



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
"Francisco García Salinas"

Unidad Académica de Ciencias Químicas
Maestría en Ciencia y Tecnología Química

TESIS

**Diseño y estudio experimental de sistemas de regeneración de
soluciones acuosas de CaCl_2 mediante energía solar.**

Para Obtener el Grado de
Maestro en Ciencia y Tecnología Química

Presenta:

I.Q. Ethson Uriel Carrera Arellano

Directores:

Dra. María de los Ángeles Hernández Ruiz

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa (Externo)

Dr. Juan Manuel García González

Diciembre 2019

Dedicatoria

A mis sobrinos:



Jazmin, Kalel, Abril, Zoé y Nicole

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT SENNER), por el apoyo económico sin el cual no hubiese sido posible realizar este trabajo de investigación a través de la beca con registro No. 496064.

A la Unidad Académica de Ciencias Químicas, al Posgrado de Maestría en Ciencia y Tecnología Química y al Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México.

A mis asesores, el Dr. Juan Manuel García González, por su confianza, enseñanza, por toda la paciencia que me ha tenido y por su apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo y por considerarme una persona capaz de hacer cosas grandes.

Al Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa, por abrirme las puertas en su equipo de trabajo, por brindarme la oportunidad de realizar mi estancia de investigación en el IER, por su apoyo, paciencia y amistad, sobre todo por darme la bienvenida en el mundo de la energía solar, ¡¡¡MUCHAS GRACIAS!!!

A la Dra. María de los Ángeles Hernández Ruiz por todo el apoyo para la culminación de este trabajo.

Al Dr. Víctor Manuel García Saldívar, por su amistad, por sus consejos y sus enseñanzas. Gracias a su entusiasmo impartiendo sus materias fue que me empezaron a interesar los temas de energía solar y materiales.

A todos los integrantes y colaboradores del equipo de solarimetría por su apoyo en las actividades.

A lo más importante de mi vida, mis padres: Sr. Eliseo Carrera Torres y Sra. Asalia Arellano Vasquez quienes me han educado y formado para ser la persona que soy actualmente, además, me han animado para salir adelante en todos mis retos, a mis hermanas Laila Roxana y Diana Cecilia por ser una gran motivación de vida.

A la MCI. Laura Isabel Méndez Robles, por todo su apoyo incondicional, por todas las aventuras que hemos vivido juntos, por motivarme y levantarme en los momentos difíciles.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
NOMENCLATURA	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCION.....	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3. ANTECEDENTES.....	19
3.1 Al aire.....	19
3.1.1 Propiedades de la mezcla aire-vapor de agua.....	20
3.1.2 Psicrometría.....	20
3.2 Climatización y acondicionamiento de aire	28
3.3 Métodos de humidificación.....	29
3.3.1 Mezcla de dos masas de gases húmedos	29
3.3.2 Adición de un vapor en condiciones de saturación	31
3.3.3 Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa.....	31
3.3.4 Adición de un líquido en cualquier condición, en donde sólo se evapora una parte.....	32
3.3.5 Humidificación por contacto de una masa gaseosa con un sólido húmedo	33
3.4 Deshumidificación	34
3.4.1 Deshumidificación por enfriamiento	34
3.4.2 Deshumidificación por incremento de presión.....	36
3.4.3 Deshumidificación por desecantes.....	36

3.5	Métodos de deshumidificación con desecantes.....	37
3.5.1	Proceso de deshumidificación por desecantes.	39
3.5.2	Desecantes sólidos	39
3.5.3	Desecantes líquidos.....	40
3.5.4	Sistemas con desecantes	41
3.6	Regeneración de desecantes	42
3.6.1	Regeneración por electrodiálisis	42
3.6.2	Regeneración solar	43
3.7	Cloruro de Calcio como desecante	44
4.	JUSTIFICACIÓN HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	45
4.1	Justificación.....	45
4.2	Hipótesis	46
4.3	Objetivo general	47
4.4	Objetivos específicos	47
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
5.1	Sistemas de regeneración propuestos.....	48
5.1.1	Consideraciones de diseño	48
5.1.2	Propiedades físicas y fisicoquímica del sistema $CaCl_2$	50
5.2	Materiales.....	60
5.2.1	Diseño y descripción de las características de los sistemas de regeneración.	60
5.2.2	Instrumentación para el monitoreo de los equipos regeneradores	65
5.2.3	Instrumentación de condiciones ambientales.	67
5.2.4	Adquisición y manejo de datos.....	68
5.3	Metodología experimental.....	71

5.3.1 Calibración de equipos.....	71
5.3.2 Metodología de la regeneración (CaCl ₂ *H ₂ O).....	73
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
6.1 Resultados preliminares.....	77
6.2 Regeneración de sales y cálculos de energía solar y térmica aprovechada	79
7. CONCLUSIONES	89
8. PERSPECTIVAS.	90
9. REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del aire seco.	19
Tabla 2. Datos climatológicos históricos promediados de Zacatecas	50
Tabla 3. Coeficientes de solvatación del CaCl_2	51
Tabla 4. Coeficientes para cálculo de presión de vapor del $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$	53
Tabla 5. Parámetros de mezcla para la presión de vapor del CaCl_2	55
Tabla 6. Coeficientes para la ecuación de presión de vapor.	55
Tabla 7. Coeficientes para la ecuación de densidad relativa	59
Tabla 8. Lista de materiales para elaboración de los regeneradores.	65
Tabla 9. Valores de factores de corrección obtenidos para sensores de flujo.	72
Tabla 10. Datos obtenidos de temperatura y número de recirculaciones en pruebas preliminares.	78
Tabla 11. Datos iniciales de primer día de prueba	79
Tabla 12. Valores obtenidos de regeneración de CaCl_2 en términos de densidad relativa.	81
Tabla 13. Datos para estimación de la posición solar en días de prueba.	83
Tabla 14. Tabla de datos de regeneración.	83
Tabla 15. Fracciones másicas de CaCl_2 obtenidas	84
Tabla 16. Energía teórica captada por los equipos regeneradores en 0.5m^2	86
Tabla 17. Cantidad de energía solar aprovechada por los equipos de regeneración.	87
Tabla 18. Cantidad de energía consumida por las bombas de recirculación de los equipos de regeneración.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Humedad relativa: a) promedio anual 2018, b) máximos mes de julio de 2018.	17
Figura 2. Carta psicrométrica.	21
Figura 3. Curvas de humedad relativa	23
Figura 4. Líneas de humedad absoluta en gramos de humedad /kg de aire seco.	24
Figura 5. Líneas de temperatura de bulbo seco.	25
Figura 6. Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.	25
Figura 7. Líneas de temperatura de bulbo húmedo o saturación adiabática.	26
Figura 8. Temperatura de rocío.	26
Figura 9. Líneas de volumen específico en m ³ /kg de aire seco.	27
Figura 10. Líneas de entalpía de saturación en kJ/kg de aire seco.	28
Figura 11. Cámara de mezcla adiabática.	30
Figura 12. Representación de una mezcla de masas gaseosas húmedas.	30
Figura 13. Esquema de cámara de enfriamiento de aire por intercambio de calor con líquido.	32
Figura 14. Cámara de mezcla de adición de líquido	33
Figura 15. Humidificación entre sólido y gas.	33
Figura 16. Proceso de deshumidificación por enfriamiento.	35
Figura 17. Representación gráfica del proceso de deshumidificación por enfriamiento.	36
Figura 18. Esquema básico de deshumidificación por desecante líquido.	37
Figura 19. Esquema básico de deshumidificación por desecantes sólidos.	38
Figura 20. Esquema de deshumidificación por desecantes sólidos por cambio de estado físico.	38
Figura 21. Diagrama de presión de vapor – temperatura y contenido de agua.	39
Figura 22. Procesos de un sistema de enfriamiento con desecantes líquidos	41
Figura 23. Proceso de electrodiálisis.	43
Figura 24. Esquema destilador solar directo.	43

Figura 25 Estación Solarimétrica Zacatecas_04 del Sistema Nacional de Solarimetría.....	49
Figura 26. Curva de solubilidad del CaCl_2	52
Figura 27. Presión de vapor de la solución de $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$	54
Figura 28. Curvas de presión de vapor de CaCl_2 como función de la temperatura a diferentes concentraciones.....	56
Figura 29. Relación de humedad en soluciones de CaCl_2	57
Figura 30. Cambio de la entalpía de la solución de $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$	58
Figura 31. Densidad relativa de soluciones acuosas de CaCl_2	59
Figura 32. Cloruro de calcio granular.	60
Figura 33. Soporte de equipo de deshumidificación.....	61
Figura 34. Base de regenerador.....	61
Figura 35. Reguladores de nivel de equipos regeneradores.....	62
Figura 36. Placa estilo rampa de regenerador.	62
Figura 37. Placa escalonada de regenerador.....	63
Figura 38. Estructuras de equipo de regeneración: a) cubierta de pintura de esmalte, b) cubierta de vidrio.	63
Figura 39. Contenedores poliestireno de 25 litros.	64
Figura 40. Bomba para flujos bajos.....	64
Figura 41. Sensor de temperatura DS18B20	66
Figura 42. Sensor de temperatura y humedad relativa modelo DTH22.	66
Figura 43. Sensor de flujo de efecto hall.	67
Figura 44. Piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP)	67
Figura 45. Sensor de temperatura y humedad relativa modelo HC2S3.	68
Figura 46. Placa Arduino uno.	69
Figura 47. Diagrama de conexión de sensores a Arduino uno.....	69
Figura 48. Adquisidor de datos CR3000.	70
Figura 49. Curvas de medición de temperatura y ecuaciones de calibración de sensores DS18B20.	72
Figura 50. Estufa de calentamiento convectivo.	73
Figura 51. Instalación de los equipos de regeneración de CaCl_2 acuoso.	74

Figura 52. Esquema gráfico de operación de regeneradores.....	75
Figura 53. Determinación de densidad relativa en soluciones de CaCl_2 con densímetro.	76
Figura 54. Esquema de ubicación de sensores de temperatura DS18B20.	76
Figura 55. Canalización en el flujo de solución de CaCl_2	77
Figura 56. Diagrama de ensamble de equipos.....	80
Figura 57. Incremento de temperatura en equipos de regeneración de CaCl_2	80
Figura 58. Densidad relativa del CaCl_2 a 25°C	82
Figura 59. Perfil de temperaturas a la salida del regenerador.....	85
Figura 60. Radiación solar global en los días de pruebas.....	86

NOMENCLATURA

Nomenclatura

\dot{m}	Flujo másico
AC	Acondicionamiento convencional de aire
ADC	Convertidor analógico digital
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CaCl ₂	Cloruro de calcio
CFC	clorofluorocarbonos
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	Coeficiente de rendimiento
C _p	Calor específico
DAC	Sistema de acondicionamiento con desecante
G	Gas
H	Entalpía
W	Humedad relativa
H ₂ O	Agua
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
K	Factor de corrección de sensores de temperatura
L	Líquido
LaNGIF	Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria
LiCl	Cloruro de litio
m	Masa
P	Presión
PTR	Perfil Tubular rectangular
PVC	Policloruro de vinilo

Q	Calor
SCV	Sistema de compresión de vapor.
T	Temperatura
X	Fracción másica
Z	Longitud
Δ	Cambio
θ	Solubilidad
ρ	Densidad

Subíndices y superíndices

a	Ambiente
aire	Aire
d	Disolución
l	Latente
Max	Máxima
Min	Mínima
R	Relativo
sat	Saturado
s	Sensible
t	Temperatura
v	Vapor
W	Agua

RESUMEN

Los desecantes son sustancias absorbentes o adsorbentes que tiene una gran afinidad por la humedad, es decir, son capaces de extraer o liberar vapor de agua del aire, en cantidades relativamente grandes. Es importante desde el punto de vista económico la recuperación por regeneración térmica de estos desecantes.

Por lo anterior, el desarrollo de una técnica para la regeneración de este tipo de sustancias resulta de interés técnico y económico. Por ello, en el presente trabajo se diseñaron, construyeron y se experimentó con dos equipos para la regeneración de cloruro de calcio en soluciones acuosas, uno de superficie plana y otro escalonado asistidos por energía solar como medio de calentamiento. Este proceso fue monitoreado mediante diversos sensores de temperatura y humedad para conocer las condiciones de operación dentro de los regeneradores, así como las condiciones ambientales a lo largo de los experimentos mediante una estación climática y solarimétrica.

Durante el estudio se pudo observar que los materiales y el dimensionamiento de ambos equipos son adecuados. Al comparar las temperaturas y cantidad de agua evaporada durante el periodo de pruebas se obtuvo un mejor desempeño en el regenerador con plano inclinado, que en el tipo escalonado.

Finalmente se pudo corroborar el mejor desempeño del equipo de plano inclinado respecto al escalonado mediante la evaluación de la densidad relativa de las soluciones.

ABSTRACT

Desiccants are absorbent or adsorbent substances that have a high affinity for humidity, in other words, they are capable of extracting or releasing water vapor from the air in relatively large quantities. Recovery by thermal regeneration of these desiccants is economically important.

Therefore, the development of a technique for the regeneration of this type of substances is of technical and economic interest. For this reason, in the present work, two equipments for the regeneration of calcium chloride in aqueous solutions were designed, built and experimented, one with a flat surface and the other stepped, assisted by solar energy as a heating medium. This process was monitored by various temperature and humidity sensors to know the operating conditions within the regenerators, as well as the environmental conditions throughout the experiments using a climatic and solarimetric station.

During the study it was observed that the materials and the sizing of both devices are adequate. When comparing the temperatures and the amount of water evaporated during the test period, a better performance was obtained in the regenerator with inclined plane than in the stepped type.

Finally, it was possible to corroborate the best performance of the inclined plane equipment with respect to the stepped evaluation of the relative density of the solutions.

1. INTRODUCCION

En las últimas décadas, en el campo de climatización de espacios, el sector industrial se ha enfocado en el control de la humedad ambiental, esto debido a las repercusiones que tiene sobre los procesos industriales de farmacéutica, secado de alimentos, fabricación de barcos, entre otros y la climatización de espacios, como hoteles, casas y centros comerciales. Esto ha provocado una creciente demanda de equipos de climatización que a su vez genera una mayor demanda de recursos energéticos primarios.

Los equipos de climatización operan bajo mecanismos de transferencia de calor realizando operaciones de evaporación y condensación de agua proveniente del aire ambiental, de tal forma que pueden controlar la temperatura, calidad de aire y humedad en ambientes cerrados [1].

Es así como se crea la necesidad de eliminar parcial o totalmente el vapor de agua del aire (proceso denominado deshumidificación), con el fin de conseguir condiciones óptimas de operación. Actualmente existen varios métodos para la deshumidificación, entre los cuales destacan principalmente la deshumidificación por enfriamiento y la deshumidificación utilizando desecantes.

El primer método consiste en llevar al aire húmedo por debajo de su temperatura de punto de rocío, lo cual ocasiona una condensación del agua en el aire, obteniéndose de manera simultánea un enfriamiento y la deshumidificación.

El segundo método, se basa en la utilización de materiales desecantes absorbentes o adsorbentes en estado sólido y líquido (absorbentes y adsorbentes), que al ponerse en contacto con vapor de agua retienen una cierta cantidad, aumentando su temperatura debido al calor de disolución.

Actualmente, existen varios sistemas que operan con este método (deshumidificación por desecante). Los cuales tienen un gran potencial de mejora en el proceso de deshumidificación, ya que bajo las condiciones adecuadas podrían aumentar la velocidad y facilitar el proceso de retención de humedad.

Dentro de absorbedores y adsorbedores utilizados para estos procesos, como materiales sólidos se usa la sílice, alúmina, zeolitas, carbón activado, etcétera, y para los absorbentes líquidos se utilizan soluciones de sales inorgánicas, como LiCl y el CaCl_2 , entre otros. Estos desecantes pueden regenerarse mediante procesos de calentamiento conductivo y/o convectivos y radiativos derivados de fuentes de energía convencionales (eléctrica y provenientes de combustibles fósiles) y energías renovables como la energía solar, la geotermia y la biomasa.

En los últimos años han surgido varias técnicas donde se regeneran sales sólidas y líquidas utilizando calentamiento conductivo y convectivo tanto para sistemas de calentamiento convencional como para sistemas que operan con energías renovables, sin embargo, se desconoce si la energía solar disponible en la zona centro-norte de México es suficiente para realizar procesos de regeneración de sales higroscópicas en estado líquido con las condiciones climáticas del estado de Zacatecas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad gran parte de los procesos industriales tales como la fabricación de medicamentos, los farmacéuticos, el tratamiento y preservación de la madera, los textiles, los almacenamientos de productos postcosecha y el secado de alimentos dependen de las condiciones ambientales, principalmente de la temperatura y de la humedad ambiental, cuyos altos valores propician la generación de mohos, la descomposición de los productos, la corrosión de metales o simplemente lograr un entorno climático no deseado [2].

México es un país con una amplia diversidad de condiciones climáticas con zonas donde el clima varía a lo largo de todo el año. Este entorno tan cambiante genera ambientes con altos contenidos de humedad en la mayor parte del país sobre todo en la temporada de abril-agosto lo cual dificulta el control de las condiciones en los procesos, en la Figura 1 se muestran dos mapas del territorio nacional que muestran: a) la humedad relativa máxima anual y b) los valores de humedad relativa máxima para el mes de julio [3].

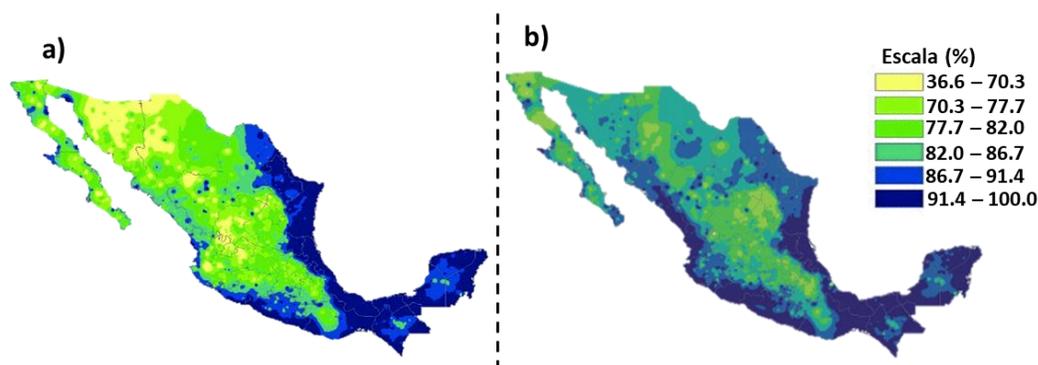


Figura 1. Humedad relativa: a) promedio anual 2018, b) máximos mes de julio de 2018.

Por ello, es importante lograr un acondicionamiento de aire en los procesos para facilitar y optimizar los procesos mediante la reducción del contenido de humedad y control de la temperatura.

En la actualidad existen sistemas de acondicionamiento de aire que cubren estas necesidades, como los sistemas de compresión mecánica de vapor (SCV) que según la investigación realizada por el Instituto Internacional de Refrigeración en París presentan una problemática debido a su alto consumo energético. Según este estudio, la proporción de energía utilizada por sistemas de aire acondicionado en el hogar y en edificaciones representa casi el 45% del consumo eléctrico de este sector, lo cual representa casi el 15% del consumo total de energía en el mundo [4].

Además, en países en desarrollo aún se utilizan refrigerantes con un alto impacto ambiental como los clorofluorocarbonos (CFC) los cuales generan el adelgazamiento de la capa de ozono y equipos que generan grandes cantidades de CO₂, siendo un problema para el medio ambiente [5].

Por ello surge la necesidad de buscar nuevas alternativas para satisfacer las condiciones de climatización y disminuir el impacto ambiental debido al alto consumo eléctrico de los equipos. Así como nuevas alternativas para reciclar y regenerar las sustancias químicas involucradas en dichos equipos de climatización.

3. ANTECEDENTES

3.1 Al aire

El aire es una mezcla de gases y de vapores, incolora, inodora e insabora que existe en el ambiente, la Tierra goza de un aire abundante constituido fundamentalmente por: nitrógeno y oxígeno; y otros gases cuya proporción varía de acuerdo a la temperatura, flora, fauna, contaminación, entre otras [6].

Además de la mezcla de gases, el aire contiene una cantidad variable de vapor, que por medio de su calor específico (C_p) logra modificar la capacidad de absorber, retener y disipar calor. [7].

La cantidad de agua que puede retener el aire depende de varias condiciones ambientales como temperatura y presión. Es por eso que, en psicrometría, el aire se divide en dos tipos: un aire carente de agua y que se forma solo por la mezcla de gases, el cual es conocido como aire seco cuya composición se muestra en la Tabla 1 y el aire atmosférico, o llamado aire húmedo [8].

Tabla 1. Composición del aire seco.

Componentes	Porcentaje volumétrico	
	ASHRA ^[9]	Wang ^[10]
Nitrógeno	78.0840	78.08
Oxígeno	20.9476	20.95
Dióxido de carbono	---	0.03
Argón	0.9340	---
Neón	0.0018	---
Helio	0.0005	---
Otros	0.0321	0.01

3.1.1 Propiedades de la mezcla aire-vapor de agua

El aire húmedo se define como una mezcla de aire seco y vapor de agua en el cual el aire seco se trata como un componente puro con comportamiento ideal y cuyos pesos moleculares son de $28.965 \text{ kgmol}^{-1}$ y $18.015 \text{ kgmol}^{-1}$ respectivamente [11].

