam20$
 $Vam21 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc21 / 4000000$
 $Vm23 = (Acil23 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx22 = Vm22 + Vmx21$
 $Va22 = 22 \cdot A_o \cdot La / 1000000$
 $Ta23_1 = Tm23_1$
 $Tm23_1 = Ta22_23$
 $Ta22_23 = Tmx_23$
 $Tmx_23 = Tamx20_21$
 $Tamx20_21 = Tam21_1$
 $(Mv24 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta24_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm24 \cdot Cpm \cdot (Tm24_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va23 \cdot Cpa \cdot (Ta23_24 - Ta22_23)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx23 \cdot Cpm \cdot (Tmx_24 - Tmx_23)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx21 \cdot Cpa \cdot (Tamx21_22 - Tamx20_21)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam22 \cdot Cpa \cdot (Tam22_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv24 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt24 - Pemt24))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt24 - Pemt24) - 0,3404$
 $t24 = 48$
 $Lc24 = (Mv24 / A_o)$
 $Acil24 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25^2 \cdot 54 \cdot Lc24$
 $Vamx21 = Vamx20 + Vam21$
 $Vam22 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc22 / 4000000$
 $Vm24 = (Acil24 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx23 = Vm23 + Vmx22$
 $Va23 = 23 \cdot A_o \cdot La / 1000000$
 $Ta24_1 = Tm24_1$
 $Tm24_1 = Ta23_24$
 $Ta23_24 = Tmx_24$
 $Tmx_24 = Tamx21_22$
 $Tamx21_22 = Tam22_1$
 $(Mv25 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta25_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm25 \cdot Cpm \cdot (Tm25_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va24 \cdot Cpa \cdot (Ta24_25 - Ta23_24)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vmx24 \cdot Cpm \cdot (Tmx_25 - Tmx_24)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vamx22 \cdot Cpa \cdot (Tamx22_23 - Tamx21_22)) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam23 \cdot Cpa \cdot (Tam23_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv25 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt25 - Pemt25))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt25 - Pemt25) - 0,3404$
 $t25 = 50$

$Lc25=(Mv25/Ao)$
 $Acil25= 2*pi*0,25*2,54*Lc25$
 $Vamx22=Vamx21+Vam22$
 $Vam23=pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc23/4000000$
 $Vm25=(Acil25*Lcil)/1000000$
 $Vmx24=Vm24+Vmx23$
 $Va24=24*Ao*La/1000000$
 $Ta25_1=Tm25_1$
 $Tm25_1=Ta24_25$
 $Ta24_25=Tmx_25$
 $Tmx_25=Tamx22_23$
 $Tamx22_23=Tam23_1$
 $(Mv26*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta26_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm26*Cpm*(Tm26_1-Tm1_0))/deltat)--$
 $((densidad_agua*Va25*Cpa*(Ta25_26-Ta24_25))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vmx25*Cpm*(Tmx_26-Tmx_25))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vamx23*Cpa*(Tamx23_24-Tamx22_23))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vam24*Cpa*(Tam24_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv26= -0,1101*(ln(Pt26-Pemt26))^2+0,685*ln(Pt26-Pemt26)-0,3404$
 $t26=52$
 $Lc26=(Mv26/Ao)$
 $Acil26= 2*pi*0,25*2,54*Lc26$
 $Vamx23=Vamx22+Vam23$
 $Vam24=pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc24/4000000$
 $Vm26=(Acil26*Lcil)/1000000$
 $Vmx25=Vm25+Vmx24$
 $Va25=25*Ao*La/1000000$
 $Ta26_1=Tm26_1$
 $Tm26_1=Ta25_26$
 $Ta25_26=Tmx_26$
 $Tmx_26=Tamx23_24$
 $Tamx23_24=Tam24_1$
 $(Mv27*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta27_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm27*Cpm*(Tm27_1-Tm1_0))/deltat)--$
 $((densidad_agua*Va26*Cpa*(Ta26_27-Ta25_26))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vmx26*Cpm*(Tmx_27-Tmx_26))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vamx24*Cpa*(Tamx24_25-Tamx23_24))/deltat)-$
 $((densidad_agua*Vam25*Cpa*(Tam25_1-Ta1_0))/deltat)$
 $Mv27= -0,1101*(ln(Pt27-Pemt27))^2+0,685*ln(Pt27-Pemt27)-0,3404$
 $t27=54$
 $Lc27=(Mv27/Ao)$
 $Acil27= 2*pi*0,25*2,54*Lc27$
 $Vamx24=Vamx23+Vam24$
 $Vam25=pi*((1,5-0,75)*2,54)^2*Lc25/4000000$
 $Vm27=(Acil27*Lcil)/1000000$
 $Vmx26=Vm26+Vmx25$
 $Va26=26*Ao*La/1000000$
 $Ta27_1=Tm27_1$
 $Tm27_1=Ta26_27$
 $Ta26_27=Tmx_27$
 $Tmx_27=Tamx24_25$
 $Tamx24_25=Tam25_1$
 $(Mv28*hv)/(deltat*1000)= -((densidad_agua*Va1*Cpa*(Ta28_1-Ta1_0))/deltat)-$
 $((densidad_metal*Vm28*Cpm*(Tm28_1-Tm1_0))/deltat)--$

