

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA CON
MENCION EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

TEMA:

**ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO SOBRE INVESTIGACIONES DE
SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ADSORCIÓN
UTILIZANDO FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA**

AUTOR:

Proaño Aragundi, Luis Alfonso

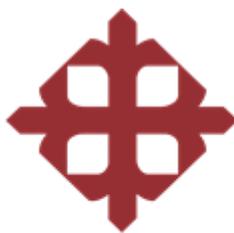
**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN ELÉCTRICO-MÉCANICO CON MENCION
EN GESTION EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

TUTOR:

Ing. Bohórquez Escobar, Bayardo, M.Sc

Guayaquil, Ecuador

2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **PROAÑO ARAGUNDI, LUIS ALFONSO**, como requerimiento para la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico Mecánico.

TUTOR

f. _____

ING. BAYARDO BOHÓRQUEZ, ESCOBAR, M.SC.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____

ING. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO, M.SC.

Guayaquil, a los 21 días del mes de Marzo del año 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA CON
MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Proaño Aragundi, Luis Alfonso**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Análisis bibliográfico sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Eléctrico Mecánico con mención en gestión Empresarial Industrial**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

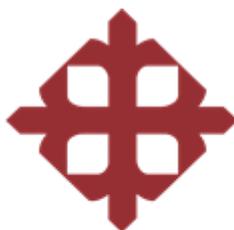
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 21 días del mes de Marzo del año 2019

EL AUTOR

f. _____

Proaño Aragundi, Luis Alfonso



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Proño Aragundi, Luis Alfonso**

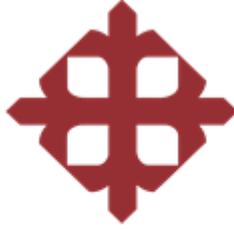
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis bibliográfico sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 21 días del mes de Marzo del año 2019

EL AUTOR:

f. _____

Proño Aragundi, Luis Alfonso



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA CON
MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO, M.SC.
DECANO O DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

ING. ORLANDO PHILCO ASQUI.
COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

ING. RAFAEL HIDALGO.
OPONENTE



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA CON
MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

REPORTE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface with the following details:

- Documento:** Tesis%20final%20%20PROAÑO%202025-02-19.docx (D48287483)
- Presentado:** 2019-02-24 21:25 (-05:00)
- Presentado por:** orlandophilco_7@hotmail.com
- Recibido:** orlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com
- Mensaje:** Fwd: Comparto Tesis [Mostrar el mensaje completo](#)

A summary bar indicates: 4% de estas 31 páginas, se componen de texto presente en 4 fuentes.

The 'Lista de fuentes' (List of sources) table is as follows:

| Porcentaje | Bloques |
|------------|---|
| 75% | el proceso de desorción para regenerar el adsorbente que se encuentra saturado ... |
| 100% | condensador, el fluido refrigerante condensa, cediendo calor al agua del circuito d... |
| 90% | Cuando el adsorbente de la cámara 1 está saturado de agua y el adsorbente en la ... |
| 100% | http://repositori.vji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/41841/52043.pdf?sequence=2 |
| 100% | Las |

At the bottom of the interface, there are buttons for '1 Advertencias', 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN
ELÉCTRICO MECÁNICA

CON MENCION EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

TEMA: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO SOBRE INVESTIGACIONES DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR
ADSORCIÓN

UTILIZANDO FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

AUTOR: Proaño Aragundi, Luis Alfonso

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICO

TUTOR: Ing. Bohórquez Escobar, Bayardo, M.Sc

Guayaquil, Ecuador 2018

Reporte Urkund del trabajo de titulación en ingeniería Eléctrico-Mecánica denominado: **Análisis bibliográfico sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía**, del estudiante **Proaño Aragundi, Luis Alfonso**, está al 4% de coincidencias.

Atentamente.

MSc. Orlando Philco Asqui
Revisor

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar de mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto. Gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es la vida y lo justa que puede llegar a ser, gracias a mi familia por permitirme cumplir con excelencia en el desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en mí y gracias a Dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Les agradezco, y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia.

Proaño Aragundi, Luis Alfonso

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios quien supo guiarme por el buen camino, dame fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis Padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, su ayuda en los momentos difíciles, por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño mi perseverancia, mi coraje para seguir mis objetivos.

Proaño Aragundi, Luis Alfonso

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Justificación y alcance | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 1 |
| 1.3. Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 2 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 2 |
| 1.4. Tipo de investigación | 3 |
| 1.5. Métodos y técnicas | 3 |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. Sistemas de refrigeración..... | 5 |
| 2.1.1. Termodinámica | 6 |
| 2.2. Refrigeración por comprensión | 9 |
| 2.3. Sistemas de refrigeración por adsorción | 11 |
| 2.3.1. Principio de funcionamiento | 12 |
| 2.3.2. Partes de un sistema de refrigeración por adsorción | 15 |
| 2.3.3. Tipos de adsorción | 19 |
| CAPITULO 3 | 23 |
| SITUACIÓN ACTUAL..... | 23 |
| 3.1. Medición de la adsorción..... | 23 |
| 3.1.1. Características de los adsorbentes | 24 |
| 3.2. Pares refrigerantes..... | 27 |
| 3.3. Criterios de selección del par de adsorción | 33 |
| 3.3.1. Zeolita - Agua | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2. Sílica Gel - Agua | 35 |
| 3.3.3. Carbón Activado - Metanol..... | 35 |
| 3.3.4. Carbón Activado - Amoníaco | 36 |
| 3.4. Ventajas y desventajas de los pares | 36 |
| CAPÍTULO 4 | 38 |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN | 38 |
| 4.1. Opinión de expertos | 38 |
| 4.1.1. Experto 1 | 38 |
| 4.1.2. Experto 2 | 43 |
| 4.2. Discusión de resultados | 47 |
| CAPÍTULO 5 | 50 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 50 |
| 5.1. Conclusiones | 50 |
| 5.2. Recomendaciones | 51 |
| BIBLIOGRAFIA | 52 |
| ANEXOS | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1.Principio funcionamiento de refrigeración | 6 |
| Figura 2. 2. Sistema de refrigeración típico..... | 10 |
| Figura 2. 3. a) Isotermas para un Gas Ideal..... | 14 |
| Figura 2. 4. b) Isotermas en un diagrama pV para gases no ideales | 15 |
| Figura 2. 5. Esquema básico de una máquina de adsorción..... | 16 |
| Figura 2. 6. Esquema de una enfriadora de adsorción de simple efecto | 17 |
| Figura 2. 7. Etapas de una enfriadora de adsorción de simple efecto | 18 |
| Figura 2. 8. Carbón activado..... | 20 |
| Figura 2. 9. Alumina activa | 21 |
| Figura 2. 10. Zeolita | 22 |
| Figura 2. 11. Silica gel activada | 22 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Figura 3. 1. Diagrama de los métodos de medición volumétrico y gravimétrico | 24 |
| Figura 3. 2. Estructura interna de un grano de carbón activado | 25 |
| Figura 3. 3. Diagrama esquemático de tipos de isotermas de adsorción reconocidas por la IUPAC..... | 26 |
| Figura 3. 4. Capacidad de rendimiento de los pares de adsorción en sistemas de refrigeración por adsorción | 29 |

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2.

| | |
|--|----|
| Tabla 2. 1. Formas de transmisión de calor | 9 |
| Tabla 2. 2. Etapas de refrigeración por compresión | 10 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Tabla 3. 1. Tipos de Isotermas según IUPAC | 26 |
| Tabla 3. 2. Comparación entre pares de trabajo | 28 |
| Tabla 3. 3. Pares de adsorción más utilizados | 30 |

RESUMEN

En esta investigación se ha desarrollado un ANÁLISIS SOBRE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ADSORCIÓN; su importancia radica en la producción de frío, aplicada para la preservación de productos, además del confort que la sociedad requiere sin afectar el medioambiente. Al analizar los recursos teóricos disponibles, con el fin de conocer las tendencias del desarrollo de la refrigeración bajo el principio de la adsorción, se evidencia que el tema tiene marcado apego a factores ecológicos; que los pares de adsorción están compuestos por dos elementos uno que adsorbe y otro que desorbe, que hay dos tipos de procesos uno químico y otro físico, y que, si bien existen aportes de diversos autores respecto al tema, los antecedentes investigativos no son suficientes. Al comparar las tendencias más relevantes se establece que este proceso está condicionado principalmente por la presión y la temperatura, que no todos los líquidos o gases pueden desempeñarse como adsorbatos y no todos tienen la misma capacidad; que son varios los adsorbentes y adsorbatos que se han estudiado, y cuya selección depende de varios factores como la afinidad, costo, integridad, toxicidad, disponibilidad, entre otros, y su aplicabilidad no es absoluta sino relativa a cada caso de aplicación, por lo que no es posible señalar uno que sea el óptimo. El alcance de la investigación se limita al campo teórico sin aplicación práctica.

Palabras clave: Adsorción, adsorbente, adsorbato, par de adsorción, temperatura, presión, masa adsorbida.

ABSTRACT

In this research, an analysis on air conditioning system by adsorption was carried out; its importance lies in the production of cold, applied to the preservation of products, in addition to the comfort that society requires without affecting the environment. By analyzing the theoretical resources available, in order to know the trends of the development of refrigeration under the principle of adsorption, it is evident that the subject has strong attachment to ecological factors; that the pairs of adsorption are composed of two elements that adsorb and another that desorb, that there are two types of processes, one chemical and the other physical, and that although there are contributions from various authors regarding the subject, the investigative antecedents are not sufficient. When comparing the most relevant trends, it is established that this process is conditioned mainly by pressure and temperature, that not all liquids or gases can act as adsorbates and not all have the same capacity; that there are several adsorbents and adsorbates that have been studied, and whose selection depends on several factors such as affinity, cost, integrity, toxicity, availability, among others, and its applicability is not absolute but relative to each case of application, so that it is not possible to indicate one that is optimal. The scope of the research is limited to the theoretical field without practical application.

Keywords: Adsorption, adsorbent, adsorbate, adsorption torque, temperature, pressure, adsorbed mass.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación y alcance

En los tiempos actuales no se puede prescindir de la producción de frío, no solamente por brindarse confort a las personas en ambientes dentro de edificaciones principalmente en zonas de clima tropical, sino también porque es necesario para la preservación de productos en la industria alimentaria, cadena de frío para transportar alimentos, fabricación de hielo, refrigeración doméstica. Uno de los usos más relevantes, es la producción de frío para la preservación de vacunas, biológicos y órganos humanos, para ser transportados a sitios poco accesibles.

Conforme al tema planteado relacionado con la refrigeración, se trata de información novedosa, con antecedentes investigativos realizada por varios autores y que debido a la trascendencia que tiene, amerita actualizar información desde un enfoque bibliográfico o basado en argumentos teóricos, que servirán como referentes para el desarrollo de futuras investigaciones que requieran una investigación experimental.

El alcance que tiene la investigación se delimita al campo teórico sin aplicación práctica, con el propósito de conocer las tendencias del desarrollo de la refrigeración bajo el principio de la adsorción, lo cual significa que se trata de un tema con marcado apego a factores ecológicos.

1.2. Planteamiento del problema

Para refrigerar de manera continua un ambiente o espacio se requiere un fluido refrigerante, el mismo que bajo el principio de las leyes de la Termodinámica intercambia calor para luego devolver frío. Siguiendo ese principio, las características de los primeros refrigerantes si bien es cierto

ayudaron a cumplir el objetivo planteado, sin embargo, muchos de ellos han incidido de forma negativa en el medio ambiente, afectando la capa de ozono, y así permitiendo lograr incidencia de los rayos ultra violeta que afecta a los seres vivos. En la actualidad en el mercado ya existen alternativas ecológicas de fluidos refrigerantes o tecnología que utiliza otros medios refrigerantes sin que afecte el entorno ambiental.

Una de las alternativas en el campo de la refrigeración ecológica, es mediante la aplicación de los principios del proceso de adsorción, donde se usan diferentes tipos de adsorbentes y el uso de energía eléctrica complementaria es mínima. Considerando que la tendencia actual a nivel global es reducir el consumo de energía contaminante debido al uso de combustibles fósiles, resulta interesante encontrar modos de producir energía de la forma más eficiente y menos contaminante.

Debido a ello se requiere de información científica actualizada que facilite conocer los resultados de investigaciones recientes y las tendencias del desarrollo de temas afines, especialmente relacionados con los sistemas de enfriamiento por adsorción, tomando en cuenta su limitación en cuanto al número de publicaciones. Ello se puede solucionar a partir del conocimiento que ofrece la información actualizada de este trabajo investigativo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Actualizar información bibliográfica sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía.

1.3.2. Objetivos específicos

- Revisar principios teóricos y conceptuales respecto a la climatización y el principio de los sistemas de enfriamiento por adsorción

- Realizar análisis comparativo de las tendencias más relevantes respecto a sistemas de enfriamiento por adsorción, empleando técnicas documentales y de campo.
- Realizar una discusión de resultados y conclusiones.

1.4. Tipo de investigación

La presente investigación tiene un carácter cualitativo, porque se enfoca en una revisión teórica-conceptual basada en la recopilación bibliográfica con el propósito de actualizar información respecto a un tema en particular como son los sistemas de refrigeración basados en la adsorción.

De acuerdo con la propuesta del tema, el desarrollo del trabajo investigativo se alinea como analítico, documental con apoyo de un trabajo de campo. Es analítica debido a que acude a la búsqueda de conocimientos teóricos generales y los toma como referencia en el desarrollo de un tema en particular. Es una investigación documental, porque se accede a archivos de fuentes confiables bibliográficas, de artículos científicos y portales institucionales; y es de campo porque además de obtención de información de manera personal por parte del investigador, se acude al criterio de varias personas relacionadas con el desempeño de actividad en campos afines al tema.

1.5. Métodos y técnicas

El tema propuesto se relaciona con la revisión bibliográfica de lo que comprende la refrigeración, delimitándose al principio de adsorción. Para ello se empieza con la búsqueda y recopilación de información científica que tiene relación con los sistemas de enfriamiento por adsorción; luego se estudia los resultados de las publicaciones más importantes, y un análisis comparativo de las tendencias más destacadas, para posteriormente realizar una discusión de los resultados y emitir las conclusiones.