Dependiendo de la concentración de agua, y de variables ambientales como la temperatura (T), presión (P), humedad relativa (HR), entre otras, podemos encontrar una mezcla aire-vapor de humedad con diferentes propiedades termodinámicas.

3.1.2 Psicrometría

La psicrometría es la ciencia dedicada al estudio de las de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y del efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y sobre el confort humano. Esta ciencia resulta útil en el diseño y análisis de sistemas de almacenamiento y procesado de alimentos, diseño de equipos de refrigeración, estudio del secado de alimentos, estudios de aire acondicionado y climatización, torres de enfriamiento, y en todos los procesos que exijan un control del contenido de agua en el aire.

En la psicrometría se relacionan propiedades termodinámicas de la mezcla aire-agua tales como, entalpía de mezcla, humedad relativa, calor específico, temperatura de bulbo húmedo, entre otras. Debido a que las diferentes propiedades del aire húmedo están relacionadas entre sí es posible realizar estudios de forma que a partir de dos propiedades cualesquiera se obtengan otras propiedades.

A principios del siglo XX, un ingeniero alemán llamado Richard Mollier inventó un método gráfico de visualización de las propiedades de diversas mezclas de aire y vapor de agua. Este dispositivo conocido como: diagrama de Mollier o carta

psicrométrica (Figura 2) hoy en día es una de las bases de la medición del frío (psicrometría) mediante la incorporación de las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y procesos.

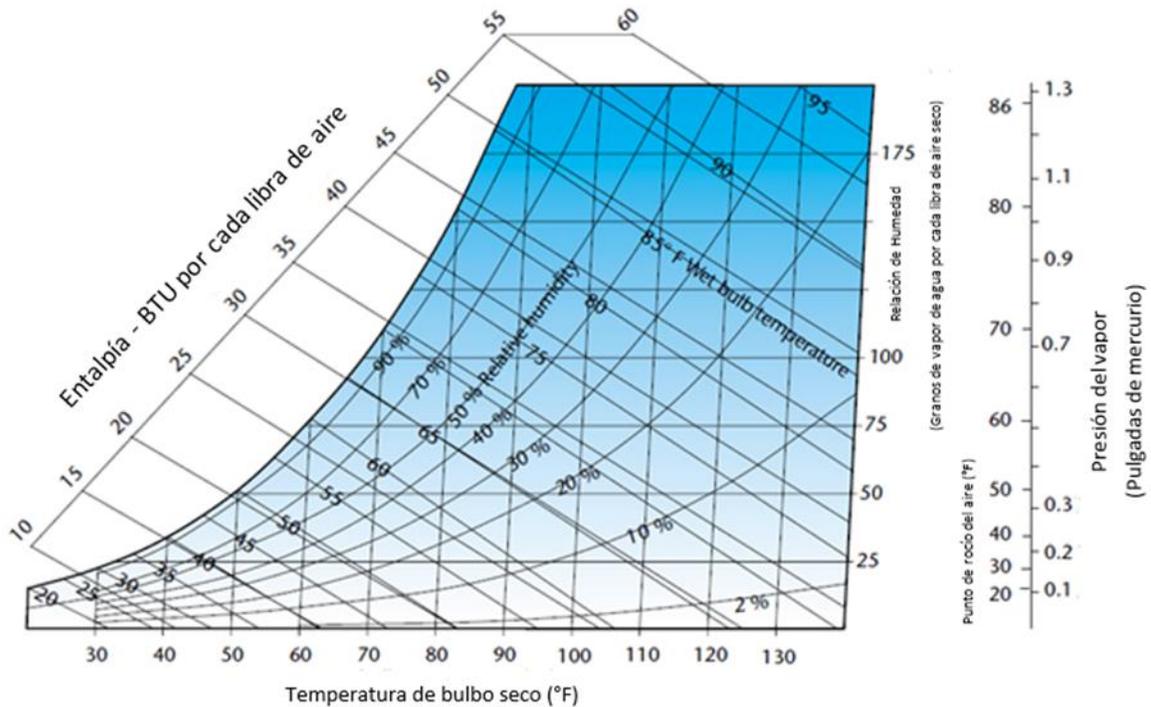


Figura 2. Carta psicrométrica.

A partir de la masa de aire seco como base de cálculo, este diagrama ofrece una información de las propiedades termodinámicas de las mezclas aire-agua. Si se conocen dos propiedades de la mezcla, el gráfico permite determinar otras propiedades como lo son:

La humedad relativa (ϕ o H_R) que se define como la relación entre la presión de vapor y la presión de saturación a la misma temperatura:

$$H_R = \left(\frac{H}{H_{sat}} \right) (100) \quad (1)$$

La relación entre la cantidad de vapor de agua contenido en cierta masa de aire y el que éste contendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura. Suele expresarse en %:

$$\phi = \left(\frac{m_v}{m_v^{sat}} \right) = \frac{P_v}{P_{sat}^{(t)}} \quad (2)$$

Volumen específico del gas húmedo o volumen húmedo, que se define como el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes:

$$v_H = \left(\frac{1}{M_A} + \frac{H}{M_W} \right) \frac{RT}{P} \quad (3)$$

Calor específico (C_H), que es el calor necesario para aumentar la temperatura de 1 kg de gas más el vapor que le acompañe, en 1 °C.

$$C_H = C_{PW}H + C_{PA} \quad (4)$$

Entalpía específica, es la suma del calor sensible de una masa de gas y el calor latente de vaporización a la temperatura a la que se refieren las entalpías.

$$\hat{H} = C_H (T - T_0) + \lambda_0 H \quad (5)$$

Temperatura de saturación adiabática, la cual se define como la temperatura alcanzada por una masa gaseosa cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas. Dicho puede ser obtenido con la ecuación (6), donde T_s es la temperatura de saturación:

$$H_s - H = \left(\frac{C_H}{\lambda_s} \right) (T - T_s) \quad (6)$$

En una carta psicrométrica, las líneas de humedad relativa constante se representan mediante líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en por ciento, y este valor se indica sobre cada línea.

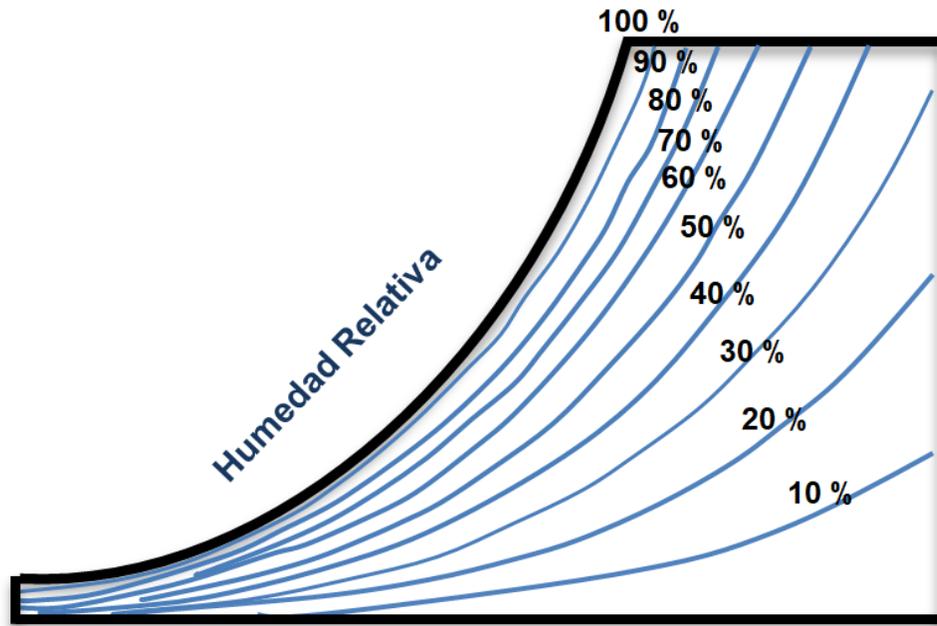


Figura 3. Curvas de humedad relativa

La humedad absoluta o específica la cual indica cuantos kilogramos de vapor de agua acompaña a cada kilogramo de agua seco (Ecuación 7).

$$Humedad_{absoluta} = \frac{Kg \text{ vapor de agua}}{Kg \text{ aire seco}} \quad (7)$$

En el diagrama de Mollier, esta es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica, como se indica en la Figura 4.

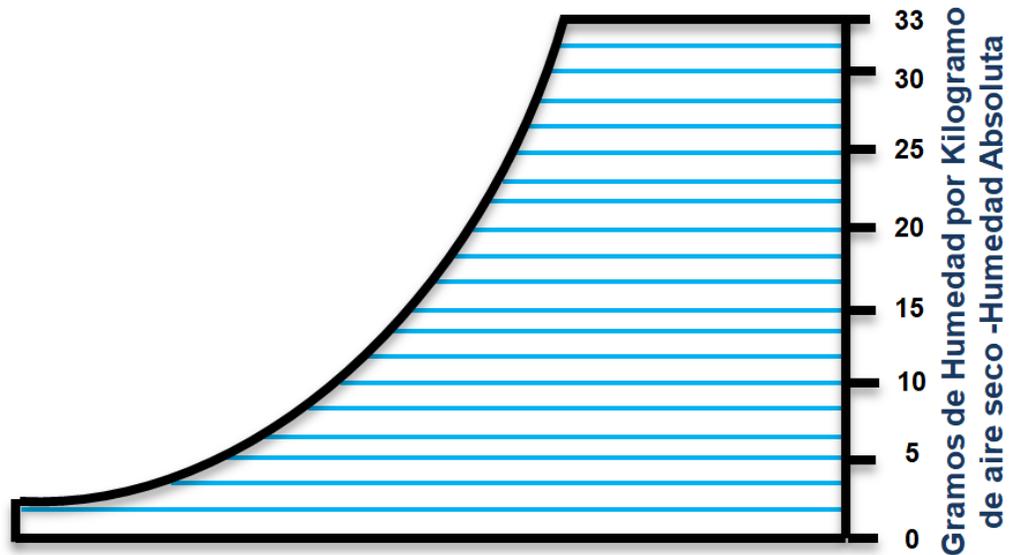


Figura 4. Líneas de humedad absoluta en gramos de humedad /kg de aire seco.

Temperatura de bulbo seco (T_{bs}) es la temperatura del aire húmedo y con frecuencia se la denomina sólo temperatura del aire; es la temperatura del aire que marca un termómetro común. En un diagrama de Mollier las líneas que se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, son las líneas de temperatura de bulbo seco constantes, o simplemente «líneas de bulbo seco». Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja, como se muestra en la Figura 5.

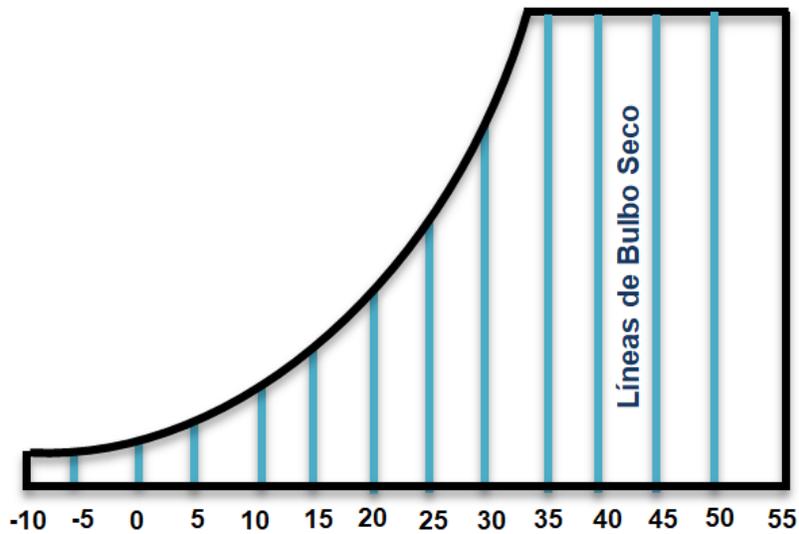


Figura 5. Líneas de temperatura de bulbo seco.

Temperatura de bulbo Húmedo (T_{bh}) es la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo (termómetro envuelto en un paño de algodón empapado con agua). Es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro como se presenta en la Figura 6.

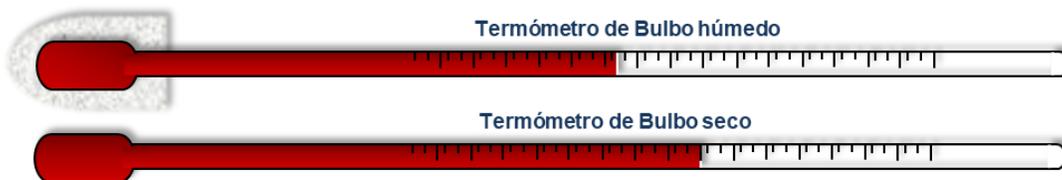


Figura 6. Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.

La escala de temperaturas de bulbo húmedo, es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte curva de la carta psicrométrica, como se muestra en la Figura 7. Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constantes o líneas de bulbo húmedo, (Saturación adiabática) se localizan diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en un ángulo de aproximadamente 30° de la horizontal. También se les dice constantes, porque todos los puntos a lo largo de una de estas líneas, están a la misma temperatura de bulbo húmedo.

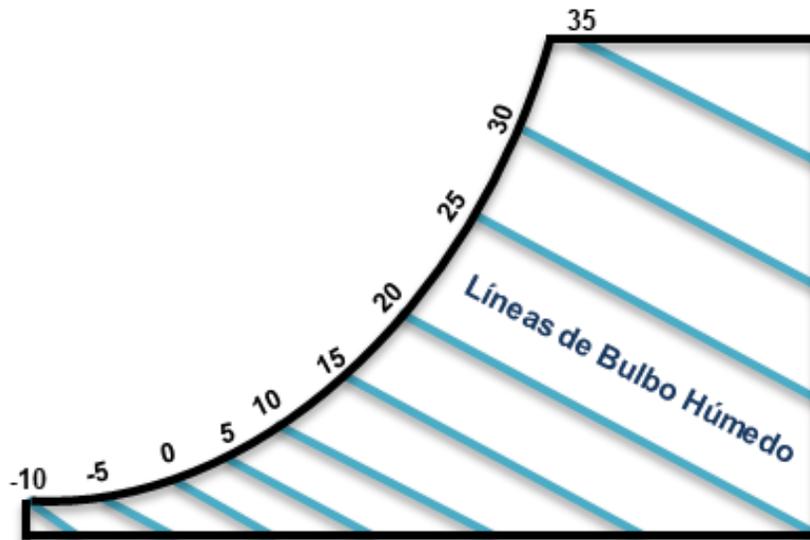


Figura 7. Líneas de temperatura de bulbo húmedo o saturación adiabática.

Temperatura de rocío, es la temperatura por debajo de la cual se condensará la humedad sobre una superficie. La escala para las temperaturas de punto de rocío es idéntica que la escala para las temperaturas de bulbo húmedo; es decir, es la misma escala para ambas propiedades. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, se localizan horizontalmente de izquierda a derecha, como se ilustra en la Figura 8, no en forma diagonal como las de bulbo húmedo.

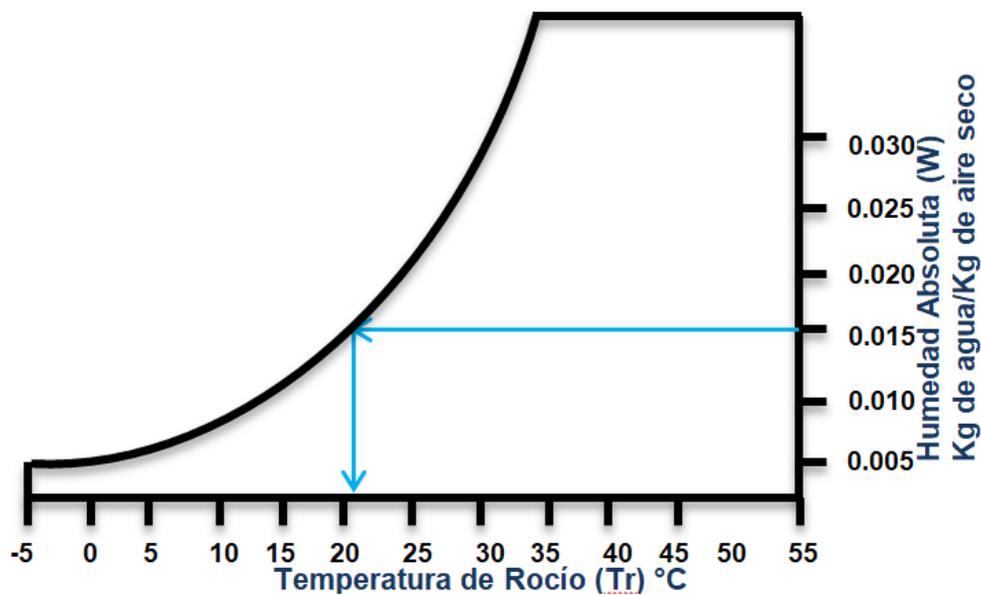


Figura 8. Temperatura de rocío.

Volumen específico:

En la Figura 9, se muestran las líneas del volumen específico constante en una carta psicrométrica. Estas líneas están en un ángulo aproximado de 60° con la horizontal y van aumentando de valor de izquierda a derecha. Por lo general, el espacio entre cada línea, representa un cambio de volumen específico de 0.05 m³/kg.

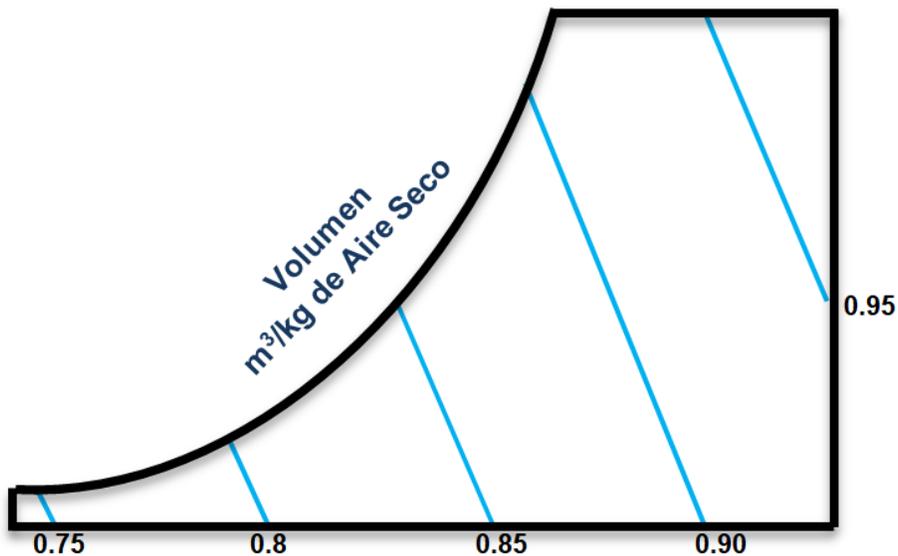


Figura 9. Líneas de volumen específico en m³/kg de aire seco.

Si se desea saber la densidad del aire a cualquier condición, como corresponde al valor inverso del volumen específico. Debido a que la mayoría de los cálculos en sistemas de aire acondicionado, se basan en el peso del aire en lugar del volumen de aire, se recomienda el uso del volumen específico (m³/kg de aire) en lugar de la densidad (kg/m³ de aire).

Entalpía de saturación

Simbolizada con la letra H, se muestra en la Figura 10 como líneas en un ángulo de 30° respecto a la horizontal, cuya variación expresa una medida de la cantidad

de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Dentro de la carta psicrométrica las líneas de entalpía constantes son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo; puesto que el calor total del aire, depende de la temperatura de bulbo húmedo. La escala del lado izquierdo lejana a la línea curva, da el calor total del aire en kJ/kg (kilojoules por kilogramo) de aire seco, en el sistema internacional o en btu/lb de aire seco, en el sistema inglés. Esta escala aumenta de -6 kJ/kg a la temperatura de -10 °C de bulbo húmedo, hasta aproximadamente 115 kJ/kg a 33 °C de bulbo húmedo.

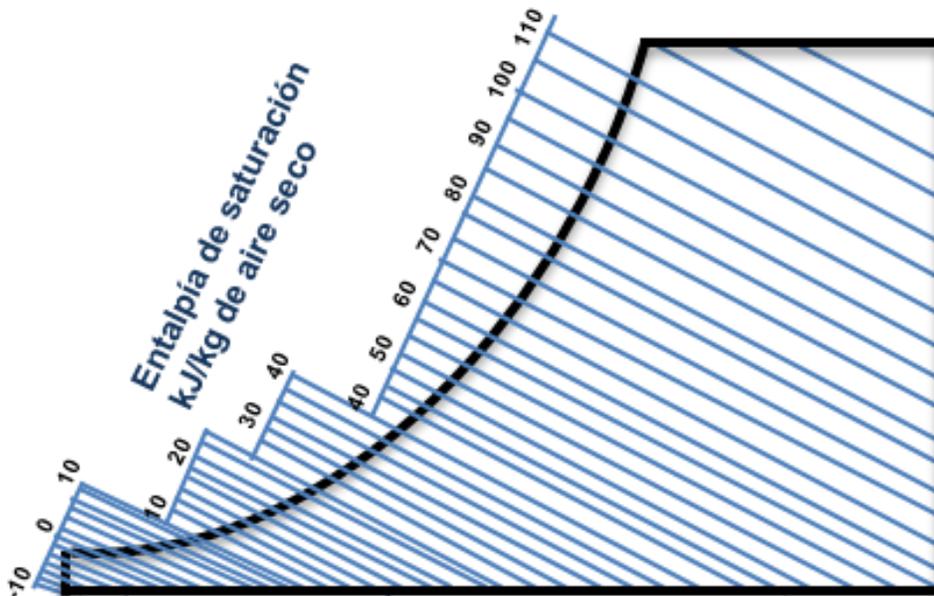


Figura 10. Líneas de entalpía de saturación en kJ/kg de aire seco.