$((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va27} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta27_28} - \text{Ta26_27})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vmx27} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tmx_28} - \text{Tmx_27})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx25} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx25_26} - \text{Tamx24_25})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam26} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam26_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv28} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt28} - \text{Pemt28}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt28} - \text{Pemt28}) - 0,3404$
 $t28 = 56$
 $\text{Lc28} = (\text{Mv28} / \text{Ao})$
 $\text{Acil28} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc28}$
 $\text{Vamx25} = \text{Vamx24} + \text{Vam25}$
 $\text{Vam26} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc26} / 4000000$
 $\text{Vm28} = (\text{Acil28} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx27} = \text{Vm27} + \text{Vmx26}$
 $\text{Va27} = 27 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta28_1} = \text{Tm28_1}$
 $\text{Tm28_1} = \text{Ta27_28}$
 $\text{Ta27_28} = \text{Tmx_28}$
 $\text{Tmx_28} = \text{Tamx25_26}$
 $\text{Tamx25_26} = \text{Tam26_1}$
 $(\text{Mv29} \cdot \text{hv}) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va1} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta29_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vm29} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tm29_1} - \text{Tm1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va28} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta28_29} - \text{Ta27_28})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vmx28} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tmx_29} - \text{Tmx_28})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx26} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx26_27} - \text{Tamx25_26})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam27} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam27_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv29} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt29} - \text{Pemt29}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt29} - \text{Pemt29}) - 0,3404$
 $t29 = 58$
 $\text{Lc29} = (\text{Mv29} / \text{Ao})$
 $\text{Acil29} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc29}$
 $\text{Vamx26} = \text{Vamx25} + \text{Vam26}$
 $\text{Vam27} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc27} / 4000000$
 $\text{Vm29} = (\text{Acil29} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx28} = \text{Vm28} + \text{Vmx27}$
 $\text{Va28} = 28 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta29_1} = \text{Tm29_1}$
 $\text{Tm29_1} = \text{Ta28_29}$
 $\text{Ta28_29} = \text{Tmx_29}$
 $\text{Tmx_29} = \text{Tamx26_27}$
 $\text{Tamx26_27} = \text{Tam27_1}$
 $(\text{Mv30} \cdot \text{hv}) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va1} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta30_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vm30} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tm30_1} - \text{Tm1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va29} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta29_30} - \text{Ta28_29})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vmx29} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tmx_30} - \text{Tmx_29})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx27} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx27_28} - \text{Tamx26_27})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam28} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam28_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv30} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt30} - \text{Pemt30}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt30} - \text{Pemt30}) - 0,3404$
 $t30 = 60$
 $\text{Lc30} = (\text{Mv30} / \text{Ao})$
 $\text{Acil30} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc30}$
 $\text{Vamx27} = \text{Vamx26} + \text{Vam27}$
 $\text{Vam28} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc28} / 4000000$
 $\text{Vm30} = (\text{Acil30} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx29} = \text{Vm29} + \text{Vmx28}$
 $\text{Va29} = 29 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta30_1} = \text{Tm30_1}$