Este trabajo se adapta a un método deductivo ya que se parte de conocimientos universales para obtener conclusiones particulares e inductivo porque a partir de hechos singulares o criterios dispersos se llega a una conclusión.

Para obtener la información de campo se utiliza la técnica de la entrevista a expertos o personas que desempeñan cargos que implica tomar decisiones, en actividades afines al tema, y para lo cual se utiliza como instrumento, un cuestionario con preguntas de tipo abiertas.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo corresponde a la revisión de principios teóricos y conceptualizaciones sobre sistemas de refrigeración, con énfasis en sistemas de refrigeración por adsorción. Se describe brevemente los principios en general para luego enfocarse en las características, sus partes y principio de funcionamiento de estos sistemas.

2.1. Sistemas de refrigeración

Antes de que se conocieran los sistemas de refrigeración mecánicos y térmicos, las personas enfriaban sus alimentos con hielo, el cual se lo tomaba y traían desde los glaciares de la parte alta de las montañas, almacenando el hielo en fosas cavadas en la tierra y aisladas con madera y paja. Debido a costos y logística, no toda la gente podía obtener hielo de esa manera por lo que salaba o ahumaba sus alimentos para conservarlos.

El hielo era el principal medio de refrigeración hasta comienzos del siglo XX aunque aún se utiliza todavía en algunos países. El primer sistema práctico de refrigeración mecánica que consistía en la circulación de aire para enfriar fue inventado por el físico estadounidense John Corrie en 1884, con el propósito de refrescar las salas de enfermos en un hospital de la Florida (PNUD , 2018). Con el apareamiento de la electricidad al principio de este siglo, las plantas mecánicas de refrigeración sirvieron para varios usos en los campos e industrias como las cervecerías, pescaderías mataderos, y fabricación de hielo.

La refrigeración es de interés en la conservación de productos biológicos, en el confort de seres vivos y en la climatización de ambientes. Dentro del campo industrial se utiliza en la producción de alimentos cárnicos y de la leche (Papadopoulos, Oxidisis, & Kiriakis, 2003). Después de la segunda Guerra Mundial el desarrollo de pequeños compresores herméticos facilitó la

fabricación de los refrigeradores y congeladores para uso en hogares. Ahora hay numerosas aplicaciones para plantas de refrigeración: como conservación de productos alimenticios, cadenas de frío, plantas con aire acondicionado, plantas secadoras, sistemas de enfriamiento de agua, bombas de calor, fábricas de hielo (Danfoss , 2015).

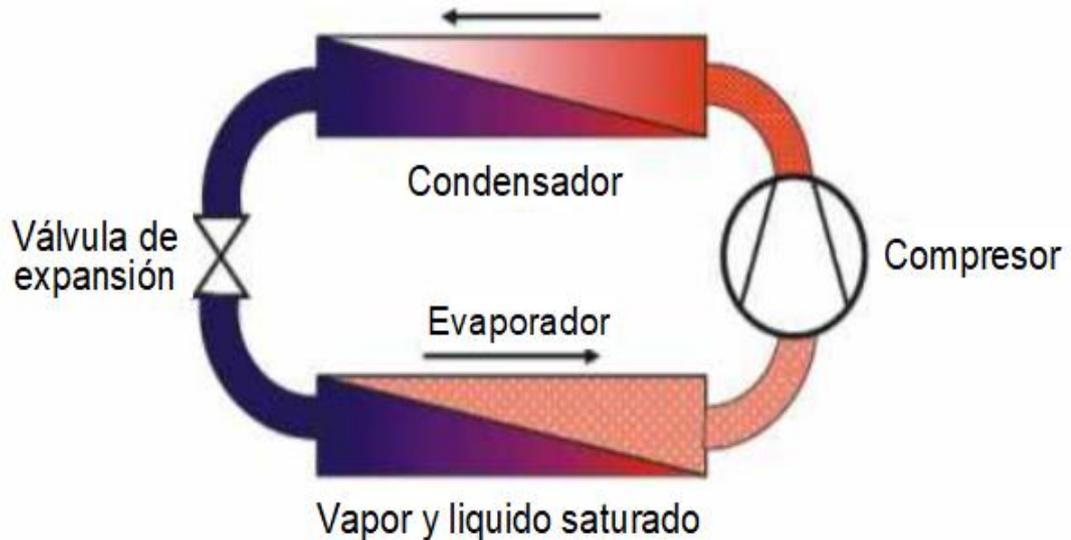


Figura 2. 1.Principio funcionamiento de refrigeración
Fuente: (PNUD , 2018)

2.1.1. Termodinámica

Para poder entender los conceptos básicos de la refrigeración, es importante revisar los conceptos más afines al tema (Sánchez, Cabello, Patiño, & Lopis, 2013).

Primera Ley, Conservación de la energía.

La energía no se crea ni se destruye solo se transforma.

$$Q_o + Q_G \approx Q_m \quad (1)$$

Segunda ley, el calor como forma de energía siempre va a fluir de un cuerpo con temperatura más alta a otro con temperatura más baja.

La variación de la entropía en el ciclo por la maquina es nulo. Esta ley da lugar al proceso de refrigeración, donde los materiales a ser refrigerados desprenden su calor interno para dirigirlo a otro fluido o cuerpo con menor temperatura.

$$\Delta S_u = -\frac{Q_o}{T_o} - \frac{Q_G}{T_G} + \frac{Q_m}{T_m} \geq 0 \quad (2)$$

El calor es una forma de energía que siempre va a fluir de una substancia caliente a una más fría. El calor provoca cambios de estado, un fluido líquido puede cambiarse a vapor solo con la absorción de calor y viceversa un vapor puede condensarse si se le extrae calor.

Suponiendo procesos reversibles, la combinación de los dos enunciados (1) y (2) propone la expresión del COP (rendimiento) del aparato como "generador de frío" (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012), es decir:

$$\varepsilon_{MF} = \frac{Q_o}{Q_G} = \left[\begin{matrix} T_G - T_m \\ T_G \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} T_o \\ T_m - T_o \end{matrix} \right] \quad (3)$$

Conforme al criterio de Torella y otros, la adsorción se caracteriza por tener una reacción superficial que se efectúa entre un elemento sólido, el absorbente, con una superficie grande, y un vapor con coincidencia química. Elementos con gran porosidad como el carbono activo, silica y zeolitas, sirve cómodamente como sólidos absorbentes (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012). La adsorción tiene una reacción con elevación de temperatura, dependiendo de la magnitud de las fuerzas de *van der Waals*¹ que se originan, como producto de las variaciones de fase y de los enlaces químicos (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012).

¹ Las fuerzas de Van der Waals son fuerzas intermoleculares de naturaleza eléctrica que pueden ser atractivas o repulsivas. Hay una interacción entre las superficies de las moléculas o átomos, distinta en esencia de los enlaces iónicos, covalentes y metálicos que se forman en el interior de las moléculas.

Con calores inferiores a cero, los movimientos moleculares permiten que los gases se peguen a la superficie, para, después, integrarse a la estructura del sólido (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012). Se genera un proceso invertido, al agregar calor, lo cual produce una desorción del vapor con presión y temperatura altas, fluyendo hacia el condensador, expansor y evaporador, presentándose el efecto deseado de enfriamiento (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012).

El concepto de refrigeración está asociado con el de enfriamiento. Un cuerpo más caliente significa que tiene una temperatura mayor frente a otro más frío debido a una mayor actividad de las moléculas. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica los de más energía (mayor temperatura) cederán calor espontáneamente a los fríos. En el proceso de calentamiento el caliente se enfría y el frío se calienta hasta que sus temperaturas se hacen iguales (Cabrera & Muñoz, 2008).

Las sustancias que forman los cuerpos se encuentran fundamentalmente en tres estados: sólido, líquido o gas. En el proceso de intercambio de calor una sustancia pasa a otra recibiendo o donando energía en forma de energía calorífica. Un líquido puede evaporarse (pasar de líquido a gas) absorbiendo calor, en el proceso inverso descargando calor. Un sólido puede licuarse (pasar de sólido a líquido) absorbiendo calor y de lo contrario descargando (Cabrera & Muñoz, 2008). Para estos procesos hay que tomar en cuenta que la separación entre las moléculas es menor en los sólidos y mayor en los gases.

Cuando se realiza un proceso de evaporar un líquido o licuar un sólido existe la posibilidad de tener un cuerpo frío que absorberá calor de otros cuerpos que se encuentre alrededor. Para procesos experimentales, los líquidos son más utilizados debido a que se evaporan al disminuirles la presión y reciben calor. Igualmente, cuando a un gas se le disminuye la presión, este se expande y baja su temperatura, lo cual lo convierte en un cuerpo frío.

Existen tres formas de transmitir el calor: Por Conducción, por Convección y por Radiación.

Tabla 2. 1. Formas de trasmisión de calor

| Forma | Descripción |
|------------|---|
| Conducción | El calor es transferido de la parte más caliente del material a la parte más fría, este proceso de transferencia ocurre principalmente en metales que son buenos conductores del calor. Ello explica porque los metales a temperatura ambiente dan sensación de estar fríos. |
| Convección | Este tipo de transferencia de calor ocurre exclusivamente en fluidos en estado líquido o gaseoso y ocurre cuando un fluido se calienta y se expande volviéndose más liviano que la otra parte del fluido circundante, elevándose y dejando su lugar al fluido más frío. Este proceso se observa en el aire acondicionado. |
| Radiación | Este proceso de transferencia de calor se observa en el fenómeno de calentamiento de la tierra por los rayos del sol que aun cuando se encuentra a una distancia considerable, se percibe el calor que emite. |

Fuente: (PNUD , 2018)

2.2. Refrigeración por compresión

Si al evaporar una sustancia y ésta absorbe calor, existirá la posibilidad de enfriar un ambiente más caliente, entonces el calor fluye desde los alrededores hacia la sustancia que se está evaporando (más fría). Si se requiere enfriar a una temperatura más baja se necesita evaporar a una presión y temperatura más baja, por lo que hay que considerar que la temperatura de evaporación de todas las sustancias, incluyendo los refrigerantes, depende de su presión. Para conseguir ambientes a temperaturas bajas se requiere tener refrigerantes evaporando a presiones

bajas, como en el caso del refrigerante 12 (difluor, dicloro metano CF₂Cl₂) (Mande, 2000).



Figura 2. 2. Sistema de refrigeración típico
Fuente: (Virtus, 2016)

Seguendo el Manual Buenas Prácticas en Refrigeración publicado por el PNUD (2018), los principios de funcionamiento de la refrigeración por compresión de vapor pueden dividirse en cuatro operaciones: evaporación, compresión, condensación y expansión.

Tabla 2. 2. Etapas de refrigeración por compresión

| Etapa | Descripción |
|-------------|---|
| Evaporación | En esta etapa del ciclo de refrigeración, el refrigerante llega al evaporador en estado parcialmente líquido y a baja presión, cuando se pone en contacto con el medio a enfriar, el refrigerante al absorber calor del medio inicia su ebullición evaporándose a lo largo del evaporador hasta alcanzar un sobrecalentamiento. |

| | |
|--------------|---|
| Compresión | Cuando el refrigerante abandona el evaporador, se encuentra como vapor sobrecalentado y es dirigido hacia el compresor donde el refrigerante es succionado para comprimirlo, con lo cual se eleva su presión (medio mecánico), utilizando energía de un motor eléctrico integrado al compresor. |
| Condensación | El refrigerante ahora con una alta presión y un mayor grado de sobrecalentamiento es enviado hacia el condensador para que libere su exceso de calentamiento hacia el exterior, luego de lo cual puede volver al estado líquido, mediante enfriamiento con aire, aunque existen condensadores que utilizan agua como medio de enfriamiento. |
| Expansión | El líquido de alta presión que sale del condensador se traslada hacia el dispositivo de expansión en donde se baja su presión y parte del líquido se evapora. En esta etapa, se dispone de un refrigerante parcialmente líquido frío listo para iniciar todo el ciclo de nuevo. |

Fuente: (PNUD , 2018)

2.3. Sistemas de refrigeración por adsorción

Desde hace mucho tiempo este principio ha sido empleado en diferentes campos, aunque no es hasta 1925 en el que aparece la primera invención o máquina de producción de frío que empleaba una mezcla silica gel-SO₂. En 1927 se diseñó un aparato de refrigeración por adsorción utilizando silica-gel, siendo reemplazada al poco tiempo por la propuesta del método de refrigeración por compresión, debido a la desventaja de su funcionamiento intermitente (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012). Esa innovación sacó al sistema de adsorción del mercado, de tal forma que este último método se ha mantenido hasta los tiempos actuales. En cambio el de adsorción ha tenido dificultades para avanzar.

Tchernev fue el primero en introducir el principio de los pares, al experimentar con zeolita-agua en ambientes herméticos de enfriamiento por adsorción. Este principio operaba en ciclos discontinuos, debido a que durante el día utilizaba las emisiones de calor del sol para secar la zeolita, y luego en la noche producir el frío buscado, es decir, el trabajo del uno dependía del otro, (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012), (Cabrera & Muñoz, 2008).

A principios de 1990 Critoph y otros desarrollaron un refrigerador que aprovechaba la energía solar, proyecto que fue recomendado por las Naciones Unidas para el almacenamiento de vacunas a ser utilizadas en áreas subdesarrolladas. El agua fue utilizada como medio refrigerante por la firma Carrier Co., que construyó sistemas de aire acondicionado en cuales utilizó el par sílica-gel-agua como medio de trabajo (Whang & Olvera, 2006).

2.3.1. Principio de funcionamiento

A decir de Abdullah (2011) estos sistemas basan su funcionamiento en la propiedad que tienen ciertos sólidos con alta área superficial y porosidad, lo cual les permite adsorber grandes cantidades de un vapor determinado, para luego liberar este vapor cuando sube su temperatura. El refrigerante presente como vapor es adsorbido en la superficie de un material adsorbente (Veloz Arias, 2018).