3.2 Climatización y acondicionamiento de aire

La climatización es el proceso de tratamiento de aire que controla simultáneamente su temperatura, humedad, limpieza y distribución para responder a las exigencias de un espacio determinado.

Climatizar es una necesidad de higiene lo cual da como consecuencia un confort y bienestar. Un buen "clima" en el caso de los hospitales acelera el proceso de curación e intensifica la capacidad de trabajo de individuos, además en procesos

industriales y alimenticios puede ayudar a controlar las condiciones de operación repercutiendo de manera positiva en el los productos y servicios generados tanto en calidad como en tiempo de vida.

El confort y acondicionamiento del aire generado con la climatización está asociado a la temperatura de bulbo seco y al contenido de humedad en el aire, que, según estudios realizados por el ASHRAE, la sensación de comodidad térmica para los humanos en el rango de temperatura de bulbo seco para verano fue de 23.5° hasta 27° C y la humedad relativa de 30 a 60% [12].

3.3 Métodos de humidificación

Para la humidificación del aire, existen diversos métodos por el cual se puede incrementar la cantidad de vapor de agua retenida en el aire. En la mayoría de los casos, la masa de aire se pone en contacto con líquidos, sólidos húmedos o con masas de aire húmedo. La mayoría de los métodos son simples, a excepción de la humidificación adiabática la cual requiere ciertas condiciones especiales.

3.3.1 Mezcla de dos masas de gases húmedos

Este método consiste en mezclar adiabáticamente masas de gases húmedos que contienen humedades diferentes [13]. El cálculo de las condiciones de la masa de gas resultante es simple y está en función de las condiciones iniciales de las dos corrientes gaseosas, que indicamos por W_1 , W_2 , H_1 , H_2 , t_1 , t_2 , y G_1 , G_2 (siendo estas últimas las masas de aire húmedo) (Figura 11).



Figura 11. Cámara de mezcla adiabática.

Las condiciones finales de la mezcla se determinan efectuando un balance materia y entalpía aplicada a toda la masa, y un balance de materia referido al vapor:

Las condiciones del aire húmedo resultante se encuentran en el diagrama psicrométrico, en la recta de unión de los dos puntos representativos de las masas mezcladas.

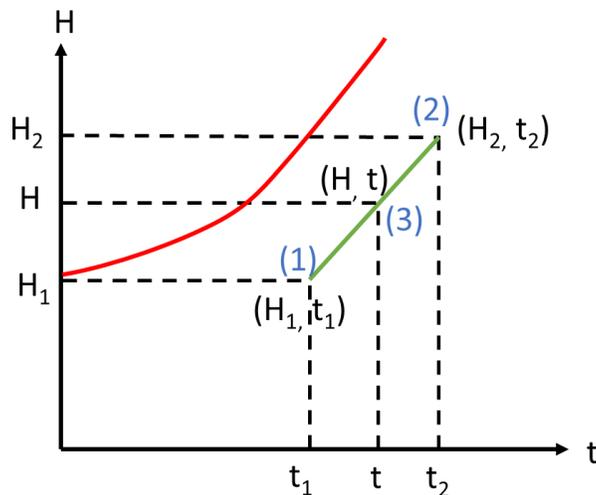


Figura 12. Representación de una mezcla de masas gaseosas húmedas.

En la Figura 12, el punto 1 representa la condición de una masa gaseosa y el punto 2 la de la otra masa gaseosa en contacto. Estos dos puntos se unen por medio de una línea recta. El punto 3 sobre la línea representa la condición final de la mezcla. La posición del punto 3, depende del porcentaje de cada masa gaseosa

presente en la mezcla. Mientras mayor sea 1, más cerca estará de 3 y de 2 si ocurre lo contrario.

La mezcla de masas gaseosas podría resultar interesante dependiente del punto de vista económico, ya que es posible mezclar el aire exterior con el aire de retorno. El aire resultante de esta mezcla tendrá una temperatura más baja que el aire exterior, economizando energía en la máquina de enfriamiento.

Existen casos en los cuales no se puede utilizar el aire de retorno, ya que siempre se requiere aire fresco. Este es el caso de algunas áreas de centro hospitalario.

3.3.2 Adición de un vapor en condiciones de saturación

En este proceso a una masa de gas húmedo G en las condiciones W_1, H_1, t_1 , se la adiciona una masa de vapor saturado G^* con una entalpía H_w . Al realizar un balance de materia y energía, se obtienen las expresiones finales siguientes:

$$H = H_1 + H_w * W - W_1 \quad (8)$$

En donde W y H son la humedad y entalpía respectivamente de la mezcla resultante.

Como en el caso anterior, este proceso se puede representar en un diagrama psicrométrico y las condiciones de la mezcla resultante sobre la recta de unión de los puntos representativos del vapor saturado y el gas húmedo [14].

3.3.3 Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa

La adición de un líquido provoca que en la masa gaseosa disminuya su temperatura, ya que el aire cede su calor sensible al líquido para provocar su

evaporación, por lo que se produce su enfriamiento. En el caso de la adición de vapor saturado existe un calentamiento de la masa gaseosa debido al calor sensible del vapor (Figura 13) [15].

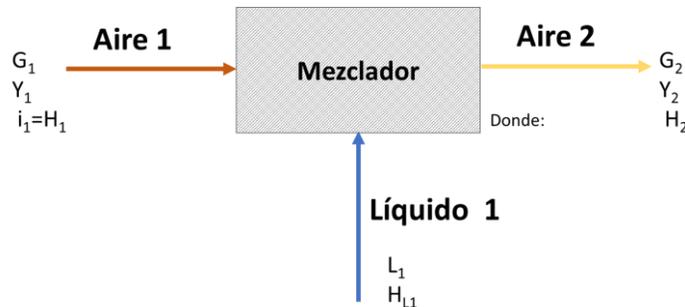


Figura 13. Esquema de cámara de enfriamiento de aire por intercambio de calor con líquido.

Es claro que el abatimiento de temperatura es mucho más rápido con el contacto con un líquido que con un vapor debido básicamente a la diferencia importante entre el calor latente de vaporización del líquido y el calor sensible.

En este caso, las relaciones para el cálculo de las condiciones finales son análogas a la del caso anterior, solo se sustituyen las condiciones del vapor saturado por las del líquido.

3.3.4 Adición de un líquido en cualquier condición, en donde sólo se evapora una parte

El proceso de adición del líquido puede variar en función de las condiciones del líquido. Se puede realizar a través de tres procesos de humidificación: condición de agua caliente, con adición de agua fría, y con adición de agua muy fría.

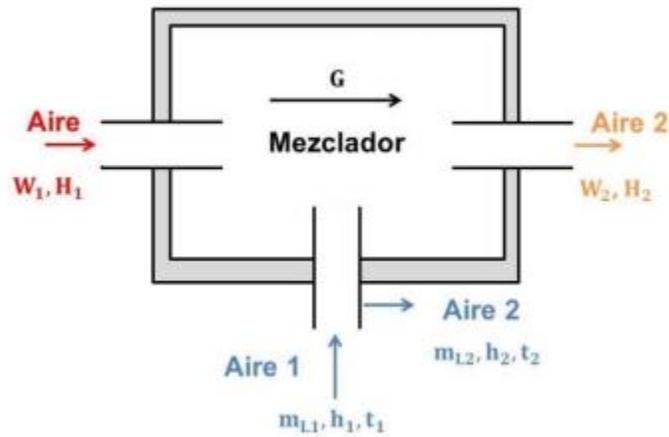


Figura 14. Cámara de mezcla de adición de líquido

3.3.5 Humidificación por contacto de una masa gaseosa con un sólido húmedo

Este es un proceso en donde el sólido transfiere humedad al aire, deshumidificando el sólido y humidificando el aire. En este proceso (Figura 15), el sólido se introduce en un secador a la temperatura T_{s1} , con una humedad W_{a1} , y se obtiene a una temperatura T_s con una humedad W_{a2} . Siendo X la cantidad de sólido que entra y sale del secador, si la masa de aire G que entra al secador con una temperatura T_1 con una humedad W_{s1} y sale con una humedad W_{s2} a una temperatura T_2 .



Figura 15. Humidificación entre sólido y gas.

3.4 Deshumidificación

La deshumidificación es el proceso de retirar el vapor de agua contenida en el aire a presión atmosférica. Existen diversos procesos psicrométricos que permiten remover la humedad del aire, los cuales se logran al modificar las condiciones termodinámicas del sistema [15].

3.4.1 Deshumidificación por enfriamiento

Este tipo de deshumidificación se logra mediante el enfriamiento del aire por debajo del punto de rocío, lo cual provoca la condensación de la humedad. Para este tipo de deshumidificación se emplean los deshumidificadores por condensación, sus elementos principales son: ventilador, compresor, intercambiador de calor (condensador y evaporador) y el elemento expensor. Para realizar este proceso, el evaporador, debe operar a una temperatura más baja que la que es requerida para extraer la carga de calor sensible de enfriamiento del espacio acondicionado mediante la circulación de un refrigerante a través de él, esto hace que el sistema tenga bajos coeficientes de operación (COP). Además, algunas veces es necesario recalentar el aire para evitar un excesivo enfriamiento sensible del espacio acondicionado.

En la Figura 16, se muestra un sistema deshumidificador por enfriamiento, por medio de un intercambiador de calor se extrae energía en forma de calor \dot{Q} provocando una temperatura baja en el interior del sistema, así cuando una se hace fluir aire húmedo \dot{m}_1 con una humedad inicial W_1 , el sistema se encarga de condensar el agua del aire de entrada \dot{m}_w , provocando un aire \dot{m}_2 con menos cantidad de humedad W_2 a la salida [16].

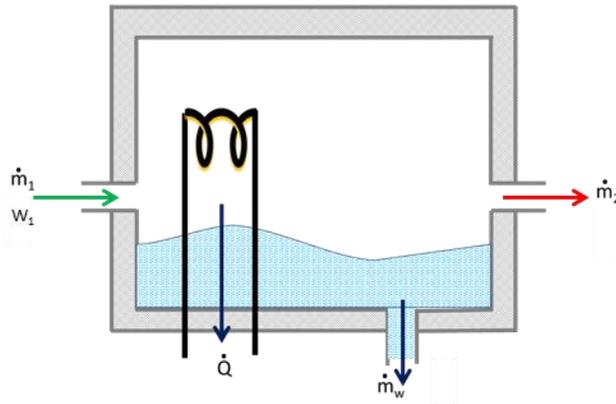


Figura 16. Proceso de deshumidificación por enfriamiento.

En la carta psicrométrica se representa este proceso en tres etapas (Figura 17):

- 1-2) Enfriamiento del aire húmedo: en este punto aprovechando la línea de temperatura de rocío correspondiente a la humedad absoluta del fluido de entrada (Figura 8), se disminuye la temperatura del mismo.
- 2-3) Condensación de la humedad: aquí aprovechando el cambio de entalpía específica de la mezcla causada por el cambio de fase de vapor a líquido del agua, es decir, pérdida del calor latente, el fluido se mueve del punto 2 al 3, lo cual a su vez refleja cambios en la temperatura de bulbo húmedo y disminución del volumen específico del aire (Figura 9).
- 3-4) Humidificación del aire seco: como último paso y aprovechando lo descrito en la Figura 3, se cambia la humedad relativa del aire hacia valores deseados.

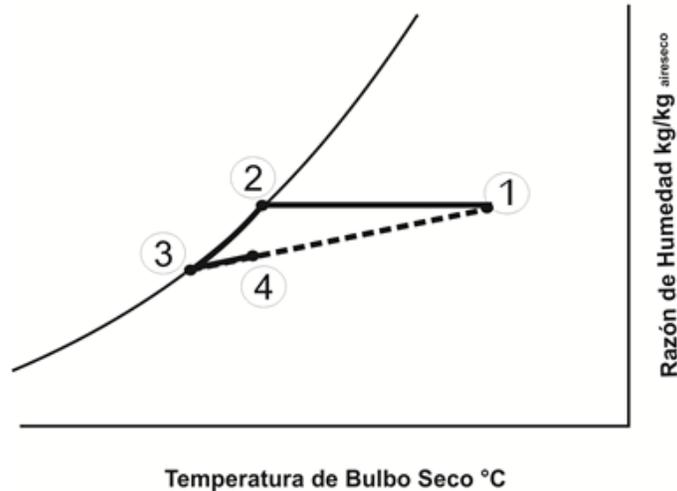


Figura 17. Representación gráfica del proceso de deshumidificación por enfriamiento

3.4.2 Deshumidificación por incremento de presión

En este proceso la deshumidificación ocurre cuando se comprime el aire atmosférico hasta lograr la condensación del vapor de agua contenido en él. Esto se debe a que a una mayor presión la temperatura de saturación es más alta por lo tanto si la temperatura no incrementa demasiado el vapor de agua contenido en el aire tenderá a condensarse [17].

3.4.3 Deshumidificación por desecantes

Este proceso utiliza materiales líquidos y sólidos, llamados desecantes que son capaces de extraer o liberar vapor de agua del aire, en cantidades relativamente grandes [18],[19]. En el caso de líquidos es el proceso conocido como absorción y en el caso de los sólidos se llama adsorción [20]. Cabe mencionar que también existe la absorción de vapores de agua con sólidos como la formación de hidratos con sales de alcalino y alcalino térreos, ejemplo $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [21].

Los desecantes sólidos en la mayoría de los casos son adsorbentes del tipo de la sílica-gel, carbón activado, zeolitas naturales y sintéticas [22], y en el caso de los

líquidos de glicoles o soluciones acuosas de cloruro de litio, cloruro de calcio, ácido sulfúrico, etc. [23].

3.5 Métodos de deshumidificación con desecantes

El proceso de deshumidificación con desecantes no es un proceso de enfriamiento propiamente dicho, se considera que éste es opuesto al de un enfriamiento evaporativo [19].

Existen tres métodos para deshumidificar el aire usando desecantes.

- a) El primero consiste en un proceso donde el aire se deshumidifica y enfría del estado 1 al estado 2 (Figura 18), mediante desecantes líquidos.

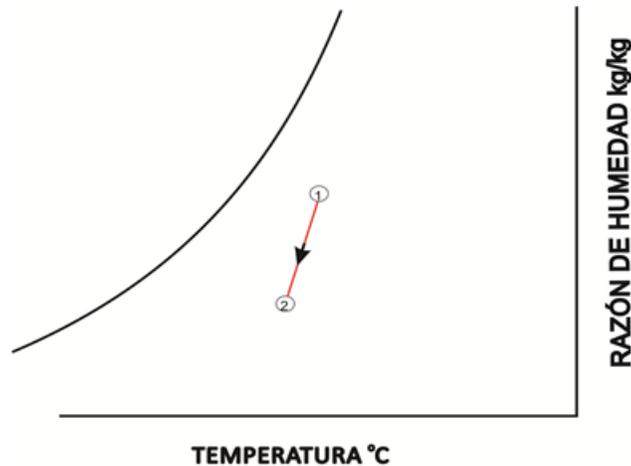


Figura 188. Esquema básico de deshumidificación por desecante líquido.

- b) Este método consiste en pre-enfriar el aire logrando una ligera deshumidificación del aire del estado 1 al estado 2 continuando con deshumidificación del estado 2 al estado 3 lo cual conlleva administrar energía a la masa de aire y por último un enfriar en el que se retira el calor sensible del estado 3 al estado 4 (Figura 19).

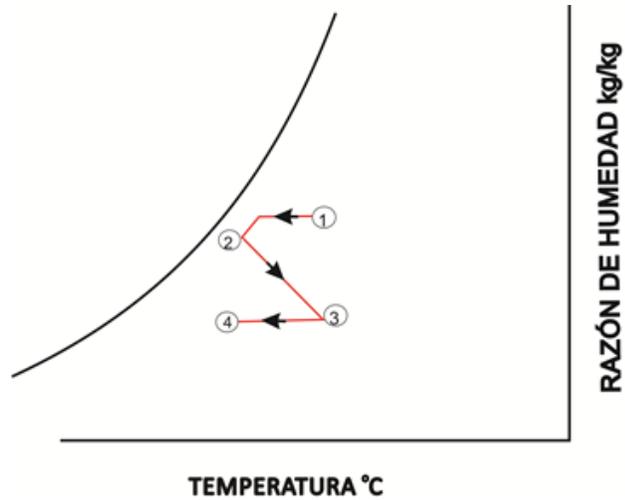


Figura 199. Esquema básico de deshumidificación por desecantes sólidos

- c) En el tercer método, el aire se deshumidifica mediante un aumento de temperatura del estado 1 al 2 y posteriormente se enfría del estado 2 al 3, este método también usa desecantes sólidos (Figura 20).

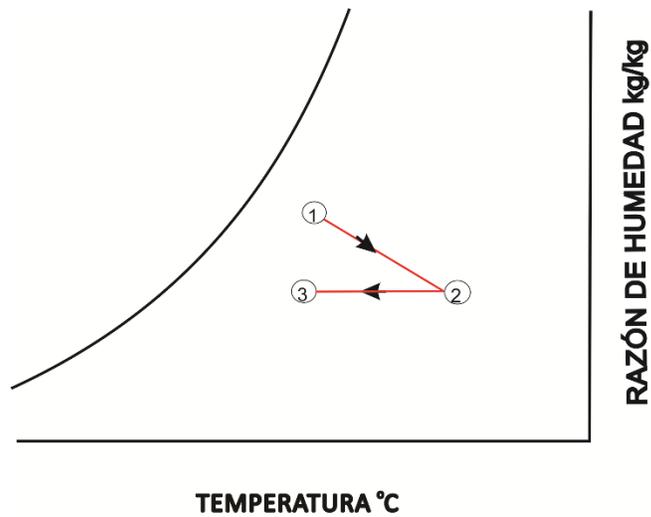


Figura 20. Esquema de deshumidificación por desecantes sólidos por cambio de estado físico.

3.5.1 Proceso de deshumidificación por desecantes.

El proceso de deshumidificación por desecantes funciona atrayendo la humedad del aire, generando un ambiente de baja presión en la superficie del desecante y una vez que la presión ejercida por el agua en el aire es mayor, las moléculas de agua se desplazan del aire al desecante y enseguida el aire es deshumidificado (Figura 21).

La principal característica de un desecante es estar seco y tener una baja presión en la superficie, logrando así la atracción de humedad del aire. Una vez que el desecante se convierte en húmedo y caliente, su presión de superficie es alta y llega a su punto de saturación, al llegar a ese punto se tiene que regenerar mediante cambios de presión para ser reutilizado.

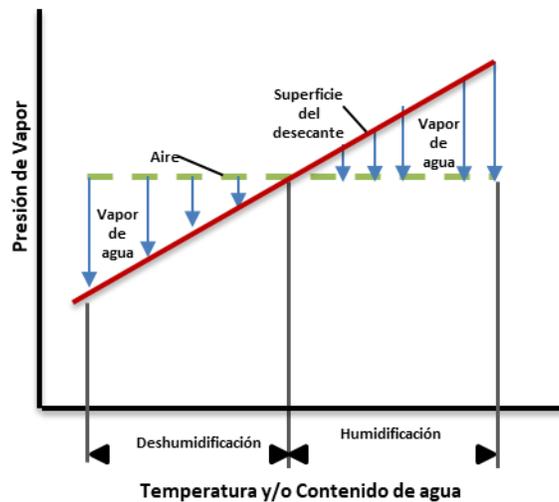


Figura 211. Diagrama de presión de vapor – temperatura y contenido de agua.

3.5.2 Desecantes sólidos

Los adsorbentes sólidos o desecantes sólidos, por su afinidad al vapor de agua, tienen una gran área de superficie por unidad de masa. Un simple gramo puede llegar a tener más de 4600 m² de área de superficie. Estructuralmente los adsorbentes tienen un parecido con una esponja rígida. Los adsorbentes atraen la

humedad debido al campo eléctrico en la superficie de él. Este campo, no es uniforme en su fuerza o carga, así atrae las moléculas de agua que tienen una carga neta opuesta sobre sitios específicos de la superficie del desecante [24],[25].

El comportamiento de la adsorción de los sólidos depende de los siguientes factores: el área total de su superficie, el volumen total de sus capilares y el rango en el diámetro de sus capilares. Ejemplos de desecantes sólidos son: el gel de sílice (silica gel), las zeolitas, las zeolitas sintéticas, la alúmina, el carbón activado y los polímeros sintéticos [26],[27].