$Tm30_1 = Ta29_30$
 $Ta29_30 = Tmx_30$
 $Tmx_30 = Tamx27_28$
 $Tamx27_28 = Tam28_1$
 $(Mv31 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta31_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vm31 \cdot Cpm \cdot (Tm31_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Va30 \cdot Cpa \cdot (Ta30_31 - Ta29_30)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vmx30 \cdot Cpm \cdot (Tmx_31 - Tmx_30)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vamx28 \cdot Cpa \cdot (Tamx28_29 - Tamx27_28)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vam29 \cdot Cpa \cdot (Tam29_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv31 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt31 - Pemt31))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt31 - Pemt31) - 0,3404$
 $t31 = 62$
 $Lc31 = (Mv31 / Ao)$
 $Acil31 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc31$
 $Vamx28 = Vamx27 + Vam28$
 $Vam29 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc29 / 4000000$
 $Vm31 = (Acil31 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx30 = Vm30 + Vmx29$
 $Va30 = 30 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta31_1 = Tm31_1$
 $Tm31_1 = Ta30_31$
 $Ta30_31 = Tmx_31$
 $Tmx_31 = Tamx28_29$
 $Tamx28_29 = Tam29_1$
 $(Mv32 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta32_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vm32 \cdot Cpm \cdot (Tm32_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Va31 \cdot Cpa \cdot (Ta31_32 - Ta30_31)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vmx31 \cdot Cpm \cdot (Tmx_32 - Tmx_31)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vamx29 \cdot Cpa \cdot (Tamx29_30 - Tamx28_29)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vam30 \cdot Cpa \cdot (Tam30_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv32 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt32 - Pemt32))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt32 - Pemt32) - 0,3404$
 $t32 = 64$
 $Lc32 = (Mv32 / Ao)$
 $Acil32 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc32$
 $Vamx29 = Vamx28 + Vam29$
 $Vam30 = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc30 / 4000000$
 $Vm32 = (Acil32 \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vmx31 = Vm31 + Vmx30$
 $Va31 = 31 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta32_1 = Tm32_1$
 $Tm32_1 = Ta31_32$
 $Ta31_32 = Tmx_32$
 $Tmx_32 = Tamx29_30$
 $Tamx29_30 = Tam30_1$
 $(Mv33 \cdot hv) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va1 \cdot Cpa \cdot (Ta33_1 - Ta1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vm33 \cdot Cpm \cdot (Tm33_1 - Tm1_0)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Va32 \cdot Cpa \cdot (Ta32_33 - Ta31_32)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_metal} \cdot Vmx32 \cdot Cpm \cdot (Tmx_33 - Tmx_32)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vamx30 \cdot Cpa \cdot (Tamx30_31 - Tamx29_30)) / \text{deltat}) - ((\text{densidad_agua} \cdot Vam31 \cdot Cpa \cdot (Tam31_1 - Ta1_0)) / \text{deltat})$
 $Mv33 = -0,1101 \cdot (\ln(Pt33 - Pemt33))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt33 - Pemt33) - 0,3404$
 $t33 = 66$
 $Lc33 = (Mv33 / Ao)$
 $Acil33 = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc33$