La adsorción tiene la característica de revertirse a través de lo cual, un elemento gaseoso (*adsorbato*) puede adherirse a un sólido (adsorbente), con características de porosidad (Fernández Pino, 2011). Este proceso tiene una reacción exotérmica, por la condensación del adsorbato sumada a la energía que se genera en la fusión adsorbente-adsorbato. De la misma manera, la desorción es lo contrario de la adsorción, lo cual significa, que como producto de este proceso hay una reacción endotérmica (Guallar & Lorente, 2005).

El material adsorbido es retenido de manera física sin demasiada fuerza, para luego soltarse (desorbido) sin ningún obstáculo, al aplicarse calor o al vacío.

El proceso de adsorción se debe a las fuerzas de Van der Waals entre los átomos o moléculas del refrigerante y la superficie del adsorbedor (Veloz Arias, 2018); (Abdullah, 2011).

Frente a otros procedimientos, el de refrigeración se diferencia con la disminución de la temperatura (enfriamiento) cuando se aplica la adsorción, donde el lecho adsorbente aspira todo el elemento gaseoso que viene del evaporador (Rivera & Zavala, 2014), siendo el equivalente del compresor en un sistema de compresión de vapor (Abdullah, 2011).

Aunque existen otras ecuaciones como las de Langmuir y Brunauer-Emmet y Teller (BET), debido a la mayor aplicabilidad, para entender el fenómeno de la adsorción, se da mayor relevancia a la función de Freundlich.

A partir de consideraciones empíricas, Freundlich llegó a la ecuación:

$$x / m = Kp^{1/n}$$

Donde:

x: masa del adsorbato (kg)

m: masa del adsorbente, (kg)

p: presión de equilibrio del adsorbato (bar)

K y $1/n$ son constantes para un adsorbato y adsorbente, dados, y para una temperatura particular

El proceso empieza con un lecho impregnado de refrigerante, al cual se aplica calor para liberar este refrigerante, luego de ello pasa a un condensador donde se le retira el calor presente y evacúa en estado líquido; luego se pasa por una válvula de expansión donde se disminuye su presión y temperatura (Veloz Arias, 2018). Con temperatura baja el refrigerante entra al evaporador donde recibe calor del producto o fluido a enfriar, el refrigerante al recibir calor se evapora y finalmente entra al otro lecho de adsorbente donde es atrapado (adsorbido) (Santori, Sapienza, & Freni, 2012). Esto se repite hasta que el lecho que se somete a una elevación de temperatura se acaba o deja de tener

refrigerante (Veloz Arias, 2018). De esta forma se produce el efecto frigorífico de manera continua.

Cuando el fluido circula alrededor de la superficie en un lecho estable, el soluto originalmente se expande desde el líquido hacia la superficie externa de la superficie. Después el soluto se difunde desde adentro hacia la superficie, con una concentración unitaria de área mínima, por lo conviene utilizar sólidos con alto grado de porosidad que disponen de áreas internas muy extensas (Fernández Pino, 2011).

Los ciclos de una máquina de adsorción se pueden analizar en el diagrama de Clapeyron. En los diagramas que se describen a continuación, P-V representan gráficamente la actuación de una sustancia, en sus diferentes estados frente a la variación de sus coordenadas termodinámicas. Dentro de los procesos reflejados en estos diagramas se destaca que la representación de los procesos que ocurren a temperatura constante, mediante las curvas llamadas isothermas (Orjuela & Hurtado, 2010 , p. 217).

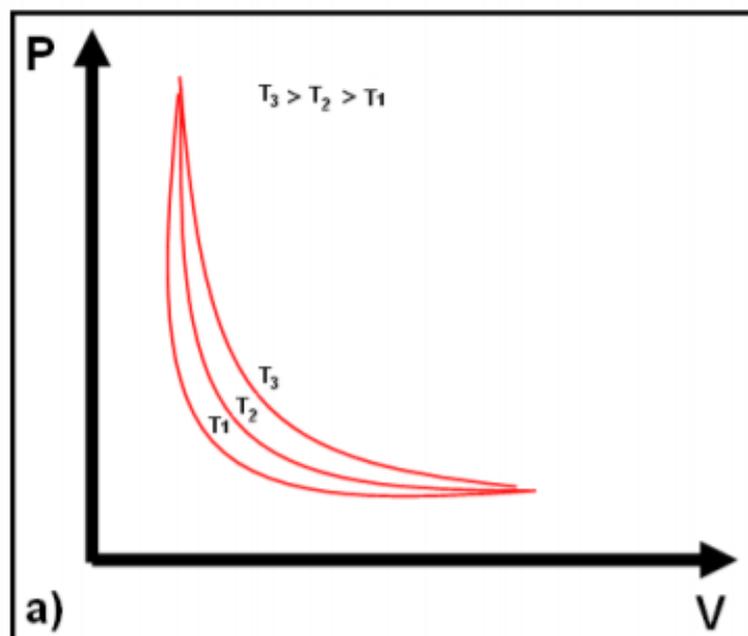


Figura 2. 3. a) Isothermas para un Gas Ideal
Fuente: (Orjuela & Hurtado, 2010)

En la figura anterior (a), se presentan líneas isotermas de un gas ideal bajo diferentes temperaturas; allí, se puede observar la curva hipérbola descendente al aumentar el volumen y disminuir la presión (Orjuela & Hurtado, 2010 , p. 217)

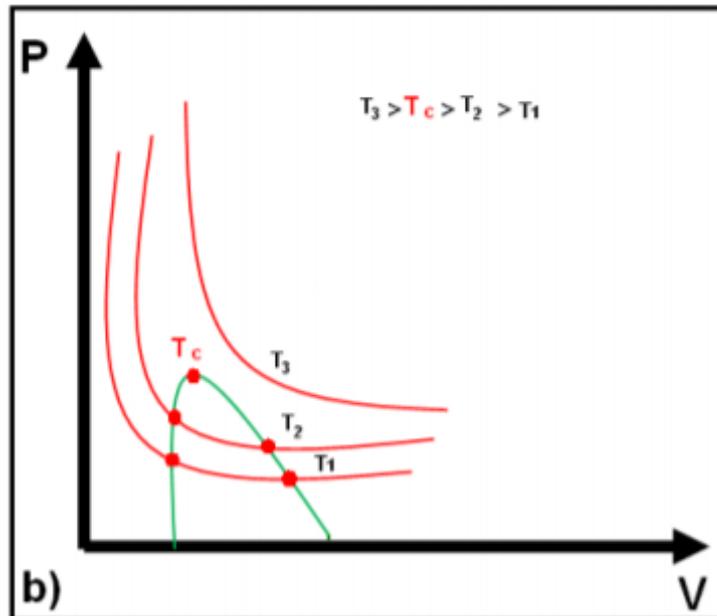


Figura 2. 4. b) Isothermas en un diagrama pV para gases no ideales
Fuente: (Orjuela & Hurtado, 2010)

En la figura anterior (b), el diagrama P-V muestra que a temperaturas por debajo de T_c temperatura crítica, las isothermas tienen regiones casi planas en las cuales se puede comprimir el material sin aumentar o disminuir la presión tan drásticamente, ello indica que dicha zona revela condiciones de equilibrio en las fases líquido-vapor, al disminuir el volumen el material pasa a una fase de vapor a líquido, aun así con un cambio mínimo de la presión, al alcanzar totalmente el estado líquido y cualquier compresión posterior genera un incremento brusco en la presión del sistema (Orjuela & Hurtado, 2010 , p. 217)

2.3.2. Partes de un sistema de refrigeración por adsorción

Este proceso generalmente está conformado por dos lechos de adsorbente (Veloz Arias, 2018); un condensador, un evaporador, y una válvula lugar donde se obtiene el efecto frigorífico. El enfriamiento que se requiere tanto en

el condensador como en el lecho que realiza la adsorción se consigue entregando calor al ambiente externo (Santori, Sapienza, & Freni, 2012).

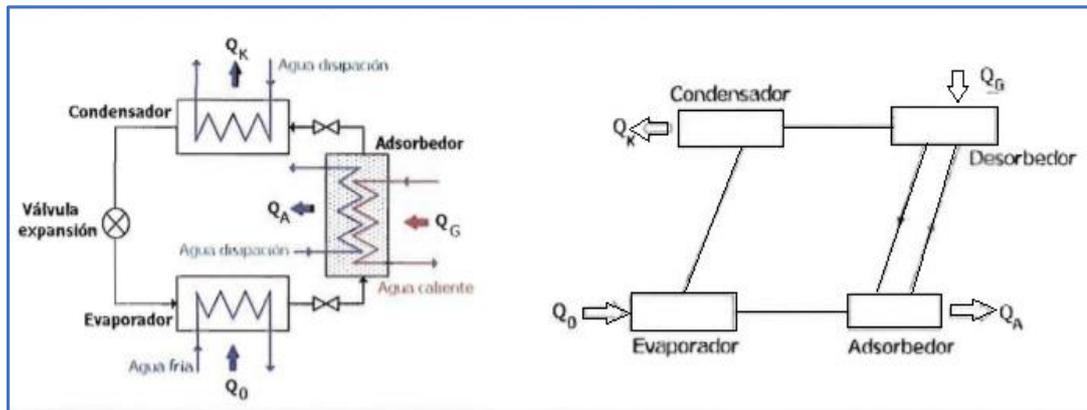


Figura 2. 5. Esquema básico de una máquina de adsorción
Fuente: (Sánchez, Cabello, Patiño, & Llopis, 2013)

Este basa su principio en un adsorbedor, el cual se integra, de forma alternante a un evaporador y a un condensador (representado en la figura 2.5.), también a una punto de calor que tiene alta temperatura, hacia otra fuente intermedia de disipación, para finalmente conectarse a la fuente de temperatura baja, donde se manifiesta el efecto de frío (Veloz Arias, 2018). Las máquinas de adsorción no disponen de piezas móviles y utilizan muy poca electricidad cuando se trata de accionar las bombas de vacío bajo una capacidad establecida (1.5 kW).

El procedimiento funciona en forma discontinua, cuando un elemento en estado sólido tiene dentro vapor refrigerante en condiciones de baja temperatura y presión; pero cuando termina de ejecutarse este paso, dicho material necesita ser regenerado (desorción) a una presión y temperatura altas (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012). Para disponer de un enfriamiento de forma continua, se debe contar con un par de conjuntos, alternándose en el tiempo, de tal forma que, cuando uno está enfriando, el otro se encuentra regenerando, para luego repetir el ciclo de forma continua (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012).

El ciclo de producción de frío de esta máquina es parecido al de compresión convencional mediante el cual se reemplaza la compresión mecánica por una

de principios térmicos. La máquina adquiere calor de una fuente de energía tradicional, un sobrante de energía térmica o una alternativa de tipo renovable como la luz del sol (Fernández Pino, 2011)

Una enfriadora de adsorción es una máquina que contiene cuatro cámaras, las mismas que se pueden apreciar en la figura 2.6, diferenciándose con colores:

- Una evaporadora en la parte baja del prototipo
- Dos compartimentos de adsorción en la parte del centro (adsorción/desorción).
- Una cámara para el condensador en la parte de arriba (Fernández Pino, 2011)

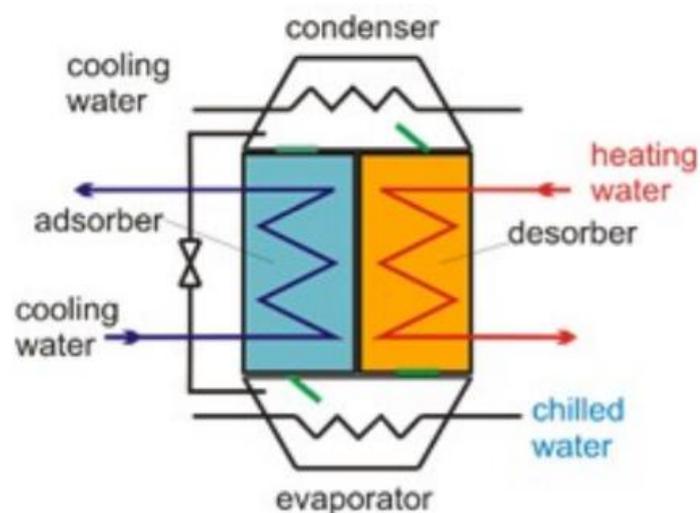


Figura 2. 6. Esquema de una enfriadora de adsorción de simple efecto
Fuente: (Fernández, 2011)

Para entender el funcionamiento de la máquina de adsorción, se describe a continuación un ejemplo donde los elementos de experimentación son el agua (refrigerante) y el gel de sílice o zeolita (adsorbente). Actúa con un ciclo de operación de tiempo corto, período en el que se ejecutan todas las etapas graficadas en la figura 2.7 (Fernández Pino, 2011).

En el evaporador, el agua del sistema de frío contribuye para enfriar durante el proceso donde se lo requiera, vaporizando este líquido que se encuentra

son una presión bastante baja (Etapa 1). La válvula que hace conexión del evaporador con la cámara de adsorción (cámara 1) se encuentra abierta y la válvula que empata esta cámara con el condensador está cerrada. El vapor de agua entra en la cámara, la cual está a una presión algo inferior a la del evaporador (Fernández Pino, 2011)

En la cámara 2, se lleva a cabo el proceso de *desorción* para regenerar el adsorbente que está saturado de vapor de agua producto del proceso del ciclo reciente. Dado que este proceso tiende a bajar la temperatura, se transfiere agua caliente por el intercambiador. La válvula que hace conexión del condensador con la cámara de desorción se encuentra abierta, mientras que la válvula que empata esta cámara con el evaporador está en posición de cerrada (Fernández Pino, 2011).