3.5.3 Desecantes líquidos

Un desecante líquido o absorbente son sustancias higroscópicas que tienen como característica principal una baja presión de vapor. El proceso físico que permite la retención o liberación de la humedad es la diferencia en la presión de vapor entre la superficie de éste y la del aire. Los desecantes líquidos comúnmente usados son las soluciones acuosas de sales de: bromuro de litio, cloruro de litio, cloruro de calcio, mezclas de esas soluciones y trietilen glicol entre otras [28],[29].

El proceso básico de deshumidificación cuando se utiliza un líquido desecante se muestra en la Figura 22. En la trayectoria 1-2-3-4 se usa un desecante líquido para bajar la humedad de una corriente de aire, la cual es enfriada sensiblemente y adiabáticamente lográndose el acondicionamiento del aire. En la trayectoria 1-3-4 se usa un desecante en un proceso casi isotérmico y luego un enfriamiento adiabático [30].

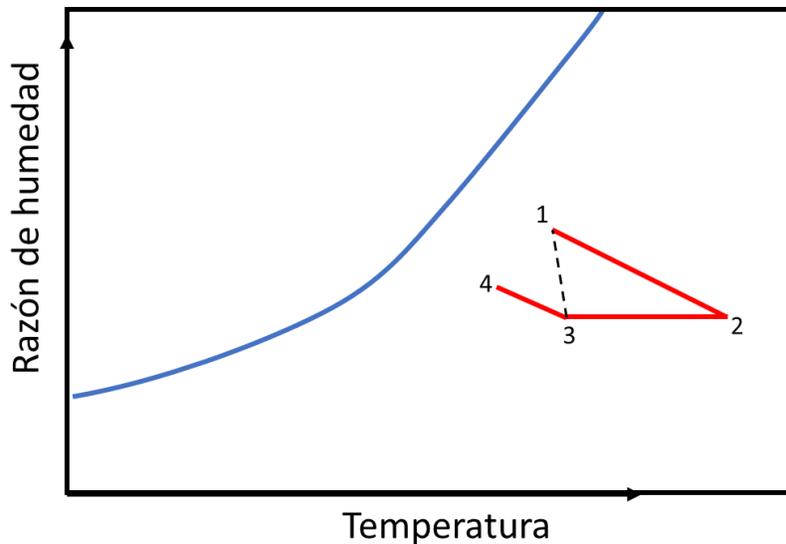


Figura 22. Procesos de un sistema de enfriamiento con desecantes líquidos

3.5.4 Sistemas con desecantes

Actualmente existen varios sistemas que operan con desecantes para procesos de deshumidificación de aire ambiental, ejemplo de ello son los sistemas con ruedas desecantes y los sistemas de acondicionamiento con desecante (DAC) por sus siglas en inglés. El DAC es una tecnología atractiva porque está libre de CFC / HCFC / HFC y puede ser regenerado por energía térmica de bajo grado. Además de del aire acondicionado convencional (AC), las aplicaciones potenciales del DAC son los procesos industriales, hospitales, museos, embarcaciones marinas, invernaderos, granos de secado, conservación y almacenamiento de productos, etc. A diferencia de los sistemas por compresión de vapor que en su mayoría utilizan refrigerantes perjudiciales para el medio ambiente y consume energía primaria de manera ineficiente [31],[32].

Debido a la forma en que operan los desecantes, en la mayoría de los sistemas el consumo de energía se basa principalmente en la regeneración

3.6 Regeneración de desecantes

La regeneración es el proceso en el cual se regresa el desecante a sus condiciones iniciales donde se busca eliminar la sustancia retenida mediante diversos procesos termodinámicos principalmente por la adición de temperatura. Debido a que la cantidad de energía necesaria para la regeneración de los desecantes (los sólidos, requieren una mayor temperatura a comparación de los líquidos) [33], actualmente existen diversos métodos para lograr este objetivo: el método de energía térmica, en el cual el calentamiento se logra con energía de combustibles fósiles, calentamiento por resistencia eléctrica [34],[35] o calentamiento con energías renovables como la solar, geotermia y biomasa [36]. Además, se incluyen los métodos de electrodiálisis y el de ósmosis inversa.

3.6.1 Regeneración por electrodiálisis

El método de electrodiálisis es una tecnología basada en el transporte de iones a través de las membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico. En el electrodiálizador, la membrana de intercambio catiónico y las membranas de intercambio aniónico se colocan alternativamente entre el cátodo y el ánodo. Los aniones y los cationes en las células del electrodiálizador se moverán al ánodo y al cátodo bajo un campo eléctrico. En el proceso de migración, los aniones y cationes pueden atravesar la membrana de intercambio aniónico y la membrana de intercambio catiónico, respectivamente. Sin embargo, los aniones y cationes no pueden atravesar la membrana de intercambio catiónico y la membrana de intercambio aniónico, respectivamente. Finalmente, la concentración de líquido desecante en algunas células del electrodiálizador aumentará, y las otras disminuirá (Figura 23) [36].

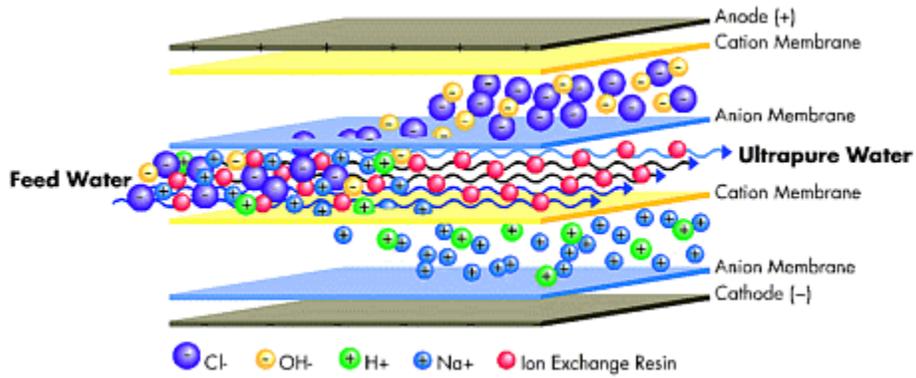


Figura 23. Proceso de electrodiálisis.

3.6.2 Regeneración solar

Este método consiste en aumentar la temperatura de la solución a regenerar mediante energía solar ya sea por métodos directos, donde la radiación incide directamente Figura 24, o por métodos indirectos donde el calentamiento se logra por un fluido de transferencia por medios convectivos o conductivos, con el fin de lograr evaporar el agua y aumentar la concentración de la solución logrando así una destilación solar [37].

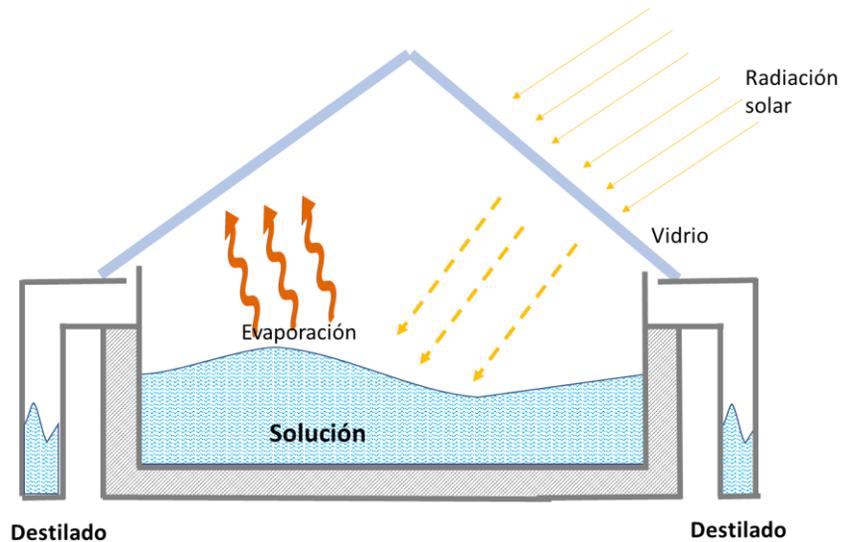


Figura 24. Esquema destilador solar directo.

La ventaja que presenta el método de regeneración solar con respecto a otros es el ahorro energético que presenta, y el bajo costo en mantenimiento que requieren la mayoría de los equipos de estas características [38].

3.7 Cloruro de Calcio como desecante

El Cloruro de Calcio es un compuesto químico, inorgánico y mineral de fórmula CaCl_2 . Se presenta en forma estable como cristales incoloros, es uno de los agentes más efectivos en control de polvo, lo que es sin duda una de las tareas principales en mantenimiento de caminos y es altamente higroscópico; a causa de esto es utilizado con mucha frecuencia para la deshumidificación del aire produciendo una reacción exotérmica.

El CaCl_2 en combinaciones con los alcoholes, amoníaco, aminas, algunos ésteres y derivados halogenados. Forma compuestos de adición con el vapor de agua lo cual ha sido aprovechado para generar compuestos que reduzcan la naturaleza corrosiva del CaCl_2 .

Presenta cualidades y características que al compararlo con otras sales inorgánicas de la misma naturaleza lo hacen una gran opción para sistemas de humidificación y deshumidificación como lo son su bajo costo, una menor capacidad corrosiva en metales, menores puntos de ebullición y una relación de entalpías de solvatación y energía de red cristalina.

4. JUSTIFICACIÓN HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.1 Justificación

Diversos procesos industriales utilizan la climatización del aire y del medio como control de condiciones en sus procesos, ahí la importancia de desarrollar una metodología eficiente y económica que reduzca la humedad del aire, principalmente en las regiones de alta humedad como la región del sureste y del golfo de México.

Los sistemas de acondicionamiento por desecante operan con energía que puede ser obtenido de varias fuentes, como se ha mencionado, entre ellas la energía solar, reduciendo así las emisiones de contaminantes a la atmósfera y el consumo eléctrico en comparación de los equipos de climatización convencionales.

La principal problemática de los sistemas de acondicionamiento de aire por desecantes es la regeneración del desecante utilizado, ya que por lo general recurren a medios de calentamiento convencionales como energía eléctrica y energía proveniente de la quema de combustibles fósiles.

En este trabajo se plantea la construcción de equipos de regeneración de sales inorgánicas que operan con energía solar y la posibilidad de regenerar soluciones de la sal líquida (CaCl_2), la cual es utilizada agente absorbedor de humedad en un sistema de deshumidificación de aire, la regeneración se realizará en dos sistemas regeneradores/colectores, uno con configuración escalonada y un segundo con una configuración tipo rampa, los cuales serán ubicados en el techo del edificio 6, perteneciente a la Unidad Académica de Ciencias Químicas, campus siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas en la ciudad de Zacatecas, Zac, y aprovechar la energía solar para la operación de estos equipos.

4.2 Hipótesis

Las soluciones acuosas de cloruro de calcio son eficientes absorbedores de la humedad ambiental, las cuales se pueden regenerar por medio de la desorción térmica del vapor de agua. La utilización de la energía termo solar permitirá obtener temperaturas mayores a los 50 °C y realizar la regeneración del absorbente líquido con un substancial ahorro energético y un mínimo de impacto ambiental, obteniéndose concentraciones superiores al 20 %, para su reutilización e integración en diferentes procesos termodinámicos y con ello contribuir a mitigar el efecto de una excesiva humedad ambiental.

4.3 Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar dos sistemas de regeneración de soluciones acuosas de cloruro de calcio, operados con energía solar.

4.4 Objetivos específicos

- Diseñar y construir dos equipos para la regeneración térmica de soluciones acuosas de cloruro de calcio uno con geometría escalonada y Otros con un plano inclinado.
- Diseñar, construir y evaluar un sistema de monitoreo de variables ambientales (Temperatura y humedad relativa) para la evaluación de los equipos de regeneración.
- Regenerar soluciones de CaCl_2 hasta conseguir concentraciones superiores al 20% en peso comparando los equipos con respecto a las siguientes variables:
 - Tipo de calentamiento de sistema (energía solar)
 - Eficiencia en función del tipo de configuración de los equipos.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen las consideraciones para el diseño de los equipos regeneradores, las partes que constituyen los equipos y los equipos de laboratorio utilizados, también se describen los sistemas de monitoreo que se incorporaron para la obtención de datos en las pruebas y la metodología experimental utilizada en este trabajo.

5.1 Sistemas de regeneración propuestos

Los sistemas de regeneración propuestos están diseñados para la regeneración de las sales líquidas utilizadas en los procesos de deshumidificación, para ello se diseñaron equipos que circulen líquidos por acción de la gravedad y que aprovechando la energía solar disponible logren el objetivo de concentrar las soluciones salinas mediante la eliminación del agua contenida con el fin de disminuir el impacto energético y ambiental negativo que implica la renovación de estas.

5.1.1 Consideraciones de diseño

La metodología actual de diseño en cuanto a dimensiones espaciales de los equipos se logró plantear en función a revisión bibliográfica, además, se tomó en cuenta parámetros como condiciones ambientales y propiedades de las sustancias químicas involucradas como corrosividad, densidad y solubilidad.

Para los parámetros climáticos del lugar de instalación se recurrió a la base de datos climatológica registrada por la UNAM como: "Base de Datos son Información Meteorológica (Irradiación, Temperatura Ambiente, Humedad Relativa y Velocidad de Viento) para todas las poblaciones de México de más de 10,000 habitantes

registradas en 2011”, con número de registro 03-2012-112811530700-01. Obtenidas con el proyecto FORDECYT 190603. Y a la Estación Solarimétrica Zacatecas_04 del Sistema Nacional de Solarimetría ubicada en el edificio E6 del campus Siglo XXI en la Universidad Autónoma de Zacatecas (Latitud: 22.77 ° N, Longitud: 102.64 ° W, Altura: 2,440 msnm) Figura 25, de las cuales se obtuvieron y se procesaron los datos históricos registrados en esta zona los cuales se reportan de la Tabla 2. Y con base a los cuales se optó por realizar experimentación en el tercer trimestre del año ya que históricamente es donde se registran las condiciones más idóneas la operación de nuestros sistemas de regeneración.



Figura 255 Estación Solarimétrica Zacatecas_04 del Sistema Nacional de Solarimetría.

Tabla 2. Datos climatológicos históricos promediados de Zacatecas

Mes	Ta (°C)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	H _R (%)	V _{aire} (m/s)	Radiación (MJ/m ² día)
Enero	11.10	4.80	17.30	52.90	4.33	15.35
Febrero	12.20	5.50	19.00	45.50	4.36	18.46
Marzo	14.60	7.50	21.70	33.80	4.51	21.52
Abril	16.80	9.70	23.80	32.60	4.16	22.57
Mayo	19.10	12.00	26.20	38.10	3.44	24.03
Junio	19.00	12.50	25.40	62.30	2.78	22.30
Julio	17.20	11.50	23.00	71.60	2.77	21.52
Agosto	17.20	11.50	23.00	69.70	2.54	21.16
Septiembre	16.80	11.20	22.30	72.80	3.12	18.23
Octubre	15.70	9.60	21.80	69.00	3.42	16.84
Noviembre	13.90	7.40	20.40	63.40	3.86	16.93
Diciembre	11.90	5.80	18.10	56.50	4.08	14.16

5.1.2 Propiedades físicas y fisicoquímica del sistema CaCl₂

Se analizaron las propiedades físicas y químicas del reactivo Cloruro de Calcio, tales como: solubilidad (θ), presión de vapor (P_v), Calor específico (C_p), densidad relativa, Entalpía de dilución, entre otras.

Solubilidad

La Solubilidad es un parámetro importante para determinar los rangos de operación del proceso de regeneración de la sal. A partir de la ecuación 9 y considerando los parámetros de la Tabla 3, se obtienen los límites de solubilidad

al relacionar temperatura y la concentración de la solución salina de la Figura 26, en ella se muestra la temperatura mínima a la cual debe encontrarse el sistema para evitar la impregnación de la sal en el sistema por cristalización de esta. Los parámetros de solubilidad corresponden al límite que define las condiciones en las que los hidratos de CaCl_2 anhidra cristalizan a partir de la solución. Es decir, la línea denota dos zonas: la superior, donde coexisten el H_2O y CaCl_2 en forma de solución líquida y la inferior donde los compuestos forman cristales hidratados estables sólidos y densos.

$$\theta = \sum_{i=0}^2 A_i x_i \quad (9)$$

Tabla 3. Coeficientes de solvatación del CaCl_2 .

PARÁMETROS	Hielo	$\text{CaCl}_2\text{-6H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2\text{-4H}_2\text{O } \alpha$	$\text{CaCl}_2\text{-4H}_2\text{O } \beta$	$\text{CaCl}_2\text{-2H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$
A_0	0.422088	-0.37895	-0.51997	-1.149044	-2.385836	-2.80756
A_1	-0.066933	3.4569	3.40097	5.509111	8.084829	4.67825
A_2	-0.282395	-3.53131	-2.85129	-4.642544	-5.303476	0
A_3	-355.514247	0	0	0	0	0

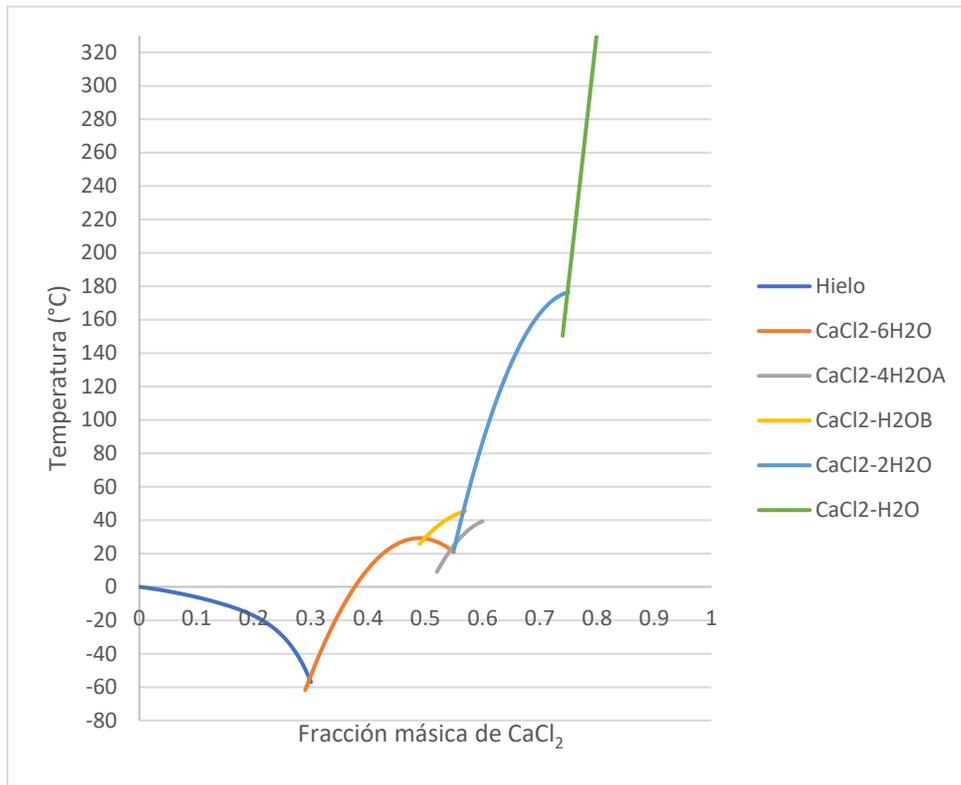


Figura 26. Curva de solubilidad del CaCl_2 .