$V_{mx30} = V_{mx29} + V_{m30}$
 $V_{m31} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot L_{c31} / 4000000$
 $V_{m33} = (A_{cil33} \cdot L_{cil}) / 1000000$
 $V_{mx32} = V_{m32} + V_{mx31}$
 $V_{a32} = 32 \cdot A_o \cdot L_a / 1000000$
 $T_{a33_1} = T_{m33_1}$
 $T_{m33_1} = T_{a32_33}$
 $T_{a32_33} = T_{mx_33}$
 $T_{mx_33} = T_{amx30_31}$
 $T_{amx30_31} = T_{am31_1}$
 $(M_{v34} \cdot h_v) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot V_{a1} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a34_1} - T_{a1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{m34} \cdot C_{pm} \cdot (T_{m34_1} - T_{m1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{a33} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a33_34} - T_{a32_33})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{mx33} \cdot C_{pm} \cdot (T_{mx_34} - T_{mx_33})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{amx31} \cdot C_{pa} \cdot (T_{amx31_32} - T_{amx30_31})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{am32} \cdot C_{pa} \cdot (T_{am32_1} - T_{a1_0})) / \Delta t)$
 $M_{v34} = -0,1101 \cdot (\ln(P_{t34} - P_{emt34}))^2 + 0,685 \cdot \ln(P_{t34} - P_{emt34}) - 0,3404$
 $t_{34} = 68$
 $L_{c34} = (M_{v34} / A_o)$
 $A_{cil34} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot L_{c34}$
 $V_{mx31} = V_{mx30} + V_{m31}$
 $V_{m32} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot L_{c32} / 4000000$
 $V_{m34} = (A_{cil34} \cdot L_{cil}) / 1000000$
 $V_{mx33} = V_{m33} + V_{mx32}$
 $V_{a33} = 33 \cdot A_o \cdot L_a / 1000000$
 $T_{a34_1} = T_{m34_1}$
 $T_{m34_1} = T_{a33_34}$
 $T_{a33_34} = T_{mx_34}$
 $T_{mx_34} = T_{amx31_32}$
 $T_{amx31_32} = T_{am32_1}$
 $(M_{v35} \cdot h_v) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot V_{a1} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a35_1} - T_{a1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{m35} \cdot C_{pm} \cdot (T_{m35_1} - T_{m1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{a34} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a34_35} - T_{a33_34})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{mx34} \cdot C_{pm} \cdot (T_{mx_35} - T_{mx_34})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{amx32} \cdot C_{pa} \cdot (T_{amx32_33} - T_{amx31_32})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{am33} \cdot C_{pa} \cdot (T_{am33_1} - T_{a1_0})) / \Delta t)$
 $M_{v35} = -0,1101 \cdot (\ln(P_{t35} - P_{emt35}))^2 + 0,685 \cdot \ln(P_{t35} - P_{emt35}) - 0,3404$
 $t_{35} = 70$
 $L_{c35} = (M_{v35} / A_o)$
 $A_{cil35} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot L_{c35}$
 $V_{mx32} = V_{mx31} + V_{m32}$
 $V_{m33} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot L_{c33} / 4000000$
 $V_{m35} = (A_{cil35} \cdot L_{cil}) / 1000000$
 $V_{mx34} = V_{m34} + V_{mx33}$
 $V_{a34} = 34 \cdot A_o \cdot L_a / 1000000$
 $T_{a35_1} = T_{m35_1}$
 $T_{m35_1} = T_{a34_35}$
 $T_{a34_35} = T_{mx_35}$
 $T_{mx_35} = T_{amx32_33}$
 $T_{amx32_33} = T_{am33_1}$
 $(M_{v36} \cdot h_v) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot V_{a1} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a36_1} - T_{a1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{m36} \cdot C_{pm} \cdot (T_{m36_1} - T_{m1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot V_{a35} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a35_36} - T_{a34_35})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot V_{mx35} \cdot C_{pm} \cdot (T_{mx_36} - T_{mx_35})) / \Delta t) -$