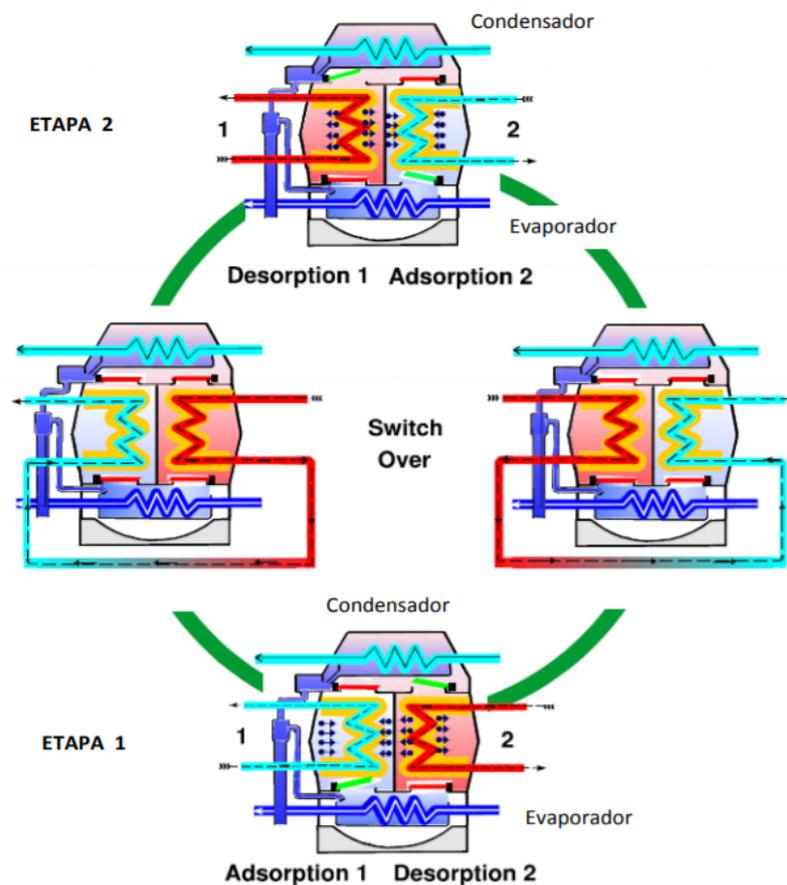


Figura 2. 7. Etapas de una enfriadora de adsorción de simple efecto
Fuente: (Fernández, 2011)

En el condensador, el fluido refrigerante condensa, cediendo calor al agua del circuito de torre. El vapor de agua condensado pasa al evaporador a través de la válvula de expansión, cerrándose el ciclo (Fernández, 2011).

Cuando el adsorbente de la cámara 1 está saturado de agua y el adsorbente en la cámara 2 está seco, la máquina automáticamente invierte las funciones de las dos cámaras. Se cierran las válvulas que conectan ambas cámaras con el evaporador y condensador, y se abre las válvulas entre las dos cámaras para que las presiones se igualen. A continuación, el agua caliente de la cámara de desorción (cámara 2) se hace circular a través de la cámara 1 para transferirle el calor residual de la cámara 2 y comenzar el proceso de calentamiento de ésta. El proceso de inversión de las cámaras se completa y comienza el proceso de desorción en la cámara 1 y el proceso de adsorción en la cámara 2 (Etapa 2), repitiéndose el proceso descrito (Fernández, 2011).

2.3.3. Tipos de adsorción

Hay dos: adsorción química y adsorción física tal como se describe a continuación (Fernández Pino, 2011)

a) Adsorción Física

Conocida como fisisorción se desarrolla si el adsorbato y la capa exterior del adsorbente se integran como consecuencia de la intervención de fuerzas de Van der Waals. Las partículas adsorbidas están integradas de forma débil a la superficie, con temperaturas generadas mínimas, en comparación con la temperatura de vaporización del adsorbato. El incremento del calor reduce mucho la adsorción (Fernández Pino, 2011)

b) Adsorción química

Se ocasiona cuando las partículas adsorbidas entran en reacción bajo un principio químico con la capa exterior. Este tipo de adsorción conocido como quimisorción, se destaca por la unión química muy integrada entre el adsorbato y el adsorbente (Fernández Pino, 2011), por lo que es más difícil

de revertir y necesita una mayor cantidad de energía para descartar las moléculas adsorbidas respecto a la adsorción física. Hay varios elementos preferidos por los investigadores, pero entre todos, uno de los más utilizados es el cloruro de calcio (Fernández Pino, 2011), (Tokarev, Glanzev, & Aristov, 2002)

Adsorbentes

Los adsorbentes son sales orgánicas e inorgánicas, micro porosos adsorbentes con estructura de alta superficie específica (200-2000 m²/g). Las más empleadas son: la zeolita, carbón activado, gel de sílice, alúmina activa, y otras (Restuccia, Fren, & Vasta, 2004). El proceso se realiza con elevación de temperatura del calor (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012).

Carbón activado

Para fines comerciales se lo prepara a partir de carbones en materiales carbón-contenedores como la antracita o lignito, madera, cascara de nuez, del petróleo, Son pirolizados y carbonizados aplicando calor que alcanza altas temperaturas. Para activar se aplican gases oxidantes como el dióxido de carbono en temperaturas más altas, de esa forma se forman los microporos (Lu, X, & Zhu, 2008).



Figura 2. 8. Carbón activado
Fuente: (BION , 2017)

Alúmina activa.

La Alúmina Activada se obtiene a partir del Hidróxido de Aluminio mediante dehidroxilación que produce un elevado grado de partículas muy porosas, el cual puede tener un área superficial por arriba de 200 m²/g. La alúmina se usa de manera amplia como desecante (para deshidratar el aire) y como filtrante de Fluoruro (F), Arsénico (As) y Selenio (Se) en agua potable. Está compuesta principalmente por Oxido (III) de Aluminio (II) (Al₂O₃) y se destaca por tener una gran área superficial, con una capacidad de gran porosidad casi como túneles (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012).



Figura 2. 9. Alumina activa
Fuente: (Ali Aliexpress , 2018)

Zeolita.

Otro adsorbente es la estructura cristalina de aluminosilicato conocida como “zeolita”, que posee poros de tamaño uniforme, a través de toda su estructura de cristal. La estructura de cristal de los 118 tipos conocidos de zeolitas se determina por la relación de silicio a aluminio en el cristal cuando este cristal se forma. Toda la zeolita posee una afinidad por las moléculas polares, tales como el agua y contiene aluminio. Las zeolitas se desaluminizan por medio del intercambio del aluminio por silicio sin cambiar la estructura del cristal (CATC, 2012).



Figura 2. 10. Zeolita
Fuente: (Vargas, 2016)

Gel de sílice

El silica gel se conforma básicamente de sílice pura, la cual tiene una gran predisposición para efecto de la adsorción del vapor de agua –esencialmente a altas presiones, y por esas características tiene varias aplicaciones, entre las cuales se destaca el uso para deshumectación (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012). Es un adsorbente preparado por coagulación de partículas de una solución coloidal de ácido silícico (3 a 5 nm) seguido por una deshidratación controlada. Partículas esféricas de gel de sílice se preparan mediante un proceso de secado mediante atomización de hidrogel con aire caliente (Torrella, Sánchez, Cabello, & Llopis, 2012)



Figura 2. 11. Silica gel activada
Fuente: (Jincheng , 2017)

CAPITULO 3

SITUACIÓN ACTUAL

3.1. Medición de la adsorción

Conforme el criterio de López (2004), la cantidad de gas adsorbido por la muestra es directamente proporcional a la masa m de la muestra, dependiente de la temperatura T , la presión p del vapor y de la naturaleza del sólido y del gas. Por lo que, si n es la cantidad de gas adsorbido, expresado en moles por gramo de sólido se tiene que:

$$n = f(p, T, \text{gas}, \text{sólido}) \quad (3.1.)$$

Para un dado gas adsorbido sobre un determinado sólido mantenido a una temperatura constante, la Ec. (3.1) se simplifica a:

$$n = f(p)_{T, \text{gas}, \text{sólido}} \quad (3.2.)$$

Si la temperatura es mantenida por debajo de la temperatura crítica de condensación del vapor se puede escribir la ecuación anterior como:

$$n = f(p/p_0)_{T, \text{gas}, \text{sólido}} \quad (3.3.)$$

La cual es una forma más usual. Aquí p_0 es la presión de saturación del vapor del gas. Las ecuaciones (3.2) y (3.3) son las expresiones generales que definen la *isoterma de adsorción*, lo cual equivale a, la relación a temperatura constante entre la cantidad de gas adsorbido y la presión (o la presión relativa p / p_0) (López, 2004).

La isoterma de adsorción es una de las formas más empleadas de manera rutinaria en laboratorio para la caracterización del área superficial de un

material sólido adsorbente, la manera más usual es el de la medición de isothermas de adsorción de nitrógeno como adsorbato a 77 grados Kelvin en un rango de presión de 0 a 100 kilopascales (Templeton, 2016).

Conforme se lleva a cabo un fenómeno de adsorción de un adsorbato sobre la superficie de un adsorbente, este último incrementa su peso y la presión del gas contiguo se reduce, en razón de ello, se conocen dos formas para medir la adsorción del adsorbato en la superficie del adsorbente: la medición del cambio en el peso del adsorbente (técnica gravimétrica) o la medición de la presión del gas adsorbato conociendo el volumen que lo contiene y el volumen de la muestra adsorbente de forma precisa (técnica volumétrica), todo esto a temperatura constante (Templeton, 2016). Los datos resultantes se les conoce como isoterma de equilibrio de adsorción. En la figura siguiente se observa de manera esquemática estos dos métodos de medición.

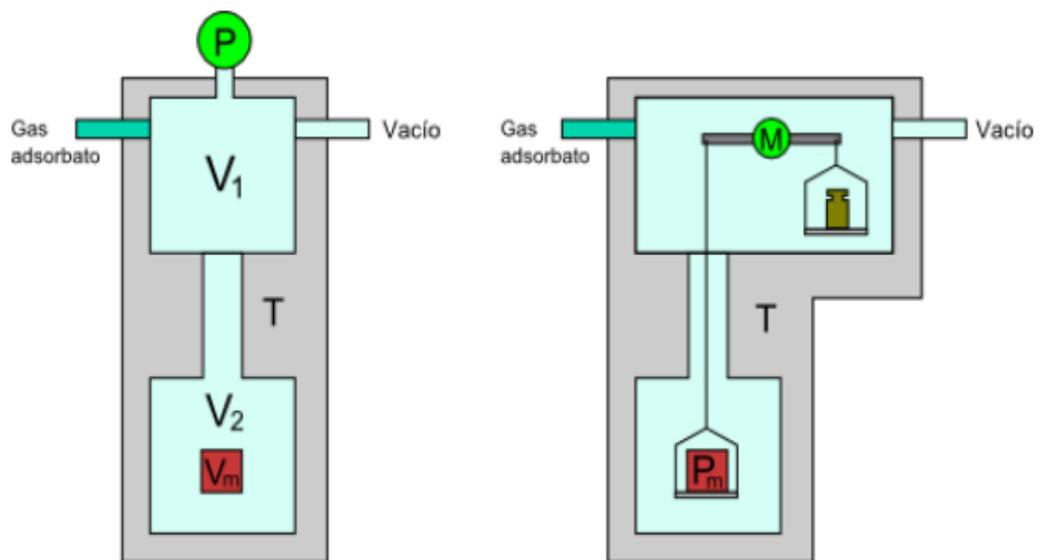


Figura 3. 1. Diagrama de los métodos de medición volumétrico y gravimétrico

Fuente: (Templeton, 2016)

3.1.1. Características de los adsorbentes

En adsorbentes de alta área superficial es conveniente distinguir entre la superficie interna y la externa. Por superficie interna se comprende las paredes de las grietas, poros y cavidades que son más profundas que anchas

y accesibles por el adsorbente. La superficie externa se refiere a la envoltura que rodea las partículas o aglomerados, se toma todas las prominencias y grietas que son más anchas que profundas. En el contexto de la fisisorción se clasifican los poros por sus tamaños de la siguiente manera (Templeton, 2016):

- Poros con anchos mayores a 50 nm se les llama macroporos
- Poros con anchos entre 2 y 50 nm se les llama mesoporos
- Poros con anchos que no exceden los 2 nm se les llama microporos

A continuación, se observa de manera gráfica, cuál es la diferencia entre los grupos de estructuras de poro. La estructura sólida porosa de interés investigativo es la micro porosa.

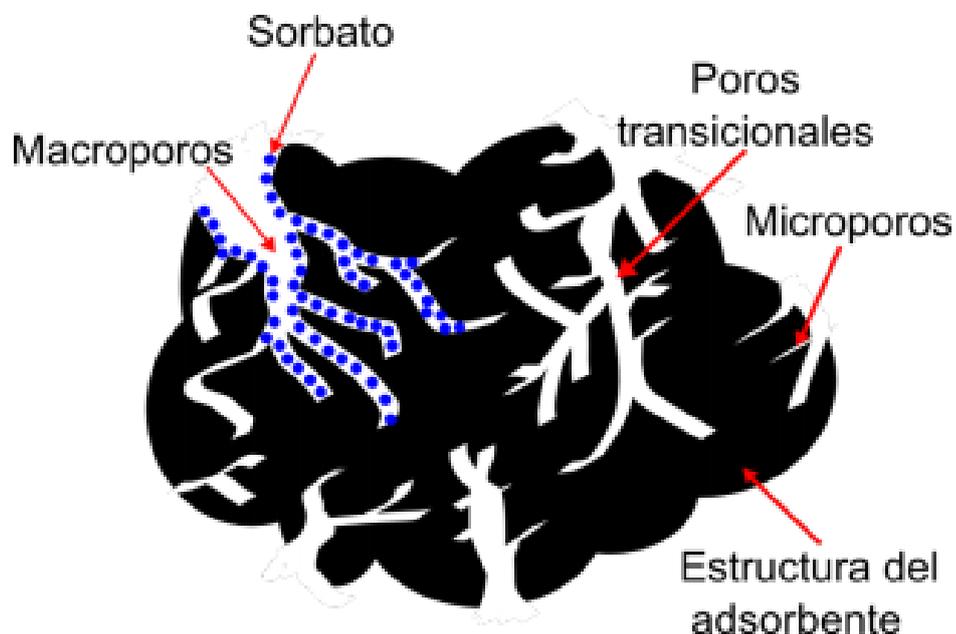


Figura 3. 2. Estructura interna de un grano de carbón activado
Fuente: (Templeton, 2016)

La mayoría de las isotermas de fisisorción conforme lo sugiere la Unión Internacional de Química pura y aplicada (IUPAC) pueden ser agrupadas en seis tipos que se muestran a continuación:

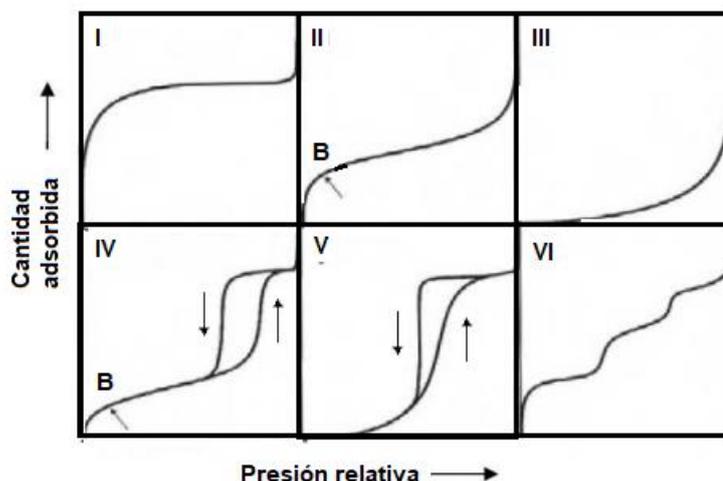


Figura 3. 3. Diagrama esquemático de tipos de isothermas de adsorción reconocidas por la IUPAC

Fuente: (López, 2004).