Presión de vapor. Debido a que la presión de vapor parcial del agua de la solución desecante determina la relación de humedad del aire que está en equilibrio con el desecante en la interfaz, es decir, determinará la cantidad de vapor de agua retenida por el desecante en equilibrio con el aire húmedo, es necesaria una expresión que relacione la presión de vapor parcial del agua de la solución desecante con la temperatura y la concentración de desecante. Lo cual se obtuvo mediante las ecuaciones 10-14 que consideran los parámetros de mezcla de la Tabla 4 y que nos dan un gráfico de la presión de vapor a diferentes concentraciones de la sal y a diferentes temperaturas Figura 27.

$$P_v = P_{25} * f(x_i, \theta) \quad (10)$$

$$f(x_i, \theta) = A + B\theta \quad (11)$$

$$A = 2 - \left[1 + \left(\frac{x_i}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (12)$$

$$B = -1 + \left[1 + \left(\frac{x_i}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} \quad (13)$$

$$P_{25} = 1 - \left[1 + \left(\frac{x_i}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(x_i-0.1)^2}{0.005}} \quad 4)$$

Tabla 4. Coeficientes para el cálculo de presión de vapor del CaCl₂-H₂O

CaCl ₂ -H ₂ O	
π_0	0.31
π_1	3.698
π_2	0.6
π_3	0.231
π_4	4.584
π_5	0.49
π_6	0.478
π_7	-5.2
π_8	-0.4
π_9	0.018

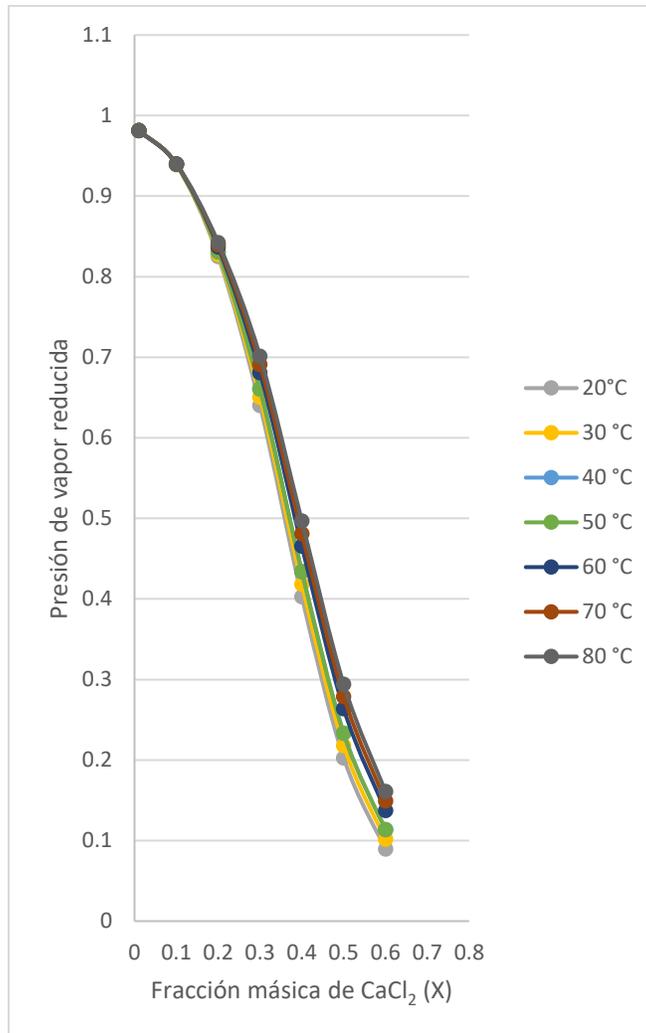


Figura 27. Presión de vapor de la solución de CaCl₂-H₂O

El calor requerido para la evaporación se calcula de acuerdo con la temperatura promedio y la concentración promedio de la solución, donde la presión de vapor en la superficie se puede calcular en función de la temperatura de la solución dentro del rango de temperatura de 10 ° C a 65 ° C y el rango de concentración de 20% a 50% [39] de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\ln(P_v) = A(x) - \frac{B(x)}{T - 111.96} \quad (15)$$

$$A(x) = A_0 + A_1 x_i \quad (16)$$

$$B(x) = B_0 + B_1 x_i \quad (17)$$

Donde las ecuaciones 16 y 17 involucran parámetros de mezcla presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de mezcla para la presión de vapor del CaCl₂.

A0	10.624
A1	4.4674
B0	739.828
B1	1450.96

Durante el proceso de regeneración de la sal es conveniente aumentar la temperatura del sistema y para la obtención de la presión de vapor de la solución se utiliza la ecuación 18:

$$\ln(P_v) = C - \frac{D}{T + 273.15} \quad (18)$$

Donde los valores de C y D son se obtienen de la literatura [40] y son reportados en la Tabla 6 a diferentes concentraciones de la solución.

Tabla 6. Coeficientes para la ecuación de presión de vapor.

Concentración de la sal	C	D
0.2	19.94818	5053.95
0.25	20.3898	5244.51
0.3	19.9915	5133.02
0.35	20.1957	5244.15
0.4	20.4864	5411.75
0.45	19.591	5168.25
0.5	20.8764	5708.42

A partir de estos datos se construye un gráfico que nos muestra la presión de vapor de la solución acuosa de CaCl₂ a diferentes temperaturas que aplican para deshumidificación y la regeneración (Figura 28).

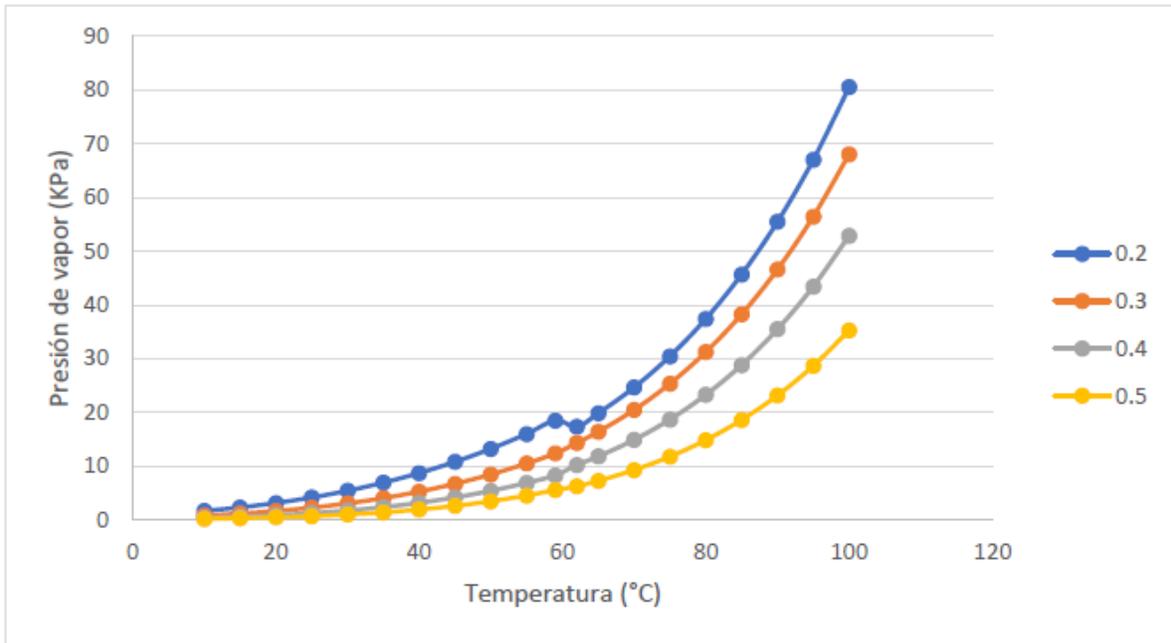


Figura 28. Curvas de presión de vapor de CaCl_2 como función de la temperatura a diferentes concentraciones.

Y que con ayuda de la ecuación 15, que muestra el equivalente de Kg de agua /Kg de aire seco según las definiciones de humedad absoluta [41], se construye el gráfico de la Figura 29.

$$W_v(T) = 0.662 \frac{P_v(T)}{P_{atm} - P_v(T)} \quad (19)$$

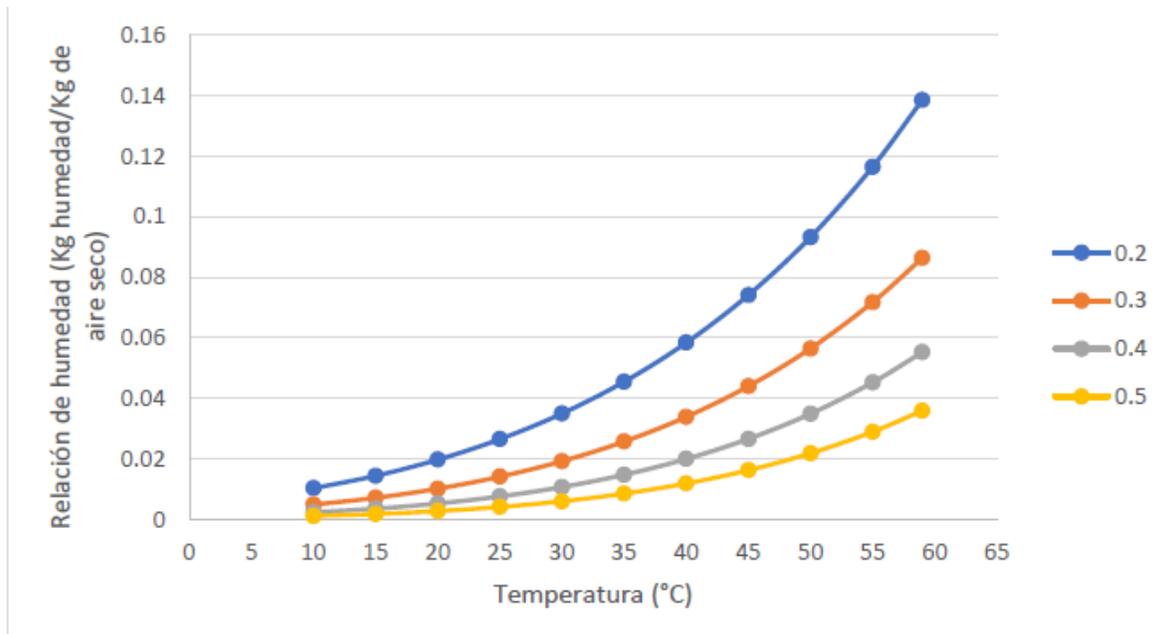


Figura 29. Relación de humedad en soluciones de CaCl_2 .

Dicha figura nos muestra una vía para lograr la deshumidificación y regeneración de la sal, es decir, si se busca pasar de una línea de isoconcentración menor a una mayor (proceso de regeneración de la sal) indica el incremento de temperatura que debe considerarse y la relación de kg de humedad/kg de aire seco que debe estar presente en nuestro medio ambiente para que la evaporación del agua en la solución salina se lleve a cabo.

Como consecuencia esto es necesaria la incorporación de una función que relacione la entalpía de mezcla con la concentración y la temperatura. Para ello se obtiene primero la entalpía de la solución como función de la temperatura y la composición de acuerdo con las ecuaciones 20 y 21, y cuyo comportamiento se observa en la Figura 30 [42]. Esto nos servirá para estimar de manera teórica la energía necesaria para realizar la destilación del $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ mediante la eliminación del agua.

$$\Delta h_d = \Delta h_{d,0} \left[1 + \left(\frac{x_i}{H_4 - x_i} \right)^{H_2} \right]^{H_3} \quad (20)$$

$$\Delta h_{d,0} = H_5 + H_6 \left(\frac{T}{228} \right) \quad (21)$$

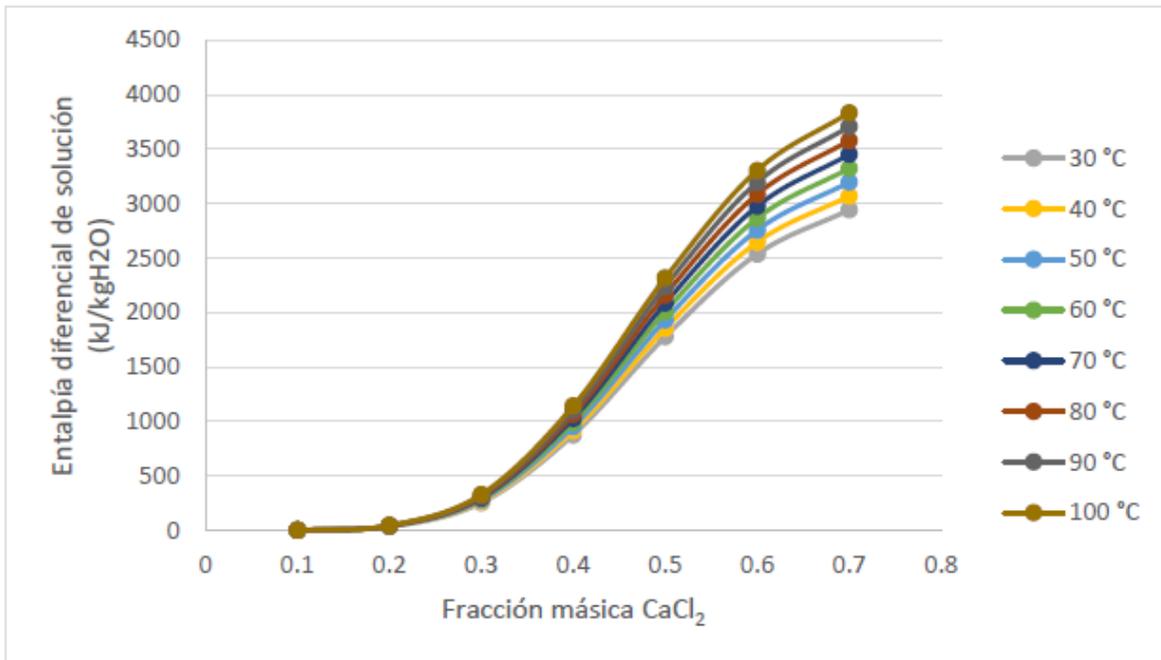


Figura 30. Cambio de la entalpía de la solución de CaCl₂-H₂O.

Y se sustituye en la ecuación 22, expresada como:

$$\Delta h_{abs} = h_{vaporH_2O}(p, T_s) - h_s(T_s, X) \quad (22)$$

Otra variable importante en el diseño del equipo es la densidad relativa de la solución y su variación a lo largo del proceso de regeneración ya que nos determinará las capacidades y especificaciones de la bomba de recirculación, además, además, que será la variable con la cual se medirá la regeneración de la

sal. Para obtener información sobre la densidad relativa de la solución se utilizaron las ecuaciones 23 y 24, mediante los parámetros de la Tabla 7, de lo cual se obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 31.

$$\rho_{sol}(x_i, T) = \rho_{H_2O}(x_i, T) \sum_{i=0}^3 \rho_i \left(\frac{x_i}{1-x_i} \right) \quad (23)$$

$$\rho_{H_2O}(\tau) = \rho_{c, H_2O} \left(1 + B_0 \tau^{1/3} + B_1 \tau^{2/3} + B_2 \tau^{5/3} + B_3 \tau^{16/3} + B_4 \tau^{43/3} + B_5 \tau^{110/3} \right) \quad (24)$$

Tabla 7. Coeficientes para la ecuación de densidad relativa

Bo	1.99377184
B1	1.09852116
B2	-0.5094493
B3	-1.76191242
B4	-44.900548
B5	-723692.262

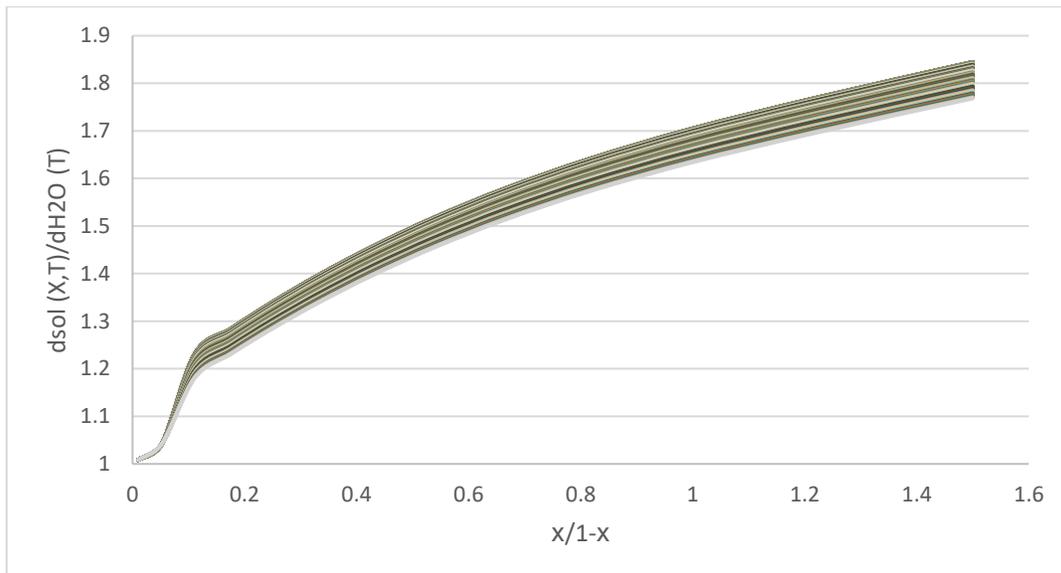


Figura 31. Densidad relativa de soluciones acuosas de CaCl_2

5.2 Materiales

En base a las propiedades fisicoquímicas de la solución, se optó para utilización de cloruro de calcio granulado grado industrial Figura 32 y agua destilada para la preparación de las soluciones.



Figura 32. Cloruro de calcio granular.

Además, a partir de las condiciones climáticas e idea de operación de los equipos se diseñaron y construyeron equipos y sistemas resistentes a la corrosión debida al cloruro de calcio.

A continuación, se describe la composición y características de los equipos realizados.

5.2.1 Diseño y descripción de las características de los sistemas de regeneración.

Los equipos están constituidos de bases metálicas Figura 33, con perfiles rectangulares de tipo PTR de una pulgada y armadas con soldadura, para obtener las dimensiones de 1 m de largo por .50 m de largo. Se acondicionaron a ellas cuatro patas de tubo de acero de acero galvanizado de una pulgada de diámetro, dos de ellas de .50 m de altura y otras dos de .97 m. Figura 34.



Figura 33. Soporte de equipo de deshumidificación.

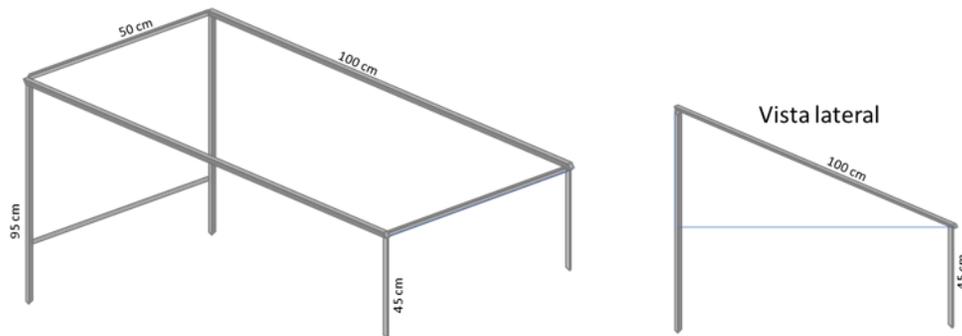


Figura 34. Base de regenerador.

En la parte inferior de las patas se colocaron tornillos de 5 pulgadas de longitud y una pulgada de diámetro los cuales funcionan como un sistema nivelador y ayuda a modificar la inclinación de los equipos desde 18° hasta 21° con respecto a la horizontal (Figura 35). En total se construyeron dos de estas estructuras.



Figura 35. Reguladores de nivel de equipos regeneradores.

Sobre una de las bases se colocó una placa metálica de acero inoxidable con dimensiones de .50 m de ancho por 1 metro de largo, y a la cuales se les incorporaron mediante dobleces y soldadura una lámina como rebosadero y un recipiente como desagüe (1 y 2 respectivamente de la Figura 36).

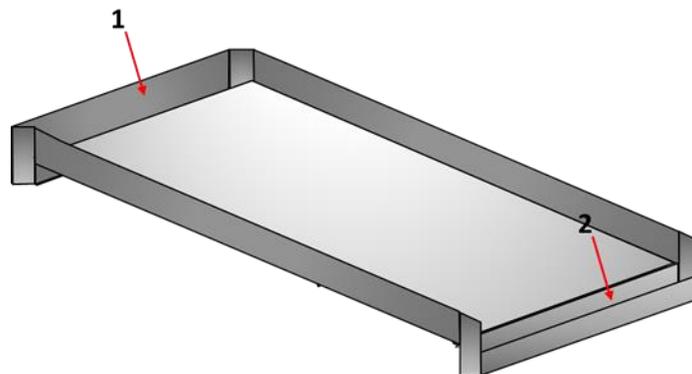


Figura 36. Placa estilo rampa de regenerador.

Adicionalmente se construyó una segunda placa en forma escalonada conformada de 12 peldaños los cuales miden 5 cm de largo por 2.6 cm de altura con los mismos contenedores a los extremos que los anteriores (Figura 36), para la construcción de los dos equipos anteriores se utilizó acero inoxidable austenítico tipo 304 de 2 mm de espesor.

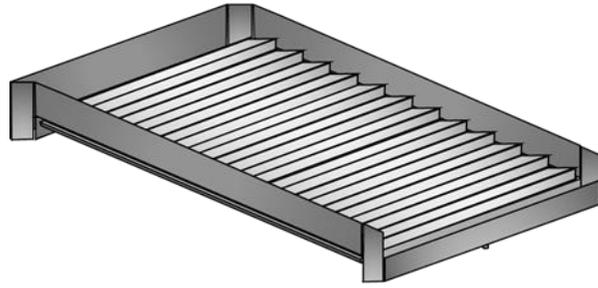


Figura 37. Placa escalonada de regenerador.

Dichas estructuras fueron recubiertas con pintura de esmalte negro mate resistente a la temperatura para aumentar la captación de energía por absorción de acuerdo a la literatura Figura 38a, sobre cada una de las placas se colocó una cubierta transparente de vidrio 5 mm de grosor Figura 38b.



Figura 38. Estructuras de equipo de regeneración: a) cubierta de pintura de esmalte, b) cubierta de vidrio.

A los equipos se les incorporaron contenedores de plástico de polietileno de 25 litros los cuales servirán para almacenar las soluciones acuosas y regeneradas al principio y final del proceso (Figura 39).



Figura 39. Contenedores poliestireno de 25 litros.

También se incorporaron para cada uno de los regeneradores una bomba de recirculación de tipo diafragma (modelo: FL-3202, marca: PROPUMEs) que opera con un flujo volumétrico máximo de 8 Litros por minuto (Figura 40).



Figura 40. Bomba para flujos bajos.

Además, fueron utilizados varios accesorios de PVC, acero galvanizado, cables eléctricos, etc., los cuales se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Lista de materiales para elaboración de los regeneradores.