$((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx33} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx33_34} - \text{Tamx32_33})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam34} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam34_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv36} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt36} - \text{Pemt36}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt36} - \text{Pemt36}) - 0,3404$
 $t36 = 72$
 $\text{Lc36} = (\text{Mv36} / \text{Ao})$
 $\text{Acil36} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc36}$
 $\text{Vamx33} = \text{Vamx32} + \text{Vam33}$
 $\text{Vam34} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc34} / 4000000$
 $\text{Vm36} = (\text{Acil36} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx35} = \text{Vm35} + \text{Vmx34}$
 $\text{Va35} = 35 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta36_1} = \text{Tm36_1}$
 $\text{Tm36_1} = \text{Ta35_36}$
 $\text{Ta35_36} = \text{Tmx_36}$
 $\text{Tmx_36} = \text{Tamx33_34}$
 $\text{Tamx33_34} = \text{Tam34_1}$
 $(\text{Mv37} \cdot \text{hv}) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va1} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta37_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vm37} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tm37_1} - \text{Tm1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va36} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta36_37} - \text{Ta35_36})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vmx36} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tmx_37} - \text{Tmx_36})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx34} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx34_35} - \text{Tamx33_34})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam35} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam35_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv37} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt37} - \text{Pemt37}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt37} - \text{Pemt37}) - 0,3404$
 $t37 = 74$
 $\text{Lc37} = (\text{Mv37} / \text{Ao})$
 $\text{Acil37} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc37}$
 $\text{Vamx34} = \text{Vamx33} + \text{Vam34}$
 $\text{Vam35} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc35} / 4000000$
 $\text{Vm37} = (\text{Acil37} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx36} = \text{Vm36} + \text{Vmx35}$
 $\text{Va36} = 36 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta37_1} = \text{Tm37_1}$
 $\text{Tm37_1} = \text{Ta36_37}$
 $\text{Ta36_37} = \text{Tmx_37}$
 $\text{Tmx_37} = \text{Tamx34_35}$
 $\text{Tamx34_35} = \text{Tam35_1}$
 $(\text{Mv38} \cdot \text{hv}) / (\text{deltat} \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va1} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta38_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vm38} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tm38_1} - \text{Tm1_0})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Va37} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Ta37_38} - \text{Ta36_37})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot \text{Vmx37} \cdot \text{Cpm} \cdot (\text{Tmx_38} - \text{Tmx_37})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vamx35} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tamx35_36} - \text{Tamx34_35})) / \text{deltat}) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot \text{Vam36} \cdot \text{Cpa} \cdot (\text{Tam36_1} - \text{Ta1_0})) / \text{deltat})$
 $\text{Mv38} = -0,1101 \cdot (\ln(\text{Pt38} - \text{Pemt38}))^2 + 0,685 \cdot \ln(\text{Pt38} - \text{Pemt38}) - 0,3404$
 $t38 = 76$
 $\text{Lc38} = (\text{Mv38} / \text{Ao})$
 $\text{Acil38} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot \text{Lc38}$
 $\text{Vamx35} = \text{Vamx34} + \text{Vam35}$
 $\text{Vam36} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot \text{Lc36} / 4000000$
 $\text{Vm38} = (\text{Acil38} \cdot \text{Lcil}) / 1000000$
 $\text{Vmx37} = \text{Vm37} + \text{Vmx36}$
 $\text{Va37} = 37 \cdot \text{Ao} \cdot \text{La} / 1000000$
 $\text{Ta38_1} = \text{Tm38_1}$
 $\text{Tm38_1} = \text{Ta37_38}$
 $\text{Ta37_38} = \text{Tmx_38}$