Tabla 3. 1. Tipos de Isothermas según IUPAC

| Tipo de Isotherma | Descripción |
|-------------------|--|
| I | Se dan en sólidos microporosos que tienen superficie externa relativamente pequeña, su capacidad principalmente depende de la cantidad y accesibilidad a los microporos antes que del área superficial interna (Jaramillo & Nagua, 2013) |
| II | Se presentan en adsorbentes macroporosos y no porosos, constituye adsorción sin limitaciones en multicapa y monocapa. (Jaramillo & Nagua, 2013). |
| III | No es común, por su curvatura indica una intervención importante de las interacciones adsorbato – adsorbato. |
| IV | Se caracteriza por el lazo de histéresis, que se encuentra asociado con la condensación capilar que se ejecuta en los mesoporos, y la limitación de su capacidad a altas presiones, inicialmente es una isoterma tipo II y es atribuida a la adsorción monocapa – multicapa. |
| V | Es poco común y está relacionada con la de tipo III en donde la interacción del adsorbente – adsorbato es débil. |

| Tipo de Isoterma | Descripción |
|------------------|--|
| VI | Corresponde a una superficie no porosa uniforme, la altura de cada escalón es la capacidad de cada capa adsorbida (monocapa) y se mantiene casi constante luego de 2 o 3 capas adsorbidas. |

Fuente: (López, 2004)

3.2. Pares refrigerantes

Como se mencionó anteriormente para la refrigeración por adsorción se realizan experimentación aplicando el principio de pares en sistemas cerrados, los cuales se caracterizaban por tener un funcionamiento discontinuo, de día recibían energía en este caso solar y en la noche emitían frío (refrigeraban), para posteriormente al siguiente día secar el adsorbente con el calor solar.

En este capítulo se hace una revisión de diferentes pares con los cuales se ha experimentado resultados de refrigeración.

Se entiende por par de adsorción la combinación adsorbente y adsorbato, que se emplea para el enfriamiento por adhesividad (Jaramillo & Nagua, 2013). La refrigeración de este tipo, se basa en los procesos de adsorción y desorción de un material en estado gaseoso sobre un cuerpo sólido.

El par adsorbente/refrigerante es el elemento fundamental de un ciclo de enfriamiento por adsorción, la selección del par adsorbente / adsorbato para aplicaciones de enfriamiento depende de las características de sus elementos, como son sus propiedades termodinámicas, químicas, físicas y su disponibilidad (Douss & Meunier, 2015).

Los adsorbentes son materiales porosos que pueden obtenerse de manera natural o sintética, se caracterizan porque los poros pueden ocupar hasta el 50% del volumen del material. Se destacan por tener grandes áreas

superficiales de los poros de hasta 100 m² a 2000 m² por gramo. Los adsorbentes hidrofílicos gel de sílice, zeolitas y alúmina porosa o activa, tienen una gran afinidad con sustancias polares como el agua. En cambio, los adsorbentes hidrofóbicos son no polares, y requieren de aceites y gases y se incluyen a sustancias como carbones activados, adsorbentes de polímeros y silicatos (Argumedo, 2018).

Se denomina *adsorbato* a la sustancia que se condensa en la superficie del adsorbente y en los sistemas de refrigeración por adsorción se desempeña como un refrigerante, por lo que conforme lo sostiene Argumedo (2018), el sorbato se debe seleccionar de acuerdo con la aplicación siempre y cuando cumpla en lo posible las propiedades físicas siguientes:

- Elevado calor latente de vaporización
- Suficiente estabilidad térmica
- Amigable para el medio ambiente
- No inflamable
- Inofensivo para la salud
- Presión de saturación entre 1 y 5 atm bajo la condición de las temperaturas de trabajo.

Respecto a los pares de adsorción, se han llevado a cabo comparaciones del coeficiente de operación (COP) o capacidad de rendimiento; *specific cooling power* (SCP) o capacidad de enfriamiento, temperatura de evaporación entregada y temperatura de la fuente de accionamiento entre los pares de trabajo de adsorción (Hassan, 2015).

En la tabla siguiente muestra el COP de los pares de adsorción en sistemas de refrigeración por adsorción. La COP máxima que se puede obtener es de 0,83, que se consigue utilizando pares de hidruros metálicos / hidrógeno. Los valores más altos de COP podrían considerarse utilizando carbón activado / metanol, carbón activado / etanol, hidruros de metal / hidrógeno y sílicagel y pares de cloruros / agua.

Tabla 3. 2. Comparación entre pares de trabajo

| Pares de trabajo | | COP | SCP | Te | Td |
|------------------------|--------------------------------------|------|--------|-----|-------|
| | | | W / kg | °C | °C |
| Adsorbentes físicos | Carbón activado / amoníaco | 0,61 | 2000 | -5 | 100 |
| | Carbón activado / metanol | 0,78 | 16 | 15 | 90 |
| | Carbón activado / etanol | 0,8 | N.A | 3 | 80 |
| | Sílica-gel / agua | 0,61 | 208 | 12 | 82 |
| | Zeolita / agua | 0,4 | 600 | 6,5 | 350 |
| Adsorbentes químicos | Cloruro de metal / amoníaco | 0,6 | N.A | -10 | 52 |
| | Hidruros metálicos / hidrógeno | 0,83 | 300 | -50 | 85 |
| | Óxidos metálicos / agua | N.A | 78 | 100 | 200 |
| Adsorbentes compuestos | Sílica-gel y cloruros / agua | 0,8 | N.A | 7 | 70 |
| | Sílica-gel y cloruros / metanol | 0,33 | N.A | -10 | 47 |
| | Cloruros y medios porosos / amoníaco | 0,35 | 1200 | -15 | 117,5 |
| | Zeolita y espuma de aluminio / agua | 0,55 | 500 | 10 | 250 |

Fuente: (Lu, Z; Wang, R; Xia, Z, 2016)

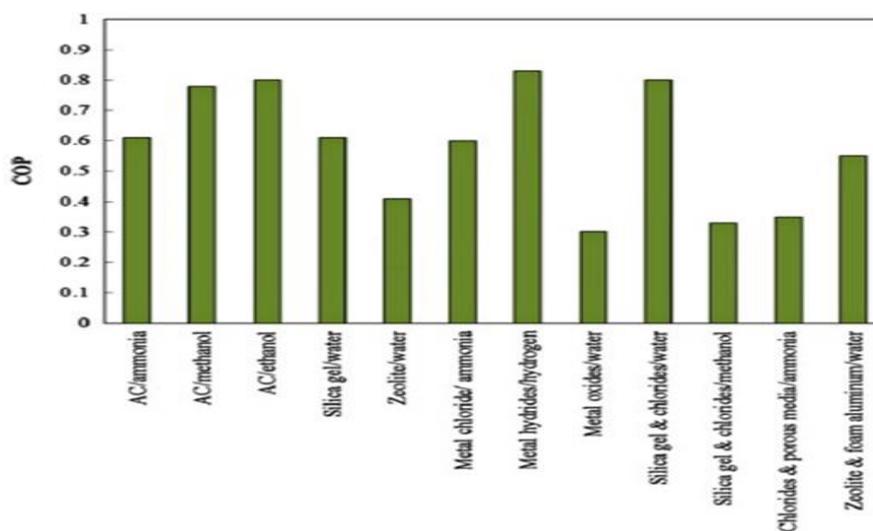


Figura 3. 4. Capacidad de rendimiento de los pares de adsorción en sistemas de refrigeración por adsorción

Fuente: (Lu, Z; Wang, R; Xia, Z, 2016)

En la Tabla anterior, se observa que, entre los pares de trabajo, la temperatura de conducción (Td) más baja es de 47°C, lo que permite la utilización del sistema de sílica-gel y cloruros / metanol. Así mismo considerando la temperatura más baja del evaporador (Te) de - 50°C, generada por el par

hidruros metálicos / hidrógeno es la ideal, hecho que posiblemente ocurre debido a que el hidrógeno tiene una temperatura de ebullición normal muy baja (-252.87°C).

Los adsorbatos más empleados en sistemas de refrigeración por adsorción son agua, amoníaco, etanol y metanol por disponer de un elevado calor latente de vaporización con respecto a otras sustancias, aunque sean tóxicos en estado concentrado al ser manipulados (amoníaco).

Los siguientes son los pares de adsorción más utilizados en el proceso de enfriamiento por adsorción.

Tabla 3. 3. Pares de adsorción más utilizados

| Par adsorbente/ refrigerante | Características |
|-------------------------------------|--|
| Carbón activado / amoníaco | <p>Los carbones activados se obtienen de la pirolización y carbonización de diversos materiales de origen, como carbón, madera, polímeros sintéticos, entre otros, a temperaturas de entre 700°C y 800°C. Están disponibles en varias formas: polvos, elementos microporosos, elementos granulados, tamices moleculares y fibras (Hassan, 2015).</p> <p>El amoníaco tiene un calor latente relativamente alto de aproximadamente 1365 kJ/kg a 30°C, su adsorción máxima en el carbón activado es 0,29 g/g; sin embargo es una sustancia tóxica y corrosiva (Hassan, 2015).</p> <p>Calor de adsorción par carbón activado/amoníaco = 2000-2700 kJ/kg (Hassan, 2015)].</p> |

| Par adsorbente/ refrigerante | Características |
|-------------------------------------|--|
| Carbón activado / metanol | <p>Es un par de trabajo muy común por la alta capacidad de absorción a menor calor de adsorción, de aproximadamente 1800-2000 kJ/kg. La desventaja de este par es que opera a presión subatmosférica (Hassan, 2015).</p> <p>La cantidad máxima de adsorción de metanol en el carbón activado es 0,45 g/g a un calor latente de 30°C es de aproximadamente 1229 kJ/kg; pero el metanol se descompone a 120°C y las aleaciones de aluminio tienen un efecto catalítico más fuerte sobre la reacción de descomposición que el cobre (Hassan, 2015).</p> |
| Carbón activado / etanol | <p>Este par puede alcanzar un efecto de enfriamiento específico de hasta 420 kJ/kg a una temperatura del evaporador de 7°C, combinado con la fuente de calor y el disipador de calor a temperaturas de 80°C y 30°C respectivamente; por la alta absorción del etanol sobre el carbón activado y la baja temperatura de regeneración del par que es inferior a 100°C (Samson, Echarri, & El Hasi, 2008).</p> |
| Sílica-gel / agua | <p>Sílica-gel es una sílica amorfa sintética, formada por una red continua y rígida de sílica coloidal, conectada a granos muy pequeños de SiO₄ hidratado; los diámetros de sus poros son 2,3nm y 0,7nm, y el área superficial específica de 100 a 1000 m²/g. El agua es un muy buen refrigerante, pero con una temperatura de evaporación superior a 0°C (Hassan, 2015).</p> <p>El calor de adsorción para el par sílica-gel/agua es aproximadamente 2800 kJ/kg, sin embargo tiene una baja cantidad de adsorción, que es aproximadamente 0,2 g/g (Hassan, 2015).</p> |

| Par adsorbente/ refrigerante | Características |
|--------------------------------------|---|
| Zeolita / agua | <p>La zeolita es un cristal de silicato de alúmina compuesto de suelo alcalino; la porosidad del esqueleto de silicato de alúmina es de entre 0,2 y 0,5. Existen 40 zeolitas naturales, principalmente se utilizan para refrigeración por adsorción: chabacita, sodio-chabacita, cowlesita y faujasita; también pueden sintetizarse artificialmente otros 150 tipos. Los tamices moleculares de zeolita sintetizados artificialmente, tienen microporos uniformes y pueden tener tamaño diferente; las nominaciones 4A, 5A, 10A y 13A son utilizadas para la refrigeración por adsorción (Hassan, 2015).</p> <p>La temperatura de desorción de los pares zeolita/agua es de 250°C a 300°C; el calor de adsorción del par zeolita/agua es de entre 330 a 4200 kJ/kg; las zeolitas naturales tienen valores más bajos que las zeolitas sintéticas (Hassan, 2015).</p> |
| Cloruros metálicos / amoníaco | <p>Los principales cloruros metálicos utilizados en la refrigeración por adsorción son: cloruro de calcio, cloruro de estroncio, cloruro de magnesio, cloruro de barita y cloruro de níquel (Hassan, 2015).</p> <p>La desventaja principal de los pares cloruro metálico/amoníaco es la hinchazón de sal y la aglomeración durante la adsorción, lo que compromete la transferencia de calor y masa (Hassan, 2015).</p> |
| Hidruros metálicos /hidrogeno | <p>La potencial aplicación de hidruros metálicos es amplia porque existen hidruros con temperaturas de equilibrio (para una presión de equilibrio de 1 bar) de entre 113°C a 527°C y superiores. Son 26 los hidruros</p> |

| Par adsorbente/ refrigerante | Características |
|---------------------------------|---|
| | <p>metálicos conocidos que interactúan con el hidrógeno. Cuando el hidrógeno es adsorbido se produce una reacción exotérmica que libera calor, cuando el hidrógeno se desorbe, se produce una reacción endotérmica que genera un enfriamiento significativo (Hassan, 2015).</p> <p>La desventaja de los pares hidruro metálico/hidrógeno es el peso del sistema, casi el doble para un sistema que trabaja con evaporador y condensador (Hassan, 2015).</p> |

Fuente: (Hassan, 2015).