Material	Medida	Cantidad
Manguera transparente	3/4 pulgada	2 metros
	1/2 pulgada	1 metro
Bridas PVC	1/2 pulgada	6 piezas
Abrazadera sinfín de acero	1/2 pulgada	6 piezas
Conexión para manguera de plástico	1/2 pulgada	6 piezas
Cable eléctrico	calibre 12	5 metros
Tapón macho de galvanizado	1/2 pulgada	3
Clavija	--	3
Válvula para control de flujo de plástico	--	2
Cinta teflón	--	1
Placa de plafón	1m x.54m	1
Resistencia eléctrica	Calibre 20	1 metro

5.2.2 Instrumentación para el monitoreo de los equipos regeneradores

Con el fin de medir, controlar y registrar las variables de operación del sistema experimental se colocaron sensores para la medición de temperatura, flujo de la solución, velocidad y humedad relativa del aire.

Para ello se adquirieron, calibraron, programaron e incorporaron al sistema de adquisición de datos:

Sensores de temperatura. Para la medición de la temperatura se utilizaron sensores del tipo DS18B20. Este es un sensor digital de temperatura que utiliza el

protocolo 1-Wire para comunicarse en placas y módulos microcontroladores y tarjetas con microprocesadores. Con este sensor es posible medir temperatura desde los -55°C hasta los 125°C y con una resolución programable desde 9 bits hasta 12 bits. El sensor está encapsulado en un tubo de acero inoxidable resistente al agua (Figura 41).



Figura 41. Sensor de temperatura DS18B20

Sensor de humedad. La medición de la humedad también es un parámetro importante para evaluar el desempeño de los regeneradores ya que miden la diferencia en la humedad relativa entre la entrada (humedad ambiental) y el entrono dentro del sistema regenerador. Para esto último y para determinar la temperatura de la placa se instaló un sensor DHT22 (Figura 42) adherido en el interior de cada sistema regenerador. Este sensor tiene un rango de operación de medición de temperatura es de -40°C a 80°C y rango de humedad de 0 a 100%, con tiempos de lectura mínima de 2 segundos entre medición.

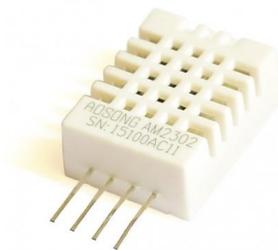


Figura 42. Sensor de temperatura y humedad relativa modelo DTH22.

Sensor de flujo. Para la medición del flujo volumétrico de la solución. Para ello se utilizaron sensores de flujo Yf-s201 (Figura 43).



Figura 43. Sensor de flujo de efecto hall.

5.2.3 Instrumentación de condiciones ambientales.

Además de los instrumentos mencionados se contó con el apoyo de la estación solarimétrica Zacatecas_04, de la cual se obtuvieron datos de temperatura ambiental, radiación solar y velocidad de viento, utilizando los siguientes equipos.

Sensor de radiación solar. Se usó un piranómetro espectral de precisión marca Eppley (PSP) (Figura 44). Del cual se obtuvo la radiación global para el cálculo de la energía incidente sobre los equipos.



Figura 44. Piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP)

Sensor de temperatura y humedad del aire. Para determinar estas variables se utilizó un sensor HC2S3, el cual es una sonda de temperatura. La sonda utiliza un sensor capacitivo avanzado para medir la humedad relativa (Figura 45).



Figura 45. Sensor de temperatura y humedad relativa modelo HC2S3.

5.2.4 Adquisición y manejo de datos

Para la recopilación de los datos durante el proceso de regeneración se optó por realizar mediciones de las condiciones con dispositivos de monitoreo y adquisición de información al interior de los equipos regeneradores y de las condiciones ambientales.

Interior del equipo. Para la obtención de datos del flujo del líquido, temperatura y humedad en los equipos fue realizada por medio de una placa Arduino uno (Figura 46), esta es una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables Dupont) al fueron conectados los sensores Yf-s201, DHT22 y DS18B20, mediante cable eléctrico calibre 9 y unidos con soldadura 60/40 de estaño-plomo como se muestra en la Figura 47.

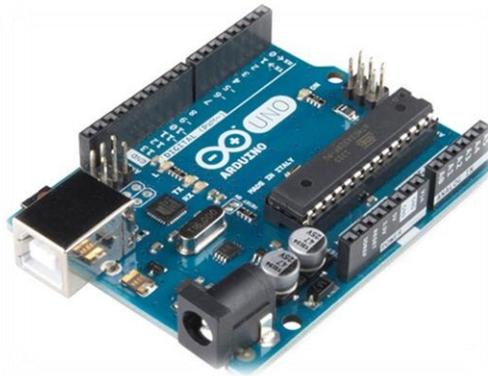


Figura 46. Placa Arduino uno.

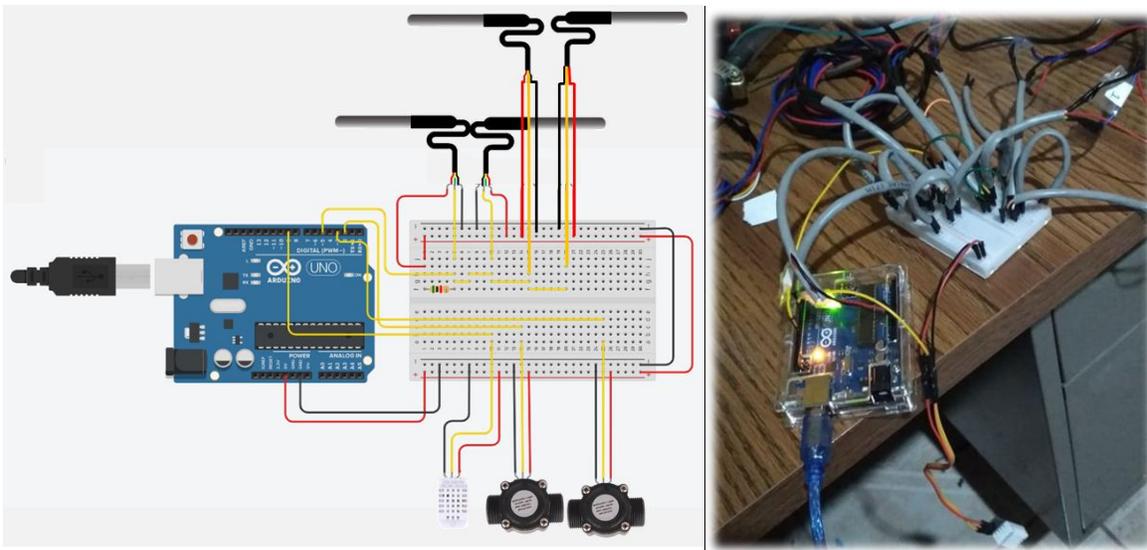


Figura 47. Diagrama de conexión de sensores a Arduino uno.

Para ello se realizó la programación con la cual operan los dispositivos en el software libre ARDUINO. La cual se muestra en el apéndice A.

Respecto a los sensores DS18B20 fueron conectados en serie, esto para optimizar en uso de los espacios disponibles en la placa, de este modo solo se utilizó el pin 5 de la placa Arduino, lo cual fue posible al utilizar la librería “DallasTemperature.h”. Los sensores al no contar con un número de serie tuvieron que ser conectados a un pin individual cada uno, ocupando los pines 2 y 3. El sensor de humedad DHT22 fue conectado al pin 9 de la placa. Así la recopilación

de los datos se realizó conectado la placa mediante una computadora mediante un cable USB tipo A-B.

Planta solarimétrica. Para la recopilación de los datos proporcionados por la planta se utilizó un adquisidor de datos CR3000, el cual funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas para que una computadora que los interpreta mediante el programa Logger net versión 4.5. Los tres componentes principales son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y una interfaz de comunicación entre el dispositivo (ADC) y la computadora, regularmente es a través de una ranura o puerto, el equipo se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Adquisidor de datos CR3000.

5.3 Metodología experimental

En este apartado se aborda de manera específica la calibración de los sensores y equipos de monitoreo, se detalla el montaje de los equipos regeneradores, la técnica con la cual se determinó la evaporación de agua de las soluciones además se describe la metodología del estudio experimental, la cual consta de tres etapas:

- i) Preparación de soluciones diluidas y evaluación de las propiedades al inicio (temperatura, densidad relativa y volumen de la solución).
- ii) Regeneración de las soluciones y monitoreo de condiciones ambientales y parámetros termodinámicos (temperatura, humedad relativa en el aire, radiación solar y flujo volumétrico)
- iii) Evaluación de propiedades finales (temperatura, densidad relativa y volumen de solución)

5.3.1 Calibración de equipos

Antes de realizar las pruebas de regeneración de sal sales, fueron calibrados los sensores de flujo y de temperatura.

Los sensores de temperatura DS18B20 fueron identificados como sensor 0, 1, 2 y 3 y fueron comparados con 4 termómetros, para ello se realizó una prueba donde fueron llenados cinco vasos precipitados con soluciones acuosas de CaCl_2 a diferentes temperaturas cubriendo un rango de 0 a 100 °C, posterior a esto se colocó un termómetro y un sensor de temperatura en cada vaso de modo que tomaran mediciones simultáneamente. Se obtuvieron las ecuaciones de corrección para cada sensor los cuales se muestran en la Figura 49.

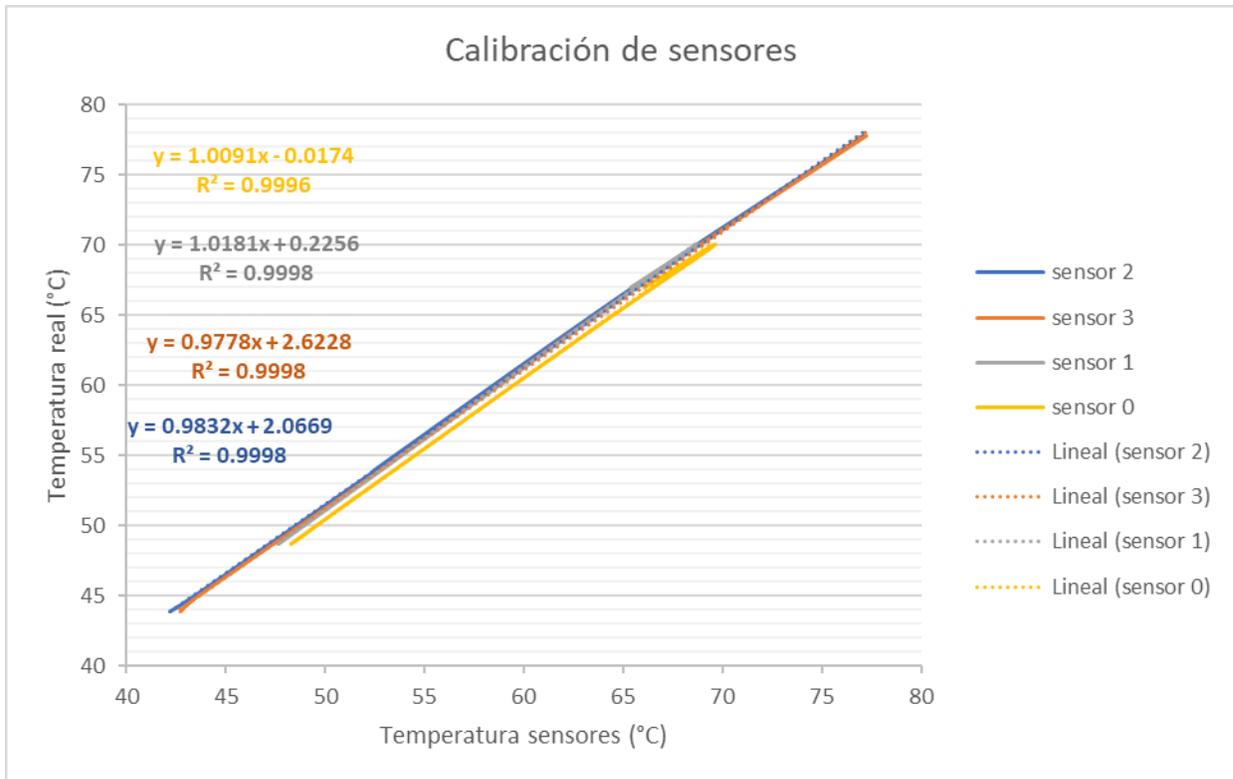


Figura 49. Curvas de medición de temperatura y ecuaciones de calibración de sensores DS18B20.

Para los sensores de flujo se tomaron diferentes volúmenes de agua (de 1 hasta 10 litros) y se hicieron pasar por los sensores en mediante una tubería vertical, durante lo cual se registraron el total de pulsos emitidos por los sensores mediante el programa en Arduino mostrado en el apéndice B.

De los cuales se obtuvo un factor de corrección mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\text{Número de pulsos}}{(\text{Volumen})(60)} \quad (25)$$

De ello se obtuvieron los factores de corrección para los sensores de la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de factores de corrección obtenidos para sensores de flujo.

K	
Sensor 4	6.67
Sensor 5	6.65

5.3.2 Metodología de la regeneración ($\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Como primer paso se preparan las soluciones de cloruro de calcio, para ello en este trabajo se utilizó cloruro de calcio granular grado industrial (Pureza 97%), el CaCl_2 fue sometido a un proceso previo de secado en una estufa de calentamiento convectivo (marca: Novatech, modelo: E160) por 12 hrs a $65\text{ }^\circ\text{C}$ para retirar la humedad ambiental absorbida por el CaCl_2 (Figura 50).



Figura 50. Estufa de calentamiento convectivo.

Después, se pesó y se midió un volumen de CaCl_2 y H_2O separados y se vierten en bidones de 25 litros hasta conseguir una concentración de aproximadamente 20 %. Una vez realizadas las mezclas $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, las soluciones se dejaron reposar para disipar la energía adquirida en la hidratación de las sales hasta alcanzar una temperatura entre $25\text{ }^\circ\text{C}$ o la ambiental. A continuación, se les determina la densidad relativa con ayuda de un Densímetro de rango de 1 a 2 g/cm^3 .

Posteriormente los bidones con las soluciones se acoplaron a los equipos de regeneración, en el lugar donde se realizó la experimentación, es decir, en la terraza del edificio E6 perteneciente a la Unidad Académica de Ciencias Químicas

de la Universidad Autónoma de Zacatecas, ubicado en Zacatecas, Zac. (Figura 51).



Figura 51. Instalación de los equipos de regeneración de CaCl_2 acuoso.

El ensayo experimental consiste en hacer pasar ciertos flujos de las soluciones diluidas a través de los equipos de regeneración simultáneamente con el fin de poder realizar un análisis comparativo en un proceso continuo (Figura 52). Una vez que la totalidad de la solución (25 litros para cada equipo) ha pasado por los equipos estas son recirculadas a los equipos utilizando pequeñas bombas de diafragma, durante este proceso los sistemas de monitoreo (placa Arduino y adquisidor C3000) recopilan datos debidos a los cambios de temperatura, humedad, velocidad de viento para su futuro análisis.

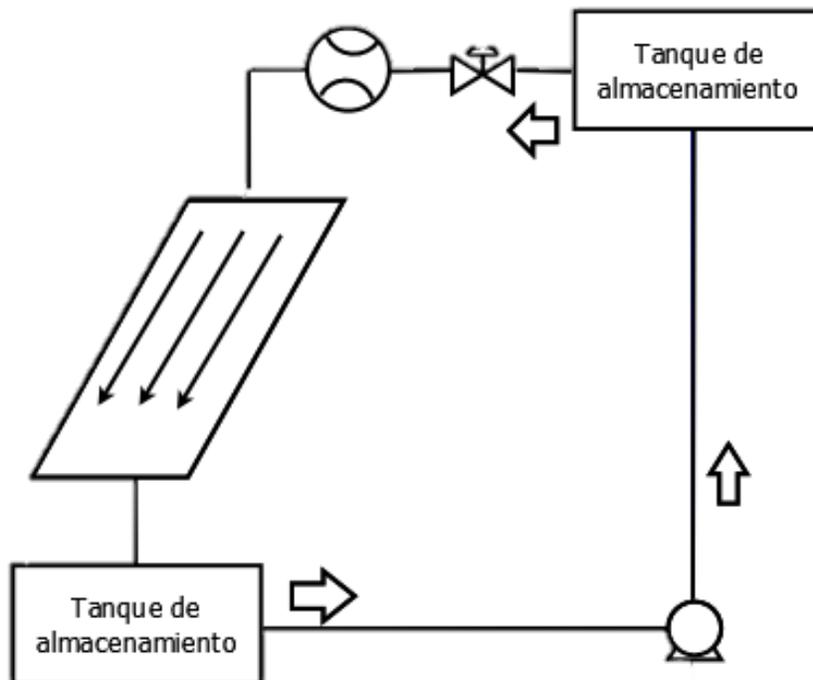


Figura 52. Esquema gráfico de operación de regeneradores.

Para determinar el grado de regeneración de las soluciones se toman muestras de 500 mL al final de las pruebas en una probeta graduada de vidrio. Después se mide la temperatura de la solución con un sensor de temperatura sumergible y posteriormente se determina la densidad relativa con un densímetro (Figura 53).



Figura 53. Determinación de densidad relativa en soluciones de CaCl_2 con densímetro.

Para determinar los perfiles de temperatura se colocaron los sensores a la entrada y la salida del regenerador (Figura 54), para así poder observar la ganancia de energía térmica de la solución en al pasar por los sistemas regeneradores.

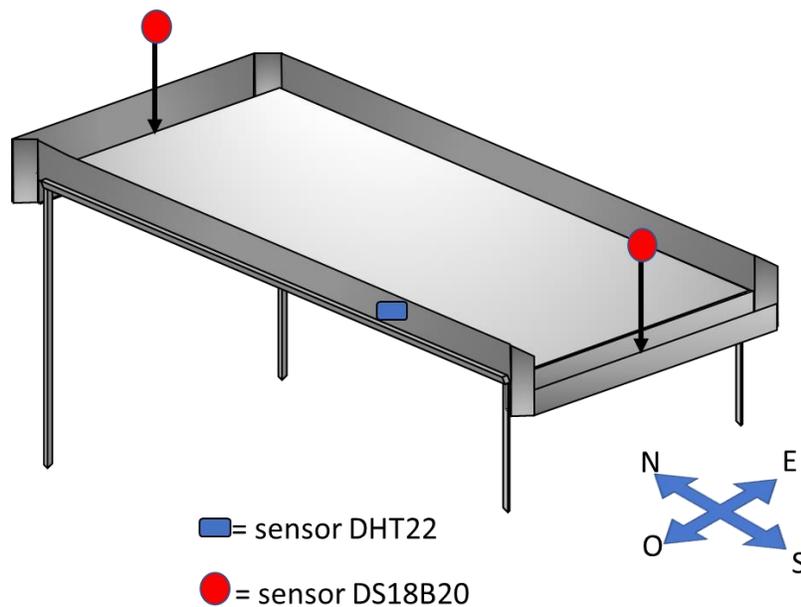


Figura 54. Esquema de ubicación de sensores de temperatura DS18B20.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados preliminares

Se realizaron algunas pruebas preliminares para conocer el comportamiento de las soluciones, equipos de regeneración y monitores durante el proceso de deshumidificación. Los resultados cualitativos que se encontraron se utilizaron para mejorar la metodología previamente establecida. Los aspectos analizados corresponden a la velocidad de flujo en la solución, la orientación de los equipos y su ángulo de elevación respecto al sol, los intervalos de registro de datos de monitoreo, así como los intervalos óptimos para la recirculación de las soluciones.

En cuanto a los flujos de la solución, se inició con valores bajos entre 0.5-0.75 l/min, observándose la formación de canalizaciones en ciertas áreas en los equipos de regeneración, lo cual indica un desaprovechamiento del área de intercambio térmico disponible del equipo Figura 55.



Figura 55. Canalización en el flujo de solución de CaCl_2 .

En flujos iguales o mayores a 2 litros/min se observaron bajos e insuficientes incrementos de temperatura en la solución debido al poco tiempo de residencia de la solución en los equipos. Además, fue necesario recircular muchas veces la solución.

Los resultados indicaron la necesidad de operar los generadores en un dominio de flujos entre 0.8 y 1.8 l/min para disminuir el efecto de las canalizaciones, una recirculación más adecuada y tener un mejor aprovechamiento del área disponible.

Inclinación de los equipos

Se realizó un ensayo en el equipo escalonado con un flujo de entrada de 1.0 l/min, donde se probaron diferentes inclinaciones con incrementos de 5° respecto al piso empezando en 23°, esto para determinar la influencia de la inclinación respecto al incremento de temperatura por el ángulo en que el equipo recibe la radiación solar, además de determinar la variación de la velocidad del fluido a lo largo del equipo, de lo cual se observó que inclinaciones mayores a 45° se pierde tiempo de contacto de la solución con la placa lo cual se ve reflejado en bajos incrementos de temperatura Tabla 10. Fue posible constatar que el rango óptimo de inclinación es de 23° a 38° de inclinación el cual depende la declinación solar, es decir, del día del ensayo.

Tabla 10. Datos obtenidos de temperatura y número de recirculaciones en pruebas preliminares.

Inclinación del equipo	Temperatura inicial (°C)	Temperatura después de 45 min de prueba (°C)	Número de recirculaciones de la solución
23°	24.54	34.8	7
28°	24.7	34.2	7
33°	25.02	31.9	9
38°	24.2	30.2	10
43°	24.13	28.62	12
48°	25.21	27.95	13

Además, durante esta prueba se ajustaron los intervalos de registro en los adquirentes en 0.5 segundos para el arduino. Respecto a la recirculación, con el fin de proteger a los equipos de daños debido a una operación sin flujo, se optó

por realizar la recirculación de las soluciones hasta que la totalidad de la solución haya circulado por el equipo de regeneración.