$T_{mx_38} = T_{amx35_36}$
 $T_{amx35_36} = T_{am36_1}$
 $(Mv_{39} \cdot hv) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va_1 \cdot Cpa \cdot (Ta_{39_1} - Ta_{1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm_{39} \cdot Cpm \cdot (Tm_{39_1} - Tm_{1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va_{38} \cdot Cpa \cdot (Ta_{38_39} - Ta_{37_38})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm_{38} \cdot Cpm \cdot (Tmx_{39} - Tmx_{38})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam_{36} \cdot Cpa \cdot (Tam_{36_37} - Tam_{35_36})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam_{37} \cdot Cpa \cdot (Tam_{37_1} - Ta_{1_0})) / \Delta t)$
 $Mv_{39} = -0,1101 \cdot (\ln(Pt_{39} - Pemt_{39}))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt_{39} - Pemt_{39}) - 0,3404$
 $t_{39} = 78$
 $Lc_{39} = (Mv_{39} / Ao)$
 $Acil_{39} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc_{39}$
 $Vam_{36} = Vam_{35} + Vam_{36}$
 $Vam_{37} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc_{37} / 4000000$
 $Vm_{39} = (Acil_{39} \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vm_{38} = Vm_{38} + Vm_{37}$
 $Va_{38} = 38 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta_{39_1} = Tm_{39_1}$
 $Tm_{39_1} = Ta_{38_39}$
 $Ta_{38_39} = Tmx_{39}$
 $Tmx_{39} = Tam_{36_37}$
 $Tam_{36_37} = Tam_{37_1}$
 $(Mv_{40} \cdot hv) / (\Delta t \cdot 1000) = -((\text{densidad_agua} \cdot Va_1 \cdot Cpa \cdot (Ta_{40_1} - Ta_{1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm_{40} \cdot Cpm \cdot (Tm_{40_1} - Tm_{1_0})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Va_{39} \cdot Cpa \cdot (Ta_{39_40} - Ta_{38_39})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_metal} \cdot Vm_{39} \cdot Cpm \cdot (Tmx_{40} - Tmx_{39})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam_{37} \cdot Cpa \cdot (Tam_{37_38} - Tam_{36_37})) / \Delta t) -$
 $((\text{densidad_agua} \cdot Vam_{38} \cdot Cpa \cdot (Tam_{38_1} - Ta_{1_0})) / \Delta t)$
 $Mv_{40} = -0,1101 \cdot (\ln(Pt_{40} - Pemt_{40}))^2 + 0,685 \cdot \ln(Pt_{40} - Pemt_{40}) - 0,3404$
 $t_{40} = 80$
 $Lc_{40} = (Mv_{40} / Ao)$
 $Acil_{40} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 2,54 \cdot Lc_{40}$
 $Vam_{37} = Vam_{36} + Vam_{37}$
 $Vam_{38} = \pi \cdot ((1,5 - 0,75) \cdot 2,54)^2 \cdot Lc_{38} / 4000000$
 $Vm_{40} = (Acil_{40} \cdot Lcil) / 1000000$
 $Vm_{39} = Vm_{39} + Vm_{38}$
 $Va_{39} = 39 \cdot Ao \cdot La / 1000000$
 $Ta_{40_1} = Tm_{40_1}$
 $Tm_{40_1} = Ta_{39_40}$
 $Ta_{39_40} = Tmx_{40}$
 $Tmx_{40} = Tam_{37_38}$
 $Tam_{37_38} = Tam_{38_1}$

Ab= 2

$P_SAT(\text{Steam}; T = Ta_{1_0}) = Pt_1 / 10$
 $Msist_1 = (0,0027 \cdot t_1 + 0,3278) \cdot Ab / Aexp$
 $Pemt_1 = Paire + (Msist_1 / Vsis) \cdot (18,01 \cdot Ta_{1_1}) / 100$

$P_SAT(\text{Steam}; T = Ta_{1_1}) = Pt_2 / 10$
 $Msist_2 = (0,0027 \cdot t_2 + 0,3278) \cdot Ab / Aexp$
 $Pemt_2 = Paire + (Msist_2 / Vsis) \cdot (18,01 \cdot Ta_{2_1}) / 100$