3.3. Criterios de selección del par de adsorción

Para el adsorbente (sólido) los criterios que deben considerarse en la selección son (MIT, 2018, pág. 38):

- Relación positiva con el adsorbato, gran adhesión de adsorbato a temperatura baja, para disponer de buena eficiencia operativa (Jaramillo & Nagua, 2013).
- Desadhesión de la mayor parte del adsorbato cuando se expone al calor (Jaramillo & Nagua, 2013).
- Poco calor recolectado en el calentamiento, comparado con los calores generados en el proceso (Jaramillo & Nagua, 2013).
- Integridad temporal ante el uso.
- No ser corrosivo ni perjudicial para la salud.
- Tener precio accesible y ser de fácil provisión.

En el adsorbato los aspectos a considerar son (MIT, 2018, pág. 41)

- Tener una temperatura de fusión inferior a cero grados, porque muchas veces se requiere producir o conservar hielo.
- Dimensión molecular pequeña, para facilitar la adhesión en el adsorbente (Jaramillo & Nagua, 2013)
- Tener un calor evaporización alto y volumen específico bajo.
- Ser estable dentro de las temperaturas que se presentan en el ciclo.
- No ser perjudicial para la salud, el ambiente, no corroer metales, ni ser inflamable.
- Tener dentro de la temperatura de operación, baja presión de saturación (Jaramillo & Nagua, 2013)

No existe un par que satisfaga todos los parámetros anteriores, pero la literatura disponible señala que los pares más eficientes y adecuados son (Campuzano, 2010):

3.3.1. Zeolita - Agua

Se caracteriza porque su temperatura de recuperación es igual o mayor a 150 grados centígrados, porque la zeolita en el colector necesita alta temperatura. Si bien ésta puede utilizarse con varios refrigerantes (agua, metanol o amoníaco), mayoritariamente la literatura recomienda usarla con agua porque su estructura le permite aspirar alta cantidad de estas moléculas (Campuzano, 2010), (Paracuellos & Calvo, 2016).

Puesto que la conductividad térmica de la zeolita es baja (0.1–1.0 W/mK) tarda en absorber y extraer, lo que limita su suficiencia para enfriarse. Para lograr equilibrar la afinidad y desorción, requieren alta cantidad de componente lo que incrementa el costo, adicionalmente las isotermas muestran relación no lineal con la presión (Campuzano, 2010), (Schicktanzt & Núñez, 2016).

3.3.2. Sílica Gel - Agua

La temperatura de recuperación de la sílica gel es baja (70 a 80 grados centígrados) tiene conductividad comparable a la zeolita e isothermas prácticamente lineales. Tiene buena afinidad con el agua, no afecta la salud ni el ambiente, no corroe metales, pero su costo es alto y no es de fácil provisión en todos los países (Campuzano, 2010), (Chakraborty, 2015).

El calor latente del agua es alto, no afecta al ambiente, su presión de vapor es baja esto genera problemas técnicos en cuanto al hermetismo y la resistencia al traslado de masa lo que afecta la eficiencia del proceso. El agua no perjudica la salud ni el ambiente, no es inflamable, no corroe, pero se hace sólida a 0° grados lo que la limita a aplicaciones menores a esta temperatura (Campuzano, 2010), (Chakraborty, 2015).

3.3.3. Carbón Activado - Metanol

El carbón activado es el adsorbente más utilizado por su amplia área superficial, su temperatura de recuperación es aproximadamente 120 grados centígrados. Varios autores lo recomienda para aplicaciones de refrigeración con energía solar combinado con amoníaco o metanol, porque su eficiencia operativa es alta y tiene equilibrio en la adsorción y desorción. Presenta una isoterma de presión prácticamente lineal, su costo es bajo, es de fácil aprovisionamiento y sus propiedades adaptables a los requerimientos particulares en función de la temperatura y tiempo de activación. Por su covalencia trabaja mejor con moléculas no iónicas como las orgánicas (Campuzano, 2010), (Paracuellos & Calvo, 2016).

El metanol tiene una presión mayor que el agua y se utiliza en la fabricación de hielo, a una temperatura superior a 120°C pierde estabilidad, por lo que para experimentación con adsorción resulta de gran ayuda para aplicaciones refrigerantes, dado que se ha logrado buenos avances. Mantiene su estado líquido a temperaturas bajas, sólidos microporosos lo absorben

eficientemente, práctica disponibilidad, no altera el medio ambiente y no ataca elementos metálicos, como desventaja es inflamable, (Campuzano, 2010), (Olivares & Martínez, 2016).

3.3.4. Carbón Activado - Amoníaco

La presión de vapor del amoníaco es alta, logra altos niveles de enfriamiento (- 40° C), es tóxico y corroe metales por lo que su costo de producción es alto (Campuzano, 2010). Por su alta presión de vapor es fácil detectar fugas en los equipos, si estas son leves no se afecta inmediatamente el rendimiento del equipo (Campuzano, 2010), (Olivares & Martínez, 2016).

3.4. Ventajas y desventajas de los pares

Los acalores latentes del agua 2258 kJ/kg, metanol 1160 kJ/kg y amoníaco 1368 kJ/kg son altos y tienen bajos volúmenes específicos (10-3 m³/kg). En cuanto a estabilidad térmica, el agua es el más estable que el metanol y el amoníaco, pero se congela a 0°C por lo que el metanol es más eficiente con un adsorbente estable (Jaramillo & Nagua, 2013), (Hassan, 2015).

Critoph, Vogel y Meunier al estudiar los coeficientes de operación (COP) del carbón activado–metanol, zeolita–agua y otros pares, establecen que el par carbón activado-metanol es ideal para energía solar, por su alto COP y baja temperatura de recuperación (Jaramillo & Nagua, 2013), (Samson, Echarri, & El Hasi, 2008).

Existen innovaciones en pares de fibras de carbón activado-etanol y carbón activado-cetona; están disponibles adsorbatos combinados como el carbón activado y el cloruro de calcio (CaCl₂), que han evidenciado resultados favorables. Al estudiar las propiedades de carbón activado monolítico se ha podido reducir su volumen y bajar los costos (Campuzano, 2010), (MIT, 2018). No existe aún un par de trabajo ideal para las aplicaciones de refrigeración por adsorción, aunque cada sistema tiene una ventaja sobre los demás,

también tiene sus desventajas dependiendo de la situación experimental. Entonces, para elegir el sistema apropiado, se requiere determinar la aplicación con precisión., lo cual significa que se puede elegir el par de adsorción considerando la baja temperatura del evaporador o baja temperatura de conducción; alto SCP o alto COP. Esto depende del uso o la función deseada, si se requiere alcanzar el punto de congelación o solamente un estado de enfriamiento, además de los recursos disponibles.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se compara la teoría recabada con la opinión de dos expertos en el tema, para obtener conclusiones relevantes.

4.1. Opinión de expertos

4.1.1. Experto 1

El experto PhD. Ángel Iván Castillo Ramírez, tuvo la amabilidad de contestar las siguientes preguntas (Castillo Ramírez, 2019).

¿Cómo considera usted la importancia del proceso de adsorción?

Generalmente los sistemas de enfriamiento se basan en la compresión mecánica de vapor mediante el aporte de un motor eléctrico, no se han producido en décadas mejoras sustanciales en su eficiencia y más bien se ha dado prioridad a minimizar la afectación ambiental que generan estos sistemas.

A nivel mundial para sistemas de refrigeración y aire acondicionado se utiliza entre 10% y 15% de la electricidad generada.

Para comparar los efectos de los diferentes gases, el potencial de calentamiento (PCG) de un determinado gas en comparación con el que posee el mismo volumen de CO₂ durante el mismo periodo de tiempo, el PCG del CO₂ es siempre 1. De esa comparación base se dice que en el país los refrigerantes más utilizados son los hidrofluorocarbonos O HFC, pero tienen un potencial de calentamiento global (PCG) muy alto comparado con el CO₂ cuyo PCG es bajo.

Por el impulso de la cultura ambiental y la crisis energética, se ha incrementado el interés por nuevas alternativas para la refrigeración, y desarrollarla mediante adsorción es la opción más atractiva ya que no produce

impacto ambiental a nivel de calentamiento ni destrucción de la capa de ozono.

La adsorción es la retención selectiva de uno o más gases o líquidos (adsorbato) en un sólido microporoso (adsorbente) (Campuzano, 2010), el proceso inverso, separación del adsorbato del adsorbente, es la desorción o regeneración.

El fenómeno de adsorción en la industria no solo se aplica para refrigeración, sino también para entre otros fines, limpiar el agua y extraer la humedad.

¿Qué aspectos técnicos son relevantes respecto al proceso de adsorción?

Son varios los modelos que buscan explicar el fenómeno de la adsorción, el de Lagmuir considera que ésta sucede sobre una superficie de adsorbente compuesta por espacios regulares que pueden o no, aceptar una única molécula de adsorbato; el modelo BET asume que la cobertura del adsorbente es exclusivamente en una sola capa (monocapa) y que su superficie externa y poros pueden captarse diversas capas de moléculas de adsorbato (Jaramillo & Nagua, 2013); según los modelos DR (Dubinin-Radushkevich) y DA (Dubinin-Astakhov) la adsorción llena el volumen del espacio destinado a ésta.

Es importante analizar el equilibrio de adsorción, ya que es una restricción a la medida y correlación entre la capacidad de adsorción, selectividad y datos de regeneración, que son factores fundamentales en la aplicación de la adsorción.

La capacidad de adsorción es la cantidad de adsorbato presente en cada unidad de masa del adsorbente.

¿Qué características tiene el proceso de adsorción?

En cuanto las características, la adsorción es un proceso que libera energía (exotérmico), contrariamente la desorción consume energía es endotérmico.

Las energías involucradas en este proceso son del orden de 8.38 KJ/mol a 41.87 kJ/mol, su magnitud es similar a los valores de los calores latentes de vaporización de los adsorbatos puros.

En la mayoría de casos se trata de un fenómeno reversible, y no produce cambios de volumen en el sólido adsorbente.

Se requieren dos variables para definir el estado del sistema, equilibrio de adsorción entre la fase adsorbida y la gaseosa de un solo adsorbato presente, la presión (P) y la temperatura T) (Jaramillo & Nagua, 2013).

A presión constante la cantidad de gas adsorbido en el sólido adsorbente es inversamente proporcional a la variación de temperatura, y a temperatura constante, la masa absorbida es directamente proporcional a la variación de presión.

No es un proceso general sino selectivo, ciertos vapores o gases que no son absorbidos, otros lo son en forma ligera y algunos extensamente.

Es un proceso rápido cuya es función del grado de saturación del adsorbente (Rivera & Zavala, 2014)

¿Cuáles son los materiales más utilizados para el proceso de adsorción?

Los materiales adsorbentes más comunes son: las arcillas naturales como silicatos de aluminio y magnesio sus tamaños comerciales varían entre gránulos grandes y polvos finos; arcillas activadas como la bentonita; Sílica Gel que es el resultado de mezclar silicato de sodio con ácido sulfúrico; el carbón activado que es muy poroso y existen muchos tipos cada uno con propiedades diferentes; las zeolitas que son una clase de minerales aluminosilicatos cristalinos sobre un esqueleto aniónico rígido, con canales y cavidades bien definidas, en ellas la adsorción toma lugar dentro de los cristales; y adsorbentes poliméricos formados por una matriz aromática o alifática.

Los adsorbatos (gas o líquido) más empleados son: amoníaco, metanol, etanol, agua e hidrogeno.

¿Qué es un par de adsorción y bajo qué criterios se seleccionan sus componentes?

El par de adsorción es el conjunto de adsorbente y adsorbato, éste es el eje del ciclo de enfriamiento por adsorción, su selección depende de las características físicas, químicas, termodinámicas y la disponibilidad de los elementos.

Para la selección del adsorbente es recomendable analizar seis factores: el nivel de afinidad con el adsorbato; el nivel de desorción cuando al adsorbente se expone al calor; la cantidad de calor acumulado durante el calentamiento, comparado con el calor de desorción y adsorción; su conservación e integridad temporal; el nivel de toxicidad y efecto corrosivo; su costo y disponibilidad.

Para el adsorbato o refrigerante es conveniente analizar: su temperatura de fusión; el tamaño molecular; el calor latente de evaporización y volumen específico; la estabilidad térmica con el adsorbente en el intervalo de temperaturas de operación; nivel de toxicidad, efecto corrosivo, inflamabilidad e impacto ambiental; presión de saturación a la temperatura de operación.

En los componentes de un par de adsorción se busca que cumpla los siguientes criterios:

En el adsorbente alta afinidad, para que adsorba una cantidad significativa de adsorbato a temperatura baja y así tener un buen coeficiente de operación; la desorción de la mayoría del adsorbato al exponerlo a energía térmica; que el calor sensible acumulado sea pequeño; que el adsorbente no se deteriore con paso del tiempo; que no sea tóxico ni corrosivo; bajo costo y al disponibilidad.

En el adsorbato una temperatura de fusión menor a 0°C ya que generalmente se requiere producir hielo tamaño molecular pequeño para que la absorción sea más sencilla sobre los micro poros del adsorbente; calor latente elevado y volumen específico bajo (Jaramillo & Nagua, 2013); mantener estabilidad térmica con el adsorbente en el intervalo de temperaturas de operación; no ser tóxico, corrosivo o inflamabilidad, ni afectar al ambiente; saturarse a una presión apenas superior a la atmosférica a la temperatura de operación.