6.2 Regeneración de sales y cálculos de energía solar y térmica aprovechada

Se realizó la primera prueba de regeneración el 31 de mayo de 2019, para ello se prepararon 50 litros de solución con CaCl_2 cuya fracción másica fue de 0.20. Esta solución fue distribuida en 2 bidones de 25 litros y fue llevada al sitio de experimentación después de haber evaluar sus propiedades (temperatura, densidad relativa y peso y volumen). Previo a la prueba de regeneración se calculó la declinación solar, el medio día solar y se inclinó el equipo con el ángulo adecuando Tabla 11 y se operó con un flujo de 1.2 l/min.

Tabla 11. Datos iniciales de primer día de prueba

	Equipo escalonado	Equipo plano
Temperaturas iniciales (°C)	25.08	25.02
Densidad Relativa	1.18	1.18
Declinación solar (°)	21.9	21.9
Zenit		
Horario civil (hh:mm)	14:01	14:01

Los recipientes con las soluciones fueron incorporados a los equipos como se muestra en la Figura 56. Se iniciaron las mediciones a las 12:14 h y se fue monitoreando cada minuto hasta las 14:20 h con ayuda de los sensores y arduino conectados a una computadora portátil (Levono G45) la cual actuaba como adquirente de datos.

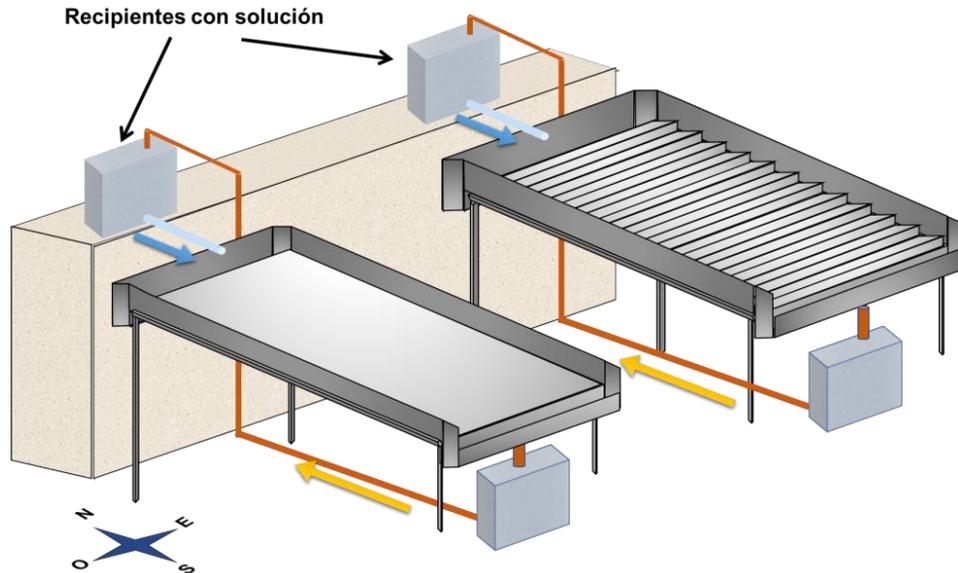


Figura 56. Diagrama de ensamble de equipos

De acuerdo a los datos obtenidos al procesar la información de los adquirentes de datos, se graficó la temperatura ambiental, las temperaturas de la solución salina en función del tiempo tanto en el rebosadero como en el extremo al final del equipo y se obtuvieron los perfiles de los incrementos de temperatura en la solución para el equipo tipo plano y el escalonado (Figura 57).

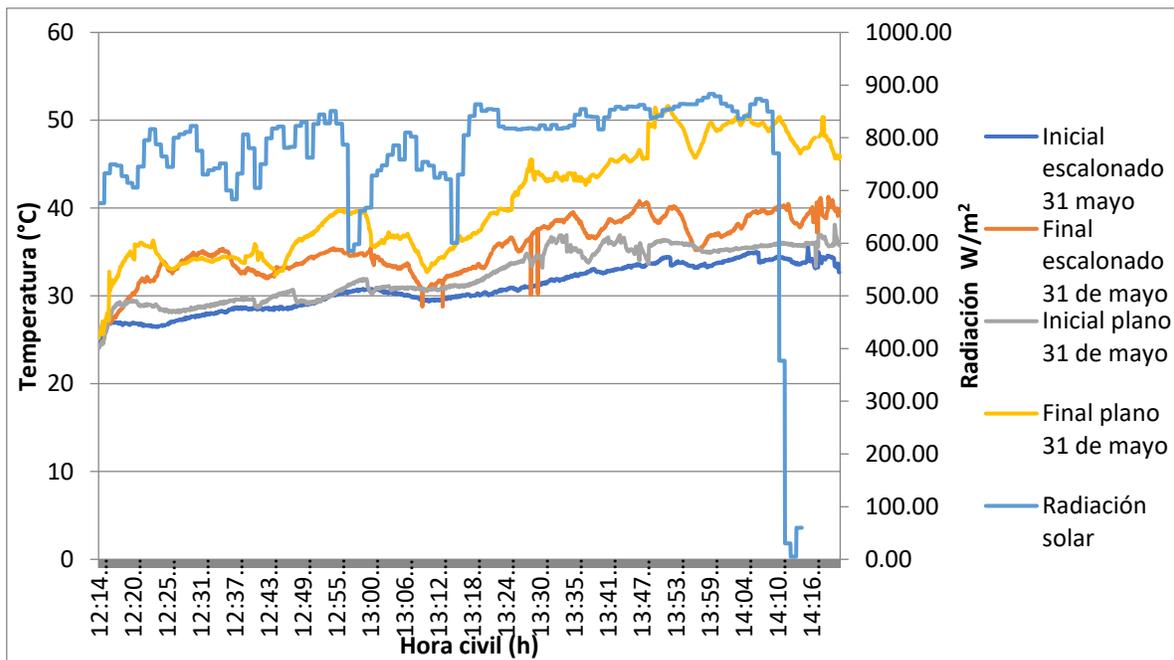


Figura 57. Incremento de temperatura en equipos de regeneración de CaCl_2 .

La Figura 56 presenta las temperaturas alcanzadas por la solución al inicio y final de su paso por los equipos a lo largo de la prueba de regeneración además de la radiación solar recibida. La solución que alcanzó mayor temperatura es la tratada en el equipo de plano inclinado, con un valor de hasta 52.12 °C registrado a las 13:50 h, en contraste la solución tratada por el equipo escalonado la máxima temperatura fue de 40.47 °C registrado a las 13:46 hora civil.

Respecto a la cantidad de agua retirada, se registró la densidad relativa al inicio y la obtenida al final de la prueba como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores obtenidos de regeneración de CaCl_2 en términos de densidad relativa.

Densidad relativa		
	Inicio	Después de la regeneración
Equipo escalonado	1.18	1.19
Equipo plano	1.18	1.19

Para la determinación del cambio de la concentración de las soluciones, se calculó la fracción másica de CaCl_2 en las soluciones a partir de las ecuaciones 26 y 27, donde las variables B son parámetros teóricos de densidad del agua que, en la ecuación cúbica, ayudan a la representación del fenómeno en función de la relación másica soluto-solvente y cuya representación gráfica se aprecia en la Figura 58.

$$\rho_{sol}(x_i, T) = \rho_{H_2O}(x_i, T) \sum_{i=0}^3 \rho_i \left(\frac{x_i}{1-x_i} \right) \quad (26)$$

$$\rho_{H_2O}(\tau) = \rho_{c,H_2O} \left(1 + B_0\tau^{1/3} + B_1\tau^{2/3} + B_2\tau^{5/3} + B_3\tau^{16/3} + B_4\tau^{43/3} + B_5\tau^{110/3} \right) \quad (27)$$

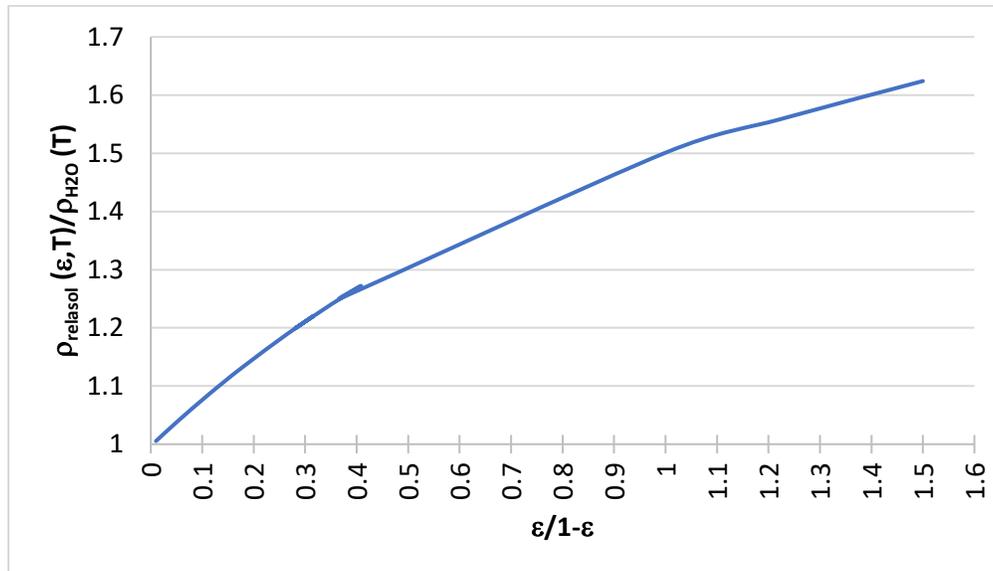


Figura 588. Densidad relativa del CaCl₂ a 25°C

Con ayuda de la función de la curva, sustituyendo en la ordenada al origen el valor de la densidad relativa, se obtiene la relación de soluto-solvente, por ejemplo con la densidad relativa obtenida de 1.19 y al obtener las raíces de la ecuación cúbica o de manera gráfica, nos da un valor en la relación de soluto-solvente de 0.28 y al considerar que la pérdida de masa se debe únicamente a la pérdida de H₂O en la solución se calcula el volumen de agua al final de la experimentación, que para ambos equipos en este día de prueba representa una pérdida de 0.37 litros de agua .

Con el fin de seguir analizando el comportamiento del proceso de regeneración de la sal se repitió la metodología los días 3, 6, 7 de junio y 15 de agosto del 2019, iniciando a horas similares y ajustando la inclinación del equipo en función a la declinación del sol para dichos días según la metodología sugerida por John A. Duffie en su libro “Solar Engineering of Thermal Processes”. En la Tabla 13 se muestran los datos obtenidos, así como otros valores calculados como hora del amanecer, el Zenit y Puesta de sol en horario solar y horario Civil.

Tabla 13. Datos para estimación de la posición solar en días de prueba.

Día y mes	Declinación Solar °	Amanecer (hh:mm)		Zenit (hh:mm)		Puesta de Sol	
		Hora Civil	Hora solar	Hora Civil	Hora solar	Hora Civil	Hora solar
31 de Mayo	21.9	07:22	05:21	14:01	12:00	20:40	18:38
3 de Junio	22.3	07:21	05:20	14:00	12:00	20:40	18:39
6 de Junio	22.6	07:20	05:19	14:00	12:00	20:40	18:40
7 de Junio	22.7	07:19	05:19	14:00	12:00	20:40	18:40
15 de Agosto	23.8	07:16	05:36	13:39	12:00	20:03	18:23

Los datos obtenidos de la regeneración de la sal se presentan en la Tabla 14 donde están expresado en función de la densidad relativa inicial y final del $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a temperatura ambiente (22-25 °C), donde, se presentan las masas de agua eliminada para cada caso.

Tabla 14. Tabla de datos de regeneración.

Configuración equipo	Fecha de prueba	Densidad relativa		Masa de agua (kg)		
		Inicio	Después de la regeneración	Inicial	Final	Perdida
Escalonado	31 de Mayo	1.18	1.19	20	19.63	0.37
	3 de Junio	1.18	1.21	20	19.3	0.6
	6 de Junio	1.175	1.275	20	17.96	2.04
	7 de	1.175	1.27	20	18.6	1.4

	Junio					
	15 de Agosto	1.18	1.26	20	18.93	1.07
Plano	31 de Mayo	1.18	1.19	20	19.6	0.4
	3 de Junio	1.18	1.27	20	18.6	1.4
	6 de Junio	1.175	1.29	20	17.35	2.56
	7 de Junio	1.175	1.28	20	17.6	2.4
	15 de Agosto	1.18	1.265	20	18.8	1.2

De lo cual podemos observar un desempeño superior por parte del “Equipo plano” logrando pérdidas agua de hasta 2.5 litros y en contraste con el “Equipo escalonado” se obtuvo una pérdida de 2 litros el 6 de junio. Esto apreciable en la Tabla 15 donde se reportan la fracción másica del CaCl_2 en la solución después de la regeneración.

Tabla 15. Fracciones másicas de CaCl_2 obtenidas

Equipo	Fecha	Fracción másica
Escalonado	31 de Mayo	0.211
	3 de Junio	0.215
	6 de Junio	0.23
	7 de Junio	0.22
	15 de Agosto	0.218
Plano	31 de Mayo	0.215
	3 de Junio	0.222
	6 de Junio	0.25
	7 de Junio	0.24
	15 de Agosto	0.22

Temperatura de la solución.

Con respecto a la temperatura de la solución, en la Figura 59 se presentan los valores en función del tiempo en los sensores posicionados (la Figura 54), de esto se observa que las mayores temperaturas se lograron en el día 6 de junio con temperaturas de hasta 72 °C, lo cual respalda los datos de regeneración de la sal de la Tabla 12.

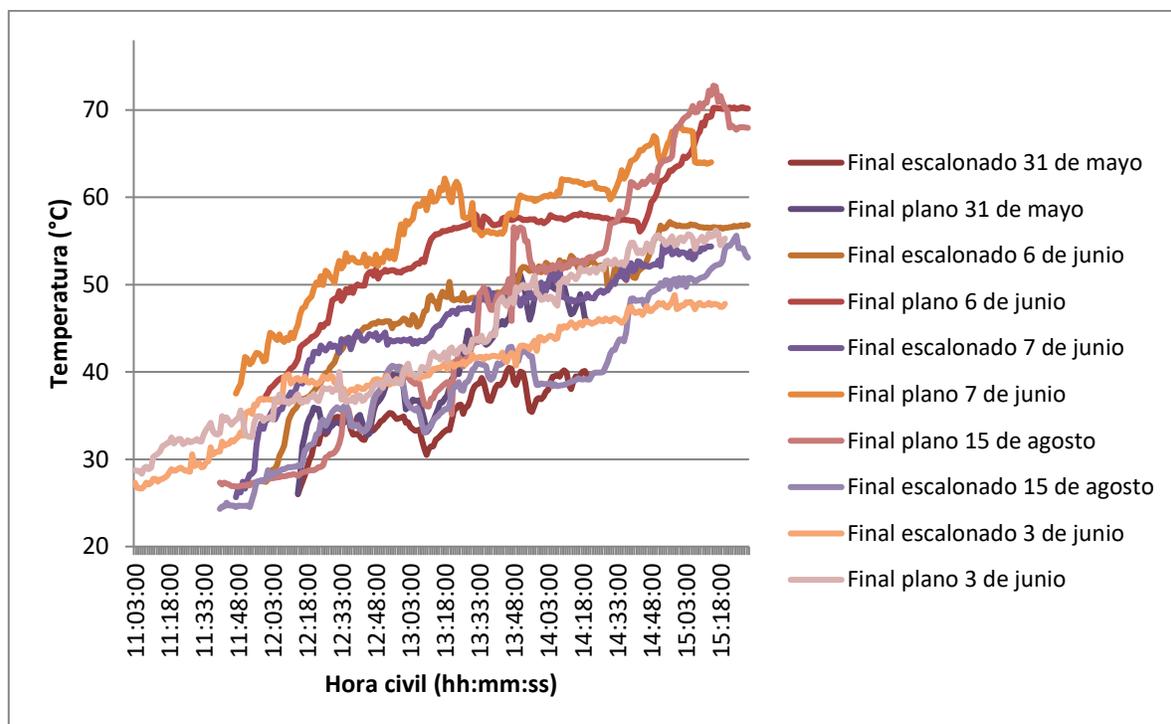


Figura 59. Perfil de temperaturas a la salida del regenerador.

Cálculos de energía solar aprovechada

Para la determinación de la energía solar aprovechada por los equipos de regeneración, se solicitaron datos climáticos de los días de experimentación a la planta de estación solarimétrica Zacatecas_04, ubicada en el mismo sitio de experimentación (Figura 60). Dichos datos fueron procesados y se presentan en la

Tabla 16, donde se aprecia la energía solar total en kilo joules captada por los equipos en una superficie de 0.5 m².

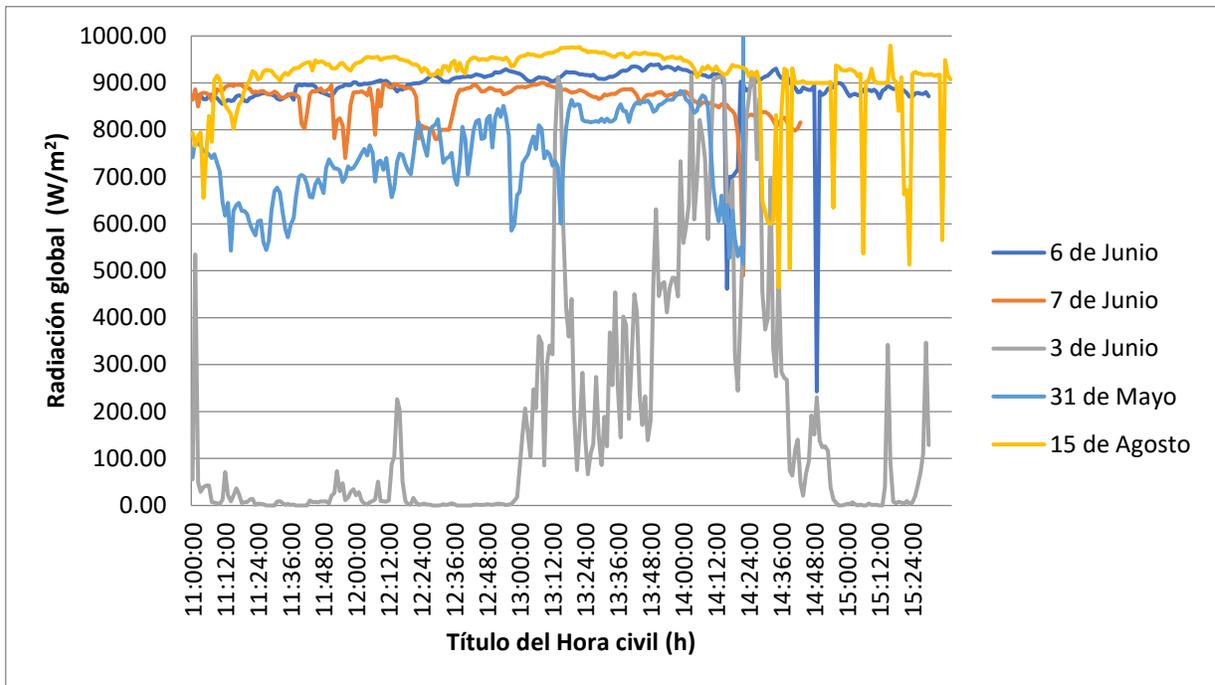


Figura 60. Radiación solar global en los días de pruebas

Tabla 16. Energía teórica captada por los equipos regeneradores en 0.5m².

Día	Energía disponible teórica (kJ)
31 de mayo	4520.12086
3 de Junio	1770.03561
6 de Junio	10797.31563
7 de Junio	5796.85882
15 de Agosto	7449.16244

Si bien, los datos de energía global recibida por los equipos nos dan una relación coherente entre la temperatura, la regeneración de la solución salina y la radiación solar en el entorno de los equipos, es decir, se presenta mayor regeneración de la sal cuando se registraron mayores temperaturas y mayor radiación solar, tenemos que tener en cuenta que dicha energía no es aprovechada al 100% por los

equipos. Sin embargo, podemos hacer una estimación de aprovechamiento de energía a partir del volumen de agua evaporada por los regeneradores.

Para ello es necesario conocer los calores sensible y latente de la solución y a partir de ellos, obtener la energía total necesaria según las ecuaciones 28-30. Para nuestro estudio los datos obtenidos se presentan en la Tabla 17. Donde vemos que hubo un mayor aprovechamiento de energía del equipo plano. Lo cual puede ser atribuido a la geometría de los equipos, donde el equipo escalonado tiene un menor aprovechamiento de la energía solar, esto debido a que la temperatura en la placa no es homogénea en lo alto y ancho de sus escalones.

$$Q_{Total} = Q_s + Q_l \quad (28)$$

$$Q_s = mCp\Delta t \quad (29)$$

$$Q_l = mL \quad (30)$$

Tabla 17. Cantidad de energía solar aprovechada por los equipos de regeneración.