P_SAT(Steam;T=Ta2_1)=Pt3/10
Msist3=(0,0027*t3+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt3= Paire+(Msist3/Vsis)*(18,01*Ta3_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta3_1)=Pt4/10
Msist4=(0,0027*t4+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt4= Paire+(Msist4/Vsis)*(18,01*Ta4_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta4_1)=Pt5/10
Msist5=(0,0027*t5+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt5= Paire+(Msist5/Vsis)*(18,01*Ta5_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta5_1)=Pt6/10
Msist6=(0,0027*t6+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt6= Paire+(Msist6/Vsis)*(18,01*Ta6_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta6_1)=Pt7/10
Msist7=(0,0027*t7+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt7= Paire+(Msist7/Vsis)*(18,01*Ta7_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta7_1)=Pt8/10
Msist8=(0,0027*t8+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt8= Paire+(Msist8/Vsis)*(18,01*Ta8_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta8_1)=Pt9/10
Msist9=(0,0027*t9+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt9= Paire+(Msist9/Vsis)*(18,01*Ta9_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta9_1)=Pt10/10
Msist10=(0,0027*t10+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt10= Paire+(Msist10/Vsis)*(18,01*Ta10_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta10_1)=Pt11/10
Msist11=(0,0027*t11+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt11= Paire+(Msist11/Vsis)*(18,01*Ta11_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta11_1)=Pt12/10
Msist12=(0,0027*t12+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt12= Paire+(Msist12/Vsis)*(18,01*Ta12_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta12_1)=Pt13/10
Msist13=(0,0027*t13+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt13= Paire+(Msist13/Vsis)*(18,01*Ta13_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta13_1)=Pt14/10
Msist14=(0,0027*t14+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt14= Paire+(Msist14/Vsis)*(18,01*Ta14_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta14_1)=Pt15/10
Msist15= (0,0027*t15+0,3278)*Ab/Aexp
Pemt15= Paire+(Msist15/Vsis)*(18,01*Ta15_1)/100

P_SAT(Steam;T=Ta15_1)=Pt16/10
Msist16=(0,0027*t16+0,3278)*Ab/Aexp

$P_{emt16} = P_{aire} + (M_{sist16}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a16_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a16_1}) = P_{t17}/10$
 $M_{sist17} = (0,0027 * t_{17} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt17} = P_{aire} + (M_{sist17}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a17_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a17_1}) = P_{t18}/10$
 $M_{sist18} = (0,0027 * t_{18} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt18} = P_{aire} + (M_{sist18}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a18_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a18_1}) = P_{t19}/10$
 $M_{sist19} = (0,0027 * t_{19} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt19} = P_{aire} + (M_{sist19}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a19_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a19_1}) = P_{t20}/10$
 $M_{sist20} = (0,0027 * t_{20} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt20} = P_{aire} + (M_{sist20}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a20_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a20_1}) = P_{t21}/10$
 $M_{sist21} = (0,0027 * t_{21} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt21} = P_{aire} + (M_{sist21}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a21_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a21_1}) = P_{t22}/10$
 $M_{sist22} = (0,0027 * t_{22} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt22} = P_{aire} + (M_{sist22}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a22_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a22_1}) = P_{t23}/10$
 $M_{sist23} = (0,0027 * t_{23} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt23} = P_{aire} + (M_{sist23}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a23_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a23_1}) = P_{t24}/10$
 $M_{sist24} = (0,0027 * t_{24} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt24} = P_{aire} + (M_{sist24}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a24_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a24_1}) = P_{t25}/10$
 $M_{sist25} = (0,0027 * t_{25} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt25} = P_{aire} + (M_{sist25}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a25_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a25_1}) = P_{t26}/10$
 $M_{sist26} = (0,0027 * t_{26} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt26} = P_{aire} + (M_{sist26}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a26_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a26_1}) = P_{t27}/10$
 $M_{sist27} = (0,0027 * t_{27} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt27} = P_{aire} + (M_{sist27}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a27_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a27_1}) = P_{t28}/10$
 $M_{sist28} = (0,0027 * t_{28} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt28} = P_{aire} + (M_{sist28}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a28_1}) / 100$
 $P_SAT(Steam; T=T_{a28_1}) = P_{t29}/10$
 $M_{sist29} = (0,0027 * t_{29} + 0,3278) * Ab / A_{exp}$
 $P_{emt29} = P_{aire} + (M_{sist29}/V_{sis}) * (18,01 * T_{a29_1}) / 100$

$$P_SAT(Steam;T=Ta29_1)=Pt30/10$$

$$Msist30=(0,0027*t30+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt30= Paire+(Msist30/Vsis)*(18,01*Ta30_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta30_1)=Pt31/10$$