¿Qué par de adsorción considera usted es el óptimo?

No es factible identificar un par óptimo, cuyos componentes cumplan totalmente los criterios señalados anteriormente; por ello es recomendable antes de cualquier selección determinar la aplicación que se le dará, para establecer el factor determinante de la selección.

Adicional a esto, el experto expresa los siguientes criterios técnicos:

Respecto a los pares zeolita agua y sílica gel agua, el experto señala que la zeolita requiere que el colector tenga una temperatura alta, puede utilizarse en par con agua, amoníaco y metanol, generalmente se usa la zeolita con agua como refrigerante porque su estructura permite adsorber gran cantidad de moléculas de agua, pero su baja conductividad térmica demora la adsorción y desorción, lo que limita la capacidad específica de enfriamiento (SCP).

Para lograr equilibrio entre la afinidad y la desorción de la mayoría del adsorbato, las zeolitas requieren mucho material lo que incrementa su costo, y mantienen una dependencia no lineal con la presión.

La temperatura de recuperación de la sílica gel es baja, similar conductividad que la zeolita, buena relación por su adsorbato, no afecta la salud, el entorno, ni a los metales pero su costo es alto y su provisión es difícil (Campuzano, 2010)

El agua tiene alto calor latente, su presión de vapor es relativamente baja lo que genera dificultades de diseño en cuanto a hermeticidad y causa resistencia a la transferencia de masa reduciendo el coeficiente de operación (COP). No es tóxica, corrosiva, ni inflamable, favorece al ambiente y hay disponibilidad, sin embargo se solidifica a 0°C, por lo que su uso para aplicaciones debajo de esta temperatura es restringido.

Respecto a los pares carbón activo metanol y amoníaco, el experto señala que el carbón activo es el adsorbente más utilizado pues tiene una muy grande área superficial; no es costoso, es de fácil acceso y puede ajustarse a diversas aplicaciones (Jaramillo & Nagua, 2013).

El metanol tiene una presión superior al agua, es un mejor refrigerante en sistemas de adsorción, permanece líquido a muy bajas temperaturas, es de fácil adsorción y disponibilidad, no es tóxico, ni corrosivo y es inflamable.

El amoníaco tiene alta presión de vapor, puede utilizarse para aplicaciones de alto enfriamiento, es tóxico y corrosivo lo que implica costos altos de fabricación. Tiene presión de vapor mayor a la atmosférica, por lo que en caso de pérdidas es fácil detectar.

Se han producido adsorbatos compuestos como el carbón activo con cloruro de calcio (CaCl_2), obteniéndose resultados favorables. (Veloz Arias, 2018).

4.1.2. Experto 2

Ing. Manuel Flores Maruri

Las respuestas proporcionadas por este experto a las preguntas planteadas son (Flores Maruri, 2019).

¿Cuál considera usted es la importancia del proceso de adsorción?

La adsorción provee un proceso alternativo para desarrollar aplicaciones de refrigeración, sin afectar el ambiente, sin embargo, su potencial no ha sido adecuadamente aprovechado y explotado a nivel industrial.

¿Qué aspectos técnicos son relevantes respecto al proceso de adsorción?

La extensión del proceso de adsorción depende de:

- La temperatura, mientras más alta sea en relación a la crítica, por encima de la cual un gas no puede ser licuado por compresión ni condensarlo aumentando la presión, menos gas será adsorbido (Campuzano, 2010).
- La superficie del adsorbente, si los demás factores son constantes, mientras más poroso más masa absorbe.
- La concentración depende de la presión del gas adsorbido (Rivera & Zavala, 2014).

¿Qué características tiene el proceso de adsorción?

Respecto a las características, el experto señala que la adsorción es un proceso exotérmico, que involucra energías en un rango muy disperso, dependiendo los componentes actuantes; generalmente es un fenómeno reversible que no altera el volumen del elemento adsorbente.

Está condicionada principalmente por la presión y la temperatura, si se mantiene constante la presión, incrementos de temperatura causan que disminuya la masa adsorbida; si la temperatura es constante, el incremento de presión genera que la masa absorbida sea mayor.

No todos los líquidos o gases pueden desempeñarse como adsorbatos y en caso de hacerlo no tienen la misma capacidad; su velocidad depende del grado de saturación del adsorbente.

¿Cuáles son los materiales más utilizados para el proceso de adsorción?

El segundo experto coincide en señalar que los adsorbentes más comunes son: silicatos de aluminio y magnesio, arcillas activas entre las que destaca la bentonita, Sílica Gel, carbón activado del que existen diversos tipos con diversas propiedades cada uno, zeolitas y adsorbentes en base a polímeros.

Los adsorbatos más utilizados son: amoniaco, metanol, etanol, agua e hidrogeno.

¿Qué es un par de adsorción y bajo qué criterios se seleccionan sus componentes?

El par de adsorción es el sistema compuesto por un adsorbente y un adsorbato; este segundo experto coincide en señalar que la selección de un adsorbente debe hacerse en función de: el nivel de afinidad con el adsorbato; el nivel de desorción cuando al adsorbente se expone al calor; la cantidad de calor acumulado durante el calentamiento, comparado con el calor de desorción y adsorción; su conservación e integridad temporal; el nivel de toxicidad y efecto corrosivo; su costo y disponibilidad. En el caso del adsorbato debe analizarse: su temperatura de fusión; el tamaño molecular; el calor latente de evaporización y volumen específico; la estabilidad térmica con el adsorbente en el intervalo de temperaturas de operación; nivel de toxicidad, efecto corrosivo, inflamabilidad e impacto ambiental; presión de saturación a la temperatura de operación.

Es ideal que al seleccionar un par de adsorción sus dos componentes cumplan los siguientes requisitos:

Que el adsorbente tenga alta afinidad con el adsorbato para tener un proceso eficiente; que se logre la máxima desorción al aplicarle energía térmica; que acumule poco calor; que mantenga su integridad con el tiempo; que no sea tóxico ni corrosivo; que se económico y de fácil aprovisionamiento.

Que el adsorbato tenga una temperatura de fusión menor a 0°C; que su tamaño molecular sea pequeño para facilitar la adsorción; que tenga un alto calor latente de vaporización y volumen específico bajo; que sea térmicamente estable con su par en los niveles de temperatura de operación; que no sea tóxico, corrosivo, inflamable ni afecte al ambiente; que se sature a una presión levemente superior a la atmosférica a la temperatura de operación.

¿Qué par de adsorción considera usted es el óptimo?

No existe un par que pueda señalarse sea el mejor, su selección va a depender de la aplicación en la cual se use, ya que cada par tiene características muy particulares.

Al consultar al segundo experto respecto a los criterios técnicos manifestados por el primer experto, expresa lo siguiente:

La zeolita puede utilizarse en par con agua, amoníaco o metanol, en aplicaciones de refrigeración se utiliza generalmente con agua, porque adsorbe gran cantidad de moléculas de ésta, pero por su baja conductividad térmica su capacidad específica de enfriamiento (SCP) es limitada.

Para equilibrar el sistema de las zeolitas requieren una alta cantidad de material lo que encarece el proceso, y no guarda una relación lineal con la presión.

La sílica gel es un adsorbente con baja temperatura de regeneración, baja conductividad térmica, guarda relación lineal con la presión, tiene buena afinidad por su adsorbato, no es tóxica ni corrosiva, su costo es alto y de difícil aprovisionamiento.

El agua tiene calor latente alto, presión de vapor relativamente baja por lo que presenta resistencia a la transferencia de masa y baja la eficiencia del proceso; no es tóxica, corrosiva, ni inflamable, es amigable con la ambiente y se puede

disponer de ella en casi todos los lugares, ya que solidifica a 0°C no se la utiliza en aplicaciones expuestas a temperaturas inferiores.

Al igual que el primer experto destaca la amplia aplicación del carbón activado por su gran área superficial, porque tiene relación casi lineal con la presión, es de bajo costo, existe alta disponibilidad y su amplia aplicabilidad.

En cuanto al metanol destaca que es mejor refrigerante que el agua en sistemas de adsorción, y que permanece líquido a temperaturas muy bajas, que es de fácil adsorción y disponibilidad; no es tóxico, ni corrosivo pero sí es inflamable. El amoníaco tiene alta presión de vapor, es aplicable para alto enfriamiento, es toxico y corrosivo.

4.2. Discusión de resultados

Los expertos confirman el criterio de López (2004) que señala que la masa adsorbida por la muestra es directamente proporcional a la masa m de la muestra y depende de la temperatura T , presión p del vapor y de la naturaleza de los componentes del par.

Castillo (2019) señala que la forma más utilizada para representar el equilibrio de adsorción en función de las variables dependientes y a temperatura constante son las isothermas de adsorción, lo que corrobora Templeton (2016) al señalar que es una de las formas más empleadas de manera rutinaria en laboratorio.

Douss y Meunier (2015) señalan que el par adsorbente/refrigerante es el elemento fundamental de un ciclo de enfriamiento por adsorción, y que su selección para aplicaciones de enfriamiento depende de las características de sus elementos; esto ha sido confirmado por Castillo (2019) quien además coincide en señalar que su selección depende de las características físicas, químicas, termodinámicas y la disponibilidad de los elementos.

Argudo (2018) señala que los *adsorbentes* son materiales porosos que pueden obtenerse de manera natural o sintética, se caracterizan porque los poros pueden ocupar hasta el 50% del volumen del material, y que el *adsorbato* es la sustancia que se condensa en la superficie del adsorbente y en los sistemas de refrigeración por adsorción se desempeña como un refrigerante, sus criterios de selección de adsorbentes y adsorbato coinciden con lo expuesto por Flores (2019) que señala que al seleccionar el adsorbente debe considerarse que tenga alta afinidad con el adsorbato para tener un proceso eficiente; que se logre la máxima desorción al aplicarle energía térmica; que acumule poco calor; que mantenga su integridad con el tiempo; que no sea tóxico ni corrosivo; que sea económico y de fácil aprovisionamiento; y que el adsorbato tenga una temperatura de fusión menor a 0°C; que su tamaño molecular sea pequeño para facilitar la adsorción; que tenga un alto calor latente de vaporización y volumen específico bajo; que sea térmicamente estable con su par en los niveles de temperatura de operación; que no sea tóxico, corrosivo, inflamable ni afecte al ambiente; que se sature a una presión levemente superior a la atmosférica a la temperatura de operación.

Hassan (2015) concluye que los adsorbatos más empleados en sistemas de refrigeración por adsorción son agua, amoníaco, etanol y metanol por disponer de un elevado calor latente de vaporización con respecto a otras sustancias, aunque sean tóxicos en estado concentrado al ser manipulados (amoníaco); esto es corroborado por la opinión de varios autores quienes señalan que el metanol, agua y amoníaco, disponen de calores latentes elevados y capacidad volumétrica específicas pequeños, desde el punto de vista de temperatura el agua tiene una estabilidad mejor que el amoníaco y el metanol (Flores Maruri, 2019) y (Castillo Ramírez, 2019), y que el metanol es favorable para formar par con un adsorbente estable; el metanol tiene mayor presión que el agua, es un mejor refrigerante en sistemas de adsorción, permanece líquido a muy bajas temperaturas, es de fácil adsorción y disponibilidad, no es tóxico, ni corrosivo y es inflamable; y el amoníaco tiene alta presión de vapor, puede utilizarse para aplicaciones de alto enfriamiento, es tóxico y corrosivo lo que implica costos altos de fabricación.

En cuanto a la selección del adsorbente y del adsorbato para estructurar un par de adsorción, Flores (2019) y Castillo (2019) coincidentemente señalan es recomendable que el adsorbente tenga alta afinidad con el adsorbato para tener un proceso eficiente; que se logre la máxima desorción al aplicarle energía térmica; que acumule poco calor; que mantenga su integridad con el tiempo; que no sea tóxico ni corrosivo; que se económico y de fácil aprovisionamiento; y que el adsorbato tenga una temperatura de fusión menor a 0°C; que su tamaño molecular sea pequeño para facilitar la adsorción; que tenga un alto calor latente de vaporización y volumen específico bajo; que sea térmicamente estable con su par en los niveles de temperatura de operación; que no sea tóxico, corrosivo, inflamable ni afecte al ambiente; que se sature a una presión levemente superior a la atmosférica a la temperatura de operación. Lo que coincide con los criterios emitidos por el MIT (2018).

Castillo (2019) expresa la dificultad de identificar un par óptimo, ya que depende de la aplicación que se le dará, y manifiesta criterios técnicos respecto a los pares zeolita agua, sílica gel agua, carbón activo metanol y carbón activo amoníaco, los mismos que son totalmente congruentes con los expuestos por Paracuellos y Calco (2016), Schictanz y Núñez (2016), Chakraborty (2015) y Olivares y Martínez (2016).

Los resultados evidencian una congruencia de criterios teóricos y técnicos por parte de las personas que han tratado este tema y los expertos entrevistados, por lo que se considera que la información teórica presentada es relevante.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La adsorción es la retención restrictiva de uno o más componentes de un gas o un líquido (adsorbato) en la superficie de un sólido microporoso (adsorbente) (Campuzano, 2010), la capacidad de adsorción es la cantidad de adsorbato presente en cada unidad de masa del adsorbente. Es un proceso que libera energía (exotérmico), las energías involucradas son del orden de 8.38 KJ/mol a 41.87 kJ/mol, su magnitud es similar a los valores de los calores latentes de vaporización de los adsorbatos puros, generalmente es un fenómeno reversible y no produce cambios de volumen en el sólido adsorbente.

La masa adsorbida es directamente proporcional a la masa m de la muestra y depende de la temperatura T , presión p del vapor y de la naturaleza de los componentes del par.

La forma más utilizada para representar el equilibrio de adsorción en función de las variables dependientes y a temperatura constante son las isotermas. El par adsorbente/refrigerante es el eje del ciclo de enfriamiento por adsorción, su selección depende de las características físicas, químicas, termodinámicas y la disponibilidad de los elementos.