Día	Energía aprovechada (kJ)	
	Equipo escalonado	Equipo Plano
31 de mayo	8687.2522	9455.860
3 de Junio	1416.27.4	3345.6724
6 de Junio	4892.20152	6299.97568
7 de Junio	3339.812	5855.9952
15 de Agosto	2557.04962	2953.1136

Para que el proceso sea viable los valores de la Tabla 18 deben de ser mayores que la energía requerida por las bombas de recirculación de fluido y así poder tener un balance de energía ahorrada positivo. Para ello se midió el consumo eléctrico en cada ciclo de recirculación durante las pruebas con un multímetro según la metodología sugerida por Venables M. [43], dichos datos se reportan en la Tabla 18, donde se observa la energía en kilo joules consumida por los equipos para sus respectivos tiempos de prueba.

Tabla 18. Cantidad de energía consumida por las bombas de recirculación de los equipos de regeneración.

Energía consumida (kJ)		
Día	Equipo escalonado	Equipo Plano
31 de mayo	82.656	94.464
3 de Junio	165.312	177.120
6 de Junio	167.673	179.480
7 de Junio	166.493	178.300
15 de Agosto	165.900	177.710

Lo cual equivale a un 7.2 % de la energía solar aprovechada por el equipo escalonado y un 5.4 % para el equipo plano. Con esto podemos apreciar un balance positivo en energía ahorrada para la regeneración de las sales.

7. CONCLUSIONES

- El regenerador tipo plano inclinado tuvo mejor desempeño que el equipo escalonado logrando temperaturas de la solución de hasta 72 °C en contraste del equipo escalonado cuya temperatura máxima fue de 58 °C.
- El diseño de ambos equipos resultó ser adecuado ya que se demostró poder regenerar soluciones de CaCl₂.
- Se logró el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de condiciones climáticas y físicas de fluidos con sensores de bajo costo y accesibles.
- Se logró la regeneración de soluciones acuosas de CaCl₂ llegando a valores en la fracción másica de la sal de 0.25.
- El desempeño del equipo escalonado no cumplió con lo esperado, a pesar de tener mayor tiempo de residencia de la solución en el equipo, las temperaturas alcanzadas por este último fueron menores que las del equipo plano.
- La configuración del equipo escalonado evita tener una temperatura homogénea en la placa por el ángulo de incidencia de radiación solar.
- El aprovechamiento de la energía solar por los equipos en la regeneración de las sales, denota el logro en la implementación de una energía renovable en la evaporación de soluciones químicas.

8. PERSPECTIVAS.

Las principales aportaciones de este proyecto son el diseño dos equipos de captación de energía solar que pueden ser utilizados como captadores de energía solar, concentradores de soluciones salinas líquidas poco y medianamente corrosivas o como deshidratadores de productos agrícolas.

Además, se logró la creación de un sistema de monitoreo de condiciones ambientales con amplia gama de posibles aplicaciones, como monitoreo de propiedades físicas de fluidos newtonianos, como temperatura, flujos y densidad relativa.

Las futuras líneas de investigación que surgen a partir de este trabajo son complementar el estudio, caracterización y optimización de los equipos creados, por ejemplo:

- Determinación de regeneración de otro tipo de soluciones acuosas en los regeneradores propuestos.
- Caracterización de la eficiencia de los equipos mediante la determinación de pérdidas energéticas por refracción y pérdidas en las paredes metálicas.
- Diseño de cubierta aislante para mitigar pérdidas térmicas por conducción en las paredes de los equipos.
- Incorporación de peineta en el rebosadero de los equipos para crear canales homogéneos en todo el equipo.

9. REFERENCIAS

- [1] Treybal, R. E. (2013). Mass Transfer Operations, Part two 7. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [2] Dina, S. F., Ambarita, H., Napitupulu, F. H., & Kawai, H. (2015). Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. Case Studies in Thermal Engineering, 5, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.11.003>
- [3] CONAGUA. (2014). Resumen anual de Temperaturas y Lluvia. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- [4] LaNGIF (2018). Monitoreo de precipitación en México para el año de 2017. Recuperado de: http://langif.uaslp.mx/HR_Historico.php].
- [5] Evans J.A., Foster A.M., Huet J.M., et al. (2014). Rendimiento energético del almacenamiento en frío. Frío Calor Aire acondicionado, Vol 42, No. 471, pp. 3-12.
- [6] Guerrero Santafé, J., (2000). Impacto ambiental generado por las actividades químicas de producción y uso de clorofluorocarbonos. TED: Tecné, Episteme y Didaxis, (7).
- [7] Lenntech BV (1998-2018). FAQ de química y física del aire Preguntas frecuentes. Recuperado de <https://www.lenntech.es/faq-quimica-y-fisica-del-aire.htm>
- [8] American Society of Heating, R. and A.-C. E. (ASHRAE). (2009). Handbook Fundamentals (Vol. 30329, Issue 404).
- [9] Efraín, A. P. (2011). Diseño e ingeniería de ventilación y climatización. Recuperado de <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-1/>

- [10] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (2001). Fundamentals Hand book. Psychrometrics. Recuperado de <http://www.techstreet.com/products/1258765>>
- [11] WANG, Shan, K. (Ed.2). (2001). Handbook of air conditioning and refrigeration. Nueva York, Estados Unidos de America: McGraw-Hill. 1400 p. ISBN 0-07-068167-8
- [12] Thomas, P., Marcolli, C., Spichtinger, P., Corti, T., Baker, B., y Koop, T. (2006). When Dry Air Is Too Humid. Science, 314, 1399-1401. doi: 10.1126/science.1135199
- [13] "Standard 55- Thermal Environmental Conditional for Human Occupancy.", consultado de: https://www.techstreet.com/ashrae/standards/standard-55-user-s-manual?product_id=1929022 (Acceso: 19 de Agosto de 2019)
- [14] Pilatowsky F. I. (2010). Psicrometría, métodos de humidificación y deshumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [15] Miranda Ángel L. (2019). Fundamentos de Climatización. Editorial Alfa omega, primera edición. Impreso en México.
- [16] Alarcón, C. J. (2009). Manual de aire acondicionado. Barcelona: Marcombo.
- [17] Rías, G. E. (2009). Diseño y análisis de un sistema cuasi-pasivo para la deshumidificación de espacios (Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [18] Apuy M. M. (2015) Optimización de procesos de deshumidificación del producto CHISPA encienfuegos mediante el diseño de un secador para la empresa EMERGE S.A., Ciudad Universitaria Rodrigo Fecio. Consultado de: <http://www.inii2.ucr.ac.cr/RIINII/pdf/IM/IM-7478.pdf> (Consultado: 10 de febrero de 2018)

- [19] Jan, W., (2007) Polymers Dictionary of Desiccant dryers. Encyclopedic Dictionary of Polymers. (Springer) New York, NY. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-30160-0_3392
- [20] Harriman, L.G. (Ed.2). (1990). The dehumidification handbook, Amesbury, MA. EU. Editorial Munters, Cargoaire.
- [21] Pilatowsky, F., (2002). Psicrometría, métodos de humidificación y deshumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/266498059_PSICROMETRIA_METODOS_DE_HUMIDIFICACION_Y_DEHUMIDIFICACION_Y_SUS_APLICACIONES_EN_EL_DISENO_ARQUITECTONICO
- [22] Mei, L., Dai, YJ (2008). A technical review on use of liquid-desiccant de humidification for air-conditioning application. Renew Sustain. Energy Rev. 12 (1), 662–89.
- [23] Rouquerol J, Rouquerol F, Llewellyn P, Maurin G, Sing KS. (2013). Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications. Academicpress.
- [24] R.M Lazzarin, A. G. (1999). Chemical dehumidification by liquid desiccants: theory and experiment. Science Direct. 334–347.
- [25] Gandhidasan P, Al-Farayedhi A, Al-Mubarak A.A. (2001). Dehydration of natural gas using solid desiccants. Energy, 26, 855-868.
- [26] Ali. M. M, Pahlavanzadeh H. (2009). Introduction of a new definition for effective ness of desiccant wheels. Energy; 34:797–803.
- [27] Basmadjian D. (1984). The adsorptive drying of gases and liquids. Advances in Drying, 3, 307-357.
- [28] Kidnay A.J., Parrish W. (2006). Fundamentals of Natural Gas Processing; Taylor and Francis: Boca Raton.

- [29] R.M Lazzarin, A. G. (1999). Chemical dehumidification by liquid desiccants: theory and experiment. *Science Direct*. 334–347
- [30] Wisut, S. J. (2013). Performance evaluation of the desiccant bed solar dryer. *Science Direct*. 34(1). 189-197.
- [31] Roger S. P. (2012) *Deshumidificación y Enfriamiento*. Curso: Sistemas de Enfriamiento Aplicados a la Vivienda. Guadalajara, México.
- [32] Parmar, H., Hindoliya. D.A. (2011). Desiccant cooling system for thermal comfort: a review. *Int J Eng Sci Technol IJEST*; 03:4218–27.
- [33] Heidarinejad, G., Heidarinejad M., Delfani S., Esmaeelian J. (2008). Feasibility of using Various kinds of cooling systems in a multi-climates country. *Energy Build*; 40:1946–53.
- [34] Baniyounes, A.M., Ghadi, Y.Y., Rasul, M.G., et al. (2013). An overview of solar assisted air conditioning in Queensland’s subtropical regions, Australia. *Renew Sustain Energy Rev*; 26:781–804.
- [35] Mandegari, M.A., Pahlavanzadeh, H. (2009). Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels. *Energy*; 34:797–803.
- [36] Yin, Y.G., Zhang, X.S., Peng, D.G., et al. (2009). Model validation and case study on internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant systems. *Int J Thermal Sci*; 48:1664–71.
- [37] Longo, G.A., Gasparella A. (2005). Experimental, theoretical analysis of heat and mass transfer in a packed column dehumidifier/regenerator with liquid desiccant, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48; 5240–5254.
- [38] Cheng, Q., Xu, Y., & Zhang, X. (2013). Experimental investigation of an electro dialysis regenerator for liquid desiccant. *Energy and Buildings*, 67, 419-425. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.052

- [39] Thoruwa, T., Johnstone, C., Grant, A. Y Smith, J. (2015). Novel, low cost CaCl₂ based desiccants for solar crop drying applications. *Renewable Energy*, 19(4), pp.513-520.
- [40] Dhruvin, L. Shuklaa, Kalpesh V. Modib, (2017). A technical review on regeneration of liquid desiccant using solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017) 517–529.
- [41] Bouzenada, S., Kaabi, AN, Frainkin, L., Salmon, T. y Léonard, A. (2016). Estudio comparativo experimental sobre cloruro de litio y desecantes de cloruro de calcio. *Procedia*.
- [42] ASHRAE, ASHRAE Handbook. (2005). Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta.
- [43] Bouzenada, S., Kaabi, AN, Frainkin, L., Salmon, T. y Léonard, A. (2016). Estudio comparativo experimental sobre cloruro de litio y desecantes de cloruro de calcio. *Procedia*.
- [44] Rogdakis, ED, Papaefthimiou, VD, y Karampinos, DC (2003). Un enfoque realista para modelar la absorción de película de caída suave LiBr-H₂O en un tubo vertical. *Ingeniería térmica aplicada*, 23 (17), 2269–2283
- [45] Venables, M.,(2007) “Smart Meters Make Smart Consumers [Analysis]”, *Engineering & Technology*, 2(4), 23.
- [46] Yıldırım, C. and Solmuş, İ., 2014. A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters. *Energy Conversion and Management*, 86, pp.568-575.
- [47] Minaal, S. Saffa B., (2015). Desiccant cooling systems: a review. Department of Architecture and Built Environment, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK
- [48] Radhwan, A. M., Gari H. N., Elsayed, M. M. (2012). Parametric study of a packed bed dehumidifier/regenerator using CaCl₂ liquid desiccant. *Renewable Energy*, Vol. 3, No. 1, pp. 49-60.
- [49] Jurinak, J. J., Mitchell, J. W., Beckman, A. W. (2013). Open-Cycle Desiccant Air Conditioning as an Alternative to Vapor Compression Cooling in Residential Applications. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1500 Johnson Drive, Madison, Wis. 53706

- [50] McNevin, C. and Harrison, S., 2017. Multi-stage liquid-desiccant air conditioner: Experimental performance and model development. *Building and Environment*, 114, pp.45-55.
- [51] Shock, E., Oelkers, E., Johnson, J., Sverjensky, D. and Helgeson, H., 1992. Calculation of the thermodynamic properties of aqueous species at high pressures and temperatures. Effective electrostatic radii, dissociation constants and standard partial molal properties to 1000 °C and 5 kbar. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 88(6), pp.803-826.
- [52] Bin, L., Yu-ting, W., Chong-fang, M., Meng, Y. and Hang, G., 2009. Turbulent convective heat transfer with molten salt in a circular pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(9), pp.912-916.
- [53] Li, X., Liu, S., Tan, K., Wang, Q., Cai, W. and Xie, L., 2016. Dynamic modeling of a liquid desiccant dehumidifier. *Applied Energy*, 180, pp.435-445.
- [54] GRIGORAS, Cristina & Muntianu, G. & Gavrilă, Lucian. (2016). Mathematical modelling of CaCl₂ aqueous solutions thermophysical properties. 17. 417-426.
- [55] Gao, N., Chen, G., Jiang, Y. and He, Y., 2014. Isobaric heat capacity of potential liquid desiccant solutions containing calcium chloride and its mixtures. *HVAC&R Research*, 20(3), pp.328-331.
- [56] Pathak, A., Nedea, S., Zondag, H., Rindt, C. and Smeulders, D., 2016. A DFT-based comparative equilibrium study of thermal dehydration and hydrolysis of CaCl₂ hydrates and MgCl₂ hydrates for seasonal heat storage. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(15), pp.10059-10069.
- [57] Perera, C. and Rahman, M., 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends in Food Science & Technology*, 8(3), pp.75-79.
- [59] Yao, Y., Sun, Y., Sun, D., Sang, C., Sun, M., Shen, L. and Chen, H., 2021. Optimization design and experimental study of thermoelectric dehumidifier.

[60] Bin, L., Yu-ting, W., Chong-fang, M., Meng, Y. and Hang, G., 2009. Turbulent convective heat transfer with molten salt in a circular pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(9), pp.912-916

Apéndice A. Programa para Arduino uno.

```
////////Programa control de condiciones dentro de los
regeneradores////////////////////////////////////

////Librerías utilizadas////////////////////////////////////

                                                    ////
#include "DHT.h"      // DHT & AM2302 library      ////
#include <OneWire.h>                               ////
#include <DallasTemperature.h>                     ////
////////////////////////////////////////////////////////

////////PARTE DEL SENSOR DE HUMEDAD////////////////////////////////////
// Data pin connected to AM2302                    ////
#define DHTPIN 5                                     ////
                                                    ////

#define DHTTYPE DHT22    // DHT 22 (AM2302)        ////
                                                    ////

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // LED pins              ////
////////////////////////////////////////////////////////

////PARTE DE LAS SONDAS DE
TEMPERATURA////////////////////////////////////

                                                    ////

const byte pinDatosDQ = 9; // Pin donde está conectado DQ  ////
                                                    ////

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature  ////
OneWire oneWireObjeto (pinDatosDQ);                ////
DallasTemperature sensorDS18B20 (&oneWireObjeto);   ////
                                                    ////
////////////////////////////////////////////////////////
```

```

////// Sensores de caudal YF-S201////////////////////////////////////
                                                    ////
                                                    ////
                                                    ////

volatile int pulsos; // Cantidad de pulsos del sensor. Como se usa dentro de
una interrupcion debe ser volatile

volatile int pulsos2 ; // cantidad de pulsos del sensor 2           ////
                                                                    ////

unsigned int litrosPorHora; // Calculated litres/hour           ////
unsigned int litrosporhora2; // Calcula litros/h del sensor 2   ////
                                                                    ////

unsigned char sensorDeFlujo = 2; // Pin al que esta conectado el sensor 1 ////
unsigned char sensordeflujo2 = 3; // Pin al que esta conectado el sensor 2
////
                                                                    ////

unsigned long tiempoAnterior; // Para calcular el tiempo       ////
unsigned long tiempoAnterior2; // Para calcular el tiempo sensor 2
////
                                                                    ////

unsigned long pulsosAcumulados; // Pulsos acumulados
////

unsigned long pulsosAcumulados2; //Pulsos acumulados sensor 2
////
                                                                    ////

float litros; // Litros acumulados                               ////
float litros2; //Litros acumulados 2                             ////
void flujo () // Funcion de interrupcion                         ////
{                                                                    ////
pulsos++; // Simplemente sumar el numero de pulsos
////
}                                                                    ////

```

```

void flujo2 () //Funcion de interrupcion
////
{
pulsos2++; // suma lo del segundo sensor
}
////////////////////////////////////////////////////////////////

// SETUP////////////////////////////////////////////////////////////////
//
void setup() {

// Setup serial monitor
////////// sensor de humedad////////////////////////////////////////////////////////////////
Serial.begin(9600);
dht.begin();
////////////////////////////////////////////////////////////////
//////sensor de temperatura en serie////////////////////////////////////////////////////////////////
sensorDS18B20.begin(); //sensor de temperatura
////////////////////////////////////////////////////////////////

////////// Sensores de caudal////////////////////////////////////////////////////////////////
pinMode(sensorDeFlujo, INPUT);
pinMode(sensordeflujo2,INPUT);
Serial.begin(9600);

attachInterrupt(0, flujo, RISING); // Setup Interrupt opera el pin 2

interrupts(); // Habilitar interrupciones
tiempoAnterior = millis();

```

```

                                                                    /////
attachInterrupt (1,flujo2, RISING); //Setup Interrupt opera el pin 3      /////
interrupts();                                                            /////
tiempoAnterior2=millis();                                              /////
////////////////////////////////////
}
void loop() {
    // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds!
    // Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();

    // check if returns are valid, if they are NaN (not a number) then something
    went wrong!
    if (isnan(t) || isnan(h)) {
        Serial.println(F("Failed to read from DHT"));
    }
    else {
        //Serial.print(F("Humedad% : "));
        Serial.print(",");
        Serial.print(h );
        Serial.print(",");
        // Serial.println(F(" %t"));
        //Serial.print(F("Temperatura °C: "));
        Serial.print(t );
        Serial.print(",");
        // Serial.println(F(" C"));

        // MAndamos comandos para toma de temperatura a los sensores
        //Serial.println("Mandando comandos a los sensores");
    }
}

```

```

sensorDS18B20.requestTemperatures();

//Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20
//Serial.print("Temperatura sensor 0:");
Serial.print( sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
Serial.print(",");
//Serial.print("Temperatura sensor 1:");
Serial.print( sensorDS18B20.getTempCByIndex(1));
Serial.print(",");
Serial.print( sensorDS18B20.getTempCByIndex(2));
Serial.print(",");
Serial.print( sensorDS18B20.getTempCByIndex(3));
Serial.print(",");

////////////////////////////////////
////////sensores de caudal////////////////////////////////////

////////sensor 1////////////////////////////////////

// Cada segundo calcular e imprimir Litros/seg
if( millis() - tiempoAnterior > 1000)
{
tiempoAnterior = millis(); // Updates cloopTime
// Pulse frequency (Hz) = 6.67 Q, Q is flow rate in L/min. (Results in +/- 3%
range)
// Q = frecuencia / 6.67 (L/min)
// Q = (frecuencia * 60) / 6.67 (L/hora)
pulsosAcumulados += pulsos;
litrosPorHora = (pulsos * 60 / 6.67); // (Pulse frequency x 60 min) / 7.5Q = flow
rate in L/hour
pulsos = 0; // Reset Counter
//Serial.print("Sensor uno: ");

```

```

Serial.print( litrosPorHora , DEC); // Print litres/hour
//Serial.println(" L/hour");
Serial.print(",");
//Serial.print(" Pulsos totales: ");
Serial.print( pulsosAcumulados );
Serial.print(",");
litros = pulsosAcumulados*1.0/400; //Cada 400 pulsos = 1 litro
//Serial.print(" Litros: ");
Serial.print( litros );
Serial.print(",");
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Cada segundo calcular e imprimir Litros/seg
if( millis() - tiempoAnterior2 > 1000)
{
tiempoAnterior2 = millis(); // Updates cloopTime
// Pulse frequency (Hz) = 6.67 Q, Q is flow rate in L/min. (Results in +/- 3%
range)
// Q = frecuencia / 6.67 (L/min)
// Q = (frecuencia * 60) / 6.67 (L/hora)
pulsosAcumulados2 += pulsos2;
litrosporhora2 = (pulsos2 * 60 / 6.67); // (Pulse frequency x 60 min) / 7.5Q =
flow rate in L/hour
pulsos2 = 0; // Reset Counter
//Serial.print("Sensor dos:  ");
Serial.print( litrosporhora2 , DEC); // Print litres/hour
//Serial.println(" L/hour");
Serial.print(",");
//Serial.print(" Pulsos totales2: ");

```

```

Serial.print( pulsosAcumulados2 );
Serial.print(",");
litros2 = pulsosAcumulados2*1.0/400; //Cada 400 pulsos = 1 litro
//Serial.print(" Litros2: ");
Serial.println( litros2 );
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
delay(4000);
}
}

```

Apéndice B. Programa de calibración de sensores de temperatura.

```

volatile long NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{ NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING);//(Interrupción
0(Pin2),función,Flanco de subida)

```

```
interrupts(); //Habilitamos las interrupciones }  
void loop ()  
{  
  //----Enviamos por el puerto serie-----  
  Serial.print ("Numero de Pulsos = ");  
  Serial.println (NumPulsos);  
  delay(100); }
```