$$Msist31=(0,0027*t31+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt31= Paire+(Msist31/Vsis)*(18,01*Ta31_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta31_1)=Pt32/10$$

$$Msist32=(0,0027*t32+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt32= Paire+(Msist32/Vsis)*(18,01*Ta32_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta32_1)=Pt33/10$$

$$Msist33=(0,0027*t33+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt33= Paire+(Msist33/Vsis)*(18,01*Ta33_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta33_1)=Pt34/10$$

$$Msist34=(0,0027*t34+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt34= Paire+(Msist34/Vsis)*(18,01*Ta34_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta34_1)=Pt35/10$$

$$Msist35=(0,0027*t35+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt35= Paire+(Msist35/Vsis)*(18,01*Ta35_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta35_1)=Pt36/10$$

$$Msist36=(0,0027*t36+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt36= Paire+(Msist36/Vsis)*(18,01*Ta36_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta36_1)=Pt37/10$$

$$Msist37=(0,0027*t37+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt37= Paire+(Msist37/Vsis)*(18,01*Ta37_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta37_1)=Pt38/10$$

$$Msist38=(0,0027*t38+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt38= Paire+(Msist38/Vsis)*(18,01*Ta38_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta38_1)=Pt39/10$$

$$Msist39=(0,0027*t39+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt39= Paire+(Msist39/Vsis)*(18,01*Ta39_1)/100$$

$$P_SAT(Steam;T=Ta39_1)=Pt40/10$$

$$Msist40=(0,0027*t40+0,3278)*Ab/Aexp$$

$$Pemt40= Paire+(Msist40/Vsis)*(18,01*Ta40_1)/100$$

"calculo del calor de refrigeracion"

$$(Mv1*hv)/(deltat*1000)=Q1$$

$$(Mv2*hv)/(deltat*1000)=Q2$$

$$(Mv3*hv)/(deltat*1000)=Q3$$

$$(Mv4*hv)/(deltat*1000)=Q4$$

$$(Mv5*hv)/(deltat*1000)=Q5$$

$$(Mv6*hv)/(deltat*1000)=Q6$$

$$(Mv7*hv)/(deltat*1000)=Q7$$

$$(Mv8*hv)/(deltat*1000)=Q8$$

(Mv9*hv)/(deltat*1000)=Q9
(Mv10*hv)/(deltat*1000)=Q10
(Mv11*hv)/(deltat*1000)=Q11
(Mv12*hv)/(deltat*1000)=Q12
(Mv13*hv)/(deltat*1000)=Q13
(Mv14*hv)/(deltat*1000)=Q14
(Mv15*hv)/(deltat*1000)=Q15
(Mv16*hv)/(deltat*1000)=Q16
(Mv17*hv)/(deltat*1000)=Q17
(Mv18*hv)/(deltat*1000)=Q18
(Mv19*hv)/(deltat*1000)=Q19
(Mv20*hv)/(deltat*1000)=Q20
(Mv21*hv)/(deltat*1000)=Q21
(Mv22*hv)/(deltat*1000)=Q22
(Mv23*hv)/(deltat*1000)=Q23
(Mv24*hv)/(deltat*1000)=Q24
(Mv25*hv)/(deltat*1000)=Q25
(Mv26*hv)/(deltat*1000)=Q26
(Mv27*hv)/(deltat*1000)=Q27
(Mv28*hv)/(deltat*1000)=Q28
(Mv29*hv)/(deltat*1000)=Q29
(Mv30*hv)/(deltat*1000)=Q30
(Mv31*hv)/(deltat*1000)=Q31
(Mv32*hv)/(deltat*1000)=Q32
(Mv33*hv)/(deltat*1000)=Q33
(Mv34*hv)/(deltat*1000)=Q34
(Mv35*hv)/(deltat*1000)=Q35
(Mv36*hv)/(deltat*1000)=Q36
(Mv37*hv)/(deltat*1000)=Q37
(Mv38*hv)/(deltat*1000)=Q38
(Mv39*hv)/(deltat*1000)=Q39