Los adsorbentes son materiales porosos que pueden obtenerse de manera natural o sintética, cuyos poros pueden ocupar hasta el 50% del volumen del material, y que el adsorbato es la sustancia que se condensa en la superficie del adsorbente y desempeña como refrigerante.

Los adsorbatos que actualmente son los más empleados en sistemas de refrigeración por adsorción son: agua, amoníaco, etanol y metanol.

Los criterios de selección del adsorbente son la alta afinidad con el adsorbato; que se logre la máxima desorción al aplicarle energía térmica; que acumule poco calor; que mantenga su integridad con el tiempo; que no sea tóxico ni

corrosivo; que se económico y de fácil aprovisionamiento; y que el adsorbato tenga una temperatura de fusión menor a 0°C; que su tamaño molecular sea pequeño para facilitar la adsorción; que tenga un alto calor latente de vaporización y volumen específico bajo; que sea térmicamente estable con su par en los niveles de temperatura de operación; que no sea tóxico, corrosivo, inflamable ni afecte al ambiente; que se sature a una presión levemente superior a la atmosférica a la temperatura de operación.

Es imposible identificar un par óptimo, ya que depende de la aplicación que se le dará.

5.2. Recomendaciones

Incentivar a que se amplíe el desarrollo de este tema ya que los sistemas de enfriamiento proporcionan un recurso indispensable para satisfacer necesidades de la sociedad moderna, el frío, y la adsorción es una alternativa muy atractiva para la refrigeración pues no produce impacto ambiental.

Para estructurar un par de adsorción, es recomendable que el adsorbente tenga alta afinidad con el adsorbato para tener un proceso eficiente; que se logre la máxima desorción al aplicarle energía térmica; que acumule poco calor; que mantenga su integridad con el tiempo; que no sea tóxico ni corrosivo; que se económico y de fácil aprovisionamiento; y que el adsorbato tenga una temperatura de fusión menor a 0°C; que su tamaño molecular sea pequeño para facilitar la adsorción; que tenga un alto calor latente de vaporización y volumen específico bajo; que sea térmicamente estable con su par en los niveles de temperatura de operación; que no sea tóxico, corrosivo, inflamable ni afecte al ambiente; que se sature a una presión levemente superior a la atmosférica a la temperatura de operación.

Se recomienda ampliar las investigaciones de este tema, que por sobre todo respeta el medio ambiente, y que de esta manera pueda ser la solución frente al uso de otras tecnologías que utilizan combustibles fósiles, que al emitir gases tóxicos destruyen la capa de ozono, y con ello se facilita el ingreso de los rayos ultravioleta.

BIBLIOGRAFIA

- Abdullah, M. I. (2011). Automobile adsorption airconditioning system using oil palm biomass-based activated carbon: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2061-2072.
- Ali Aliexpress . (2018). *Alumina activa*. Shangai: Alibaba Co.
- Argumedo, C. A. (2018). *Barreras tecnológicas de los sistemas de refrigeración por adsorción 2018 Universidad Nacional de Colombia*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- BION . (2017). *Materia Filtrante de Carbón Activado / de Gas / para Fluido de Refrigeración* . BION.
- Cabrera, G., & Muñoz, D. (2008, julio). Aspectos básicos de refrigeración para la agroindustria. *Revista Scielo* , 6(2), 86 - 93.
- Campuzano, M. G. (2010). *Diseño y construcción de un sistema de enfriamiento por adsorción solar* . Quito: Escuela Politécnica Nacional – EPN. Retrieved from <https://vdocuments.mx/escuela-politecnica-nacional-epn-pagina-de-diseno-y-construccion-de-un.html>
- Castillo Ramírez, Á. I. (2019, 01 30). Entrevista a experto. (L. Proaño, Interviewer)
- CATC. (2012). *Boletín Técnico seleccionando un Sistema de Adsorción para COV: ¿Carbón, Zeolita, o PolímeroS? Information Transfer And Program Integration Division Office Of Air Quality Planning And Standards (OAQPS) U.S. Envir.* Information Transfer And Program Integration Division Office Of Air Quality Planning And Standards (OAQPS) U.S. Environmental Protection Agency EPA.
- Chakraborty, A. (2015). *Theoretical insight of adsorption cooling*. Berlín: Applied Physics Letters.
- Danfoss . (2015). Retrieved from Introducción a los conocimientos básicos de refrigeración : http://frioycalor.info/FriolIndustrial/Danfoss_Conocimientos-basicos-refrigeracion.pdf

- Douss, N., & Meunier, F. (2015). *Effect of operating temperatures on the coefficient of performance of heat recovery systems*. New York: Prentice Hall.
- Fernández Pino, F. (2011). *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción*. Sevilla: e-reding. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/Capítulo3+Sistema+de+adsorción.pdf>
- Fernández, F. (2011). *Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción*. Sevilla, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla.
- Flores Maruri, M. I. (2019, 01 30). Entrevista a experto. (L. Proaño, Interviewer)
- Guallar, J., & Lorente, I. (2005). Estudio y modelización de sistemas de climatización con adsorción. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.*, 9, (2), 31 - 37. Retrieved from https://www2.uned.es/ribim/volumenes/Vol9N2Julio_2005/V9N2A04%20Guallar.pdf
- Hassan, H. (2015). A Solar Powered Adsorption Freezer: A Case Study for Egypt's Climate. *International Journal of Energy Engineering*, 3(1), 21-29.
- Hassan, H. (2015). A Solar Powered Adsorption Freezer: A Case Study for Egypt's Climate. *International Journal of Energy Engineering*, 3(1), 21-29.
- Jaramillo, B., & Nagua, M. (2013). *Diseño y construcción de un prototipo de refrigerador solar con ciclo de adsorción carbón activo metanol*. Loja: Universidad Nacional de Loja Área de la Energía y las industrias y recursos naturales no renovables. Retrieved from <https://docplayer.es/96948843-Universidad-nacional-de-loja.html>
- Jincheng . (2017). *Silica gel activada*. Shenzhen, China: Shenzhen Jincheng Chemical Packing Co., Limited .
- López, R. (2004). *Caracterización de Medios Porosos y procesos percolativos y de transporte*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de San Luis.

- Lu, Q., X, Y., & Zhu, X. (2008). Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 191-198.
- Lu, Z; Wang, R; Xia, Z. (2016). Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel–water. *Applied Thermal Engineering*, 2016. 50(1): p. 1015-1020. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 1015-1020.
- Mande, S. (2000). *Development of an advanced solar–hybrid adsorption cooling system for decentralized storage of agricultural products in India* . India: Tata Energy Research Institute.
- MIT. (2018). *Applied Thermal Engineering*. Boston: Massachusetts Institute of Technology Press.
- MIT. (2018). *Applied Thermal Engineering*. Boston: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Olivares, I., & Martínez, V. (2016). *Estudio de pares de trabajo (adsorbente/adsorbato) para aplicaciones en sistemas de enfriamiento*. Brasilia: Universidad de Brasilia.
- Orjuela, H., & Hurtado, A. (2010 , enero). Diagramas de Clapeyron: un análisis teórico y simulado de los Procesos térmicos y cálculo de las cantidades macroscópicas . *LAPJE*, 4(1), 216 - 219.
- Papadopoulos, A. M., Oxidisis, S., & Kiriakis, N. (2003). Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air conditioning sector. (7), 419- 438.
- Paracuellos, J., & Calvo, I. (2016). Estudio y modelización de sistemas de climatización con adsorción. *Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 32-39 .
- PNUD . (2018). *Manual Buenas Prácticas en Refrigeración* . Asuncion, Paraguay: SEAM/PNUD/PNUMA. Retrieved from <http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/06/Manual-Buenas-Practicas.pdf>
- Restuccia, G., Fren, A., & Vasta, S. (2004). Ecological sound adsorption Chiller based on composite Ca Cl₂ in silical Gel: Laboratory prototipe. *Journal Chemestr for sustainable development* , 211-216.

- Rivera, C., & Zavala, H. (2014). *Diseño, cálculo y construcción de un sistema de refrigeración por adsorción didáctico activado por calor*. Portoviejo: Universidad Eloy Alfaro de Manabí. Retrieved from <http://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/1042>
- Samson, I., Echarri, R., & El Hasi, C. (2008). Prototipo a pequeña escala de una nevera solar: primeros resultados. *Ciencia y sociedad*, 11-17.
- Sánchez, R., Cabello, O., Patiño, R., & Lopis, R. (2013). *Las máquinas de producción de frío por adsorción con la mezcla sílica gel-agua*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved diciembre 26, 2018, from <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/41841/52043.pdf?sequence=2>
- Santori, G., Sapienza, A., & Freni, A. (2012). *A dynamic multi-level model for adsorptive solar cooling*. Messina, Italy: Elsevier Science.
- Schickanz, M., & Núñez, T. (2016). *Modelling of an adsorption chiller for dynamic system simulation*. Viena, Austria: International journal of Refrigeration.
- Templeton, I. L. (2016). *Estudio de pares de trabajo (adsorbente/adsorbato) base carbón activado para aplicaciones en sistemas de enfriamiento 2016 Centro de Investigación en Materiales Avanzados*. Chihuahua, México: Departamento de Estudios de Posgrado .
- Tokarev, M. R., Glanzev, I., & Aristov, Y. (2002). Tokarev M, G. L., Romannikov V, Glanzev I, Aristov Yul. (2002). New composite sorbent CaCl₂ in mesopores for sorption cooling/heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 41(41), 470-474.
- Torrella, E., Sánchez, D., Cabello, R., & Llopis, R. (2012). *Máquinas de producción de frío por adsorción con la mezcla sílica gel-agua*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/41841/52043.pdf?seq>
- Vargas, M. Á. (2016). Retrieved from Refrigeración sin electricidad, Zeolita : https://www.miguelangelvargascruz.com/refrigeracionsinelectricidad_blog_2138.html

- Veloz Arias, D. S. (2018). *Estudio de un sistema de refrigeración a través de la adsorción carbón activado-metanol utilizando fuentes renovables de energía*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo Carrera De Ingeniería Eléctrico-Mecánica. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/10163/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-140.pdf>
- Virtus. (2016). *Circuito de refrigeración*. Retrieved from http://grupovirtus.org/moodle/pluginfile.php/5435/mod_resource/content/1/Documentos/Circuito_de_Refrigeracion.pdf
- Whang, R. Z., & Olvera, G. (2006). Absorption Refrigeration and Efficient Way To Make Good Use Of Waste Heat and Solar Energy. *Journal Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 424-458.

ANEXOS

Anexo 1 Perfil de los expertos

Experto 1

PhD. Ángel Iván Castillo Ramírez, Química Pura y Aplicada, Catedrático de la Escuela Politécnica Nacional por más de 30 años, asesor en el área Química de varias empresas ecuatorianas.

Experto 2

Ing. Manuel Flores Maruri



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología
e Innovación y Sabiduría



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia,
Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Proaño Aragundi, Luis Alfonso**, con C.C. # 0930135140 autor del trabajo de titulación “**Análisis bibliográfico sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía**”, previo a la obtención del grado de **INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de graduación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 21 de marzo del 2019

f. _____

Nombre: Proaño Aragundi, Luis Alfonso

C.C. # 0930135140

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS

| | | | |
|-----------------------------------|--|------------------------|----|
| TEMA Y SUBTEMA: | "Análisis bibliográfico sobre investigaciones de sistema de climatización por adsorción utilizando fuentes renovables de energía." | | |
| AUTOR(ES) | Proaño Aragundi, Luis Alfonso | | |
| REVISOR(ES)/TUTOR(ES) | Ing. Bayardo Bohórquez, Escobar, M.SC. | | |
| INSTITUCIÓN: | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil | | |
| FACULTAD: | Educación Técnica Para El Desarrollo | | |
| CARRERA: | Ingeniería en Eléctrico-Mecánica | | |
| TÍTULO OBTENIDO: | Ingeniero en Eléctrico-Mecánica | | |
| FECHA DE PUBLICACIÓN: | 21 de marzo 2019 | No. DE PÁGINAS: | 75 |
| ÁREAS TEMÁTICAS: | Electricidad | | |
| PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS: | Adsorción, adsorbente, adsorbato, par de adsorción, temperatura, presión, masa adsorbida. | | |

RESUMEN/ABSTRACT En esta investigación se ha desarrollado un ANÁLISIS SOBRE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ADSORCIÓN; su importancia radica en la producción de frío, aplicada para la preservación de productos, además del confort que la sociedad requiere sin afectar el medioambiente. Al analizar los recursos teóricos disponibles, con el fin de conocer las tendencias del desarrollo de la refrigeración bajo el principio de la adsorción, se evidencia que el tema tiene marcado apego a factores ecológicos; que los pares de adsorción están compuestos por dos elementos uno que adsorbe y otro que desorbe, que hay dos tipos de procesos uno químico y otro físico, y que, si bien existen aportes de diversos autores respecto al tema, los antecedentes investigativos no son suficientes. Al comparar las tendencias más relevantes se establece que este proceso está condicionado principalmente por la presión y la temperatura, que no todos los líquidos o gases pueden desempeñarse como adsorbatos y no todos tienen la misma capacidad; que son varios los adsorbentes y adsorbatos que se han estudiado, y cuya selección depende de varios factores como la afinidad, costo, integridad, toxicidad, disponibilidad, entre otros, y su aplicabilidad no es absoluta sino relativa a cada caso de aplicación, por lo que no es posible señalar uno que sea el óptimo. El alcance de la investigación se limita al campo teórico sin aplicación práctica.

| | | |
|--|---|--|
| ADJUNTO PDF: | <input checked="" type="checkbox"/> SI | <input type="checkbox"/> NO |
| CONTACTO CON AUTOR/ES: | Teléfono: 0994993331 | E-mail: louisgsx250@hotmail.com |
| CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):: | Nombre: Ing. Orlando Philco | |
| | Teléfono: 0980960875 | |
| | E-mail: Luis.philco@cu.ucsg.edu.ec | |

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

| | |
|---|--|
| Nº. DE REGISTRO (en base a datos): | |
| Nº. DE CLASIFICACIÓN: | |
| DIRECCIÓN URL (tesis en la web): | |