



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.**

**POSGRADO**

# **Enfriamiento evaporativo con deseccante, estado del arte**

Tesis que como requisito para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Energías Renovables**

Presenta:

**Ramón Agustín Flores Ramos**

**Luis Martin Dibene Arriola**

Director de Tesis: Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. Noviembre de 2012.



## Agradecimientos

Primero que nada, agradezco a Dios, nuestro señor, porque sin él, nada sería posible.

También agradezco a las autoridades de la Coordinación General de Universidades Tecnológicas, quienes han fomentado, apoyado e incentivado esta Maestría y otras similares con un gran sentido estratégico para el desarrollo de nuestro país, ya que la preparación del personal académico del sistema de Universidades Tecnológicas en estos temas, será un factor clave para egresar jóvenes mejor preparados y competentes, capaces de enfrentar los retos de la modernidad y hacer de nuestro México un mejor país.

Se agradece también a las autoridades, profesores y personal del CIMAV, quienes todo el tiempo nos han apoyado y dado un trato muy fino y agradable, con una muy alta disposición y sentido de responsabilidad. Menciono especialmente al Dr. Duarte, la Dra. Hilda, Dr. Orrantía y Dr. Saucedo de la UABC.

También se agradece a las autoridades de la UTBB quienes nos dieron la oportunidad de seguirnos preparando.

Finalmente, le agradezco a mi familia, que gracias a su apoyo y comprensión, han permitido que esto sea posible. Le dedico especialmente esta Tesis a mi esposa Elizabeth, a quien agradezco públicamente todo su apoyo y comprensión, ya que esto ha significado un gran sacrificio de tiempo, dinero y esfuerzo, y ella ha compartido y aceptado esta situación, siempre alentándome a seguir adelante.

*Luis Martin Dibene Arriola*



## Dedicatoria

Este documento es dedicado primeramente a Dios, que me permitió estar en el lugar y el momento para continuar desarrollando mi persona integralmente, esperando que esto ayude a hacer y vivir en un mundo mejor.

Dedico también este documento a mis Padres que siempre han estado siguiendo mis pasos y apoyando mis decisiones que la vida me ofrece.

De igual forma, ofrezco estas palabras a la persona que ha llenado de felicidad cada día de mi vida, desde que la conocí, Alicia y que juntos estamos formando una familia con el milagro que este año llegó a nosotros para convertir en amor todo nuestro alrededor, Abril Sofía.

No puede faltar mencionar aquellos que forman parte importante de nuestra vida dentro de esta etapa de estudios y trabajos, sabiendo que esto solo es el inicio de nuevos retos que se seguirán presentando a diario. Especialmente quiero referirme a una persona que aún nos acompaña con su conocimiento y personalidad, dejando muy marcada la forma de trabajo en equipo, Ing. Salvador E. Zapata Escalera.

Por último quiero hacer mención de las Autoridades, Administrativos, Docentes y Amigos del CIMAV, y Docentes, Colaboradores y Amigos de la UABC que hicieron posible la Maestría en Ciencias en Energías Renovables; facilitando los nuevos aprendizajes y formas de investigación con su experiencia en la Materia.

*Ramón Agustín Flores Ramos*



## Índice

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1. Problemática y Justificación.....	2
1.2 Edificios y Confort Humano.....	7
1.3. Soluciones posibles .....	9
1.4. Hipótesis .....	10
1.5. Objetivo general.....	10
1.6. Objetivos específicos.....	10
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>12</b>
<b>DESARROLLO .....</b>	<b>13</b>
2.1 Principios y conceptos del enfriamiento con desecantes.....	13
2.1.1. Mecanismo de remoción de humedad.....	15
2.1.2. Procesos de enfriamiento del aire.....	16
2.1.3. Enfriamiento y deshumidificación del aire .....	17
2.1.4. Características de materiales desecantes.....	18
2.2 Clasificación del enfriamiento con desecante .....	21
2.2.1 Enfriamiento con desecante sólido .....	23
2.3. Procesos básicos de aire acondicionado con deshumidificación por desecantes rotatorios. ....	24
2.3.1. Regeneración por etapas.....	29
2.3.2. Deshumidificación isotérmica .....	30
2.3.3. Sistemas Híbridos de aire acondicionado con desecantes.....	34
2.3.3.1. Desecante híbrido y máquina de absorción .....	37
2.3.3.2. Desecante híbrido y máquina de adsorción .....	38



2.3.3.3. Desecante híbrido y techos fríos .....	38
2.3.4. Sistema de lecho fijo. ....	40
2.3.5. Tipos modificados.....	41
2.3.6. Aplicación y evaluación.....	43
2.3.6.1 Aplicación de sistemas de aire acondicionado solares accionados por desecantes rotatorios.....	44
2.3.6.2. Aplicación de sistemas de aire acondicionado con rueda desecante alimentados por otras fuentes de calor de baja calidad.....	46
2.4. Enfriamiento con desecante líquido.....	50
2.4.1. Desarrollo y evolución .....	51
2.4.2. Diseños de los sistemas de enfriamiento con desecante líquido .....	51
2.4.3. Aplicación y evaluación.....	55
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>60</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
3.1 Cálculos de calor latente y calor sensible.....	61
3.2 Caracterización climática de la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta, ZMPV.....	63
3.3. Propuesta de sistema híbrido de enfriamiento evaporativo con desecante para la ZMPV.....	70
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
4.1. Beneficios del enfriamiento con desecante .....	78
4.2. Desarrollo y aplicación del enfriamiento con desecante .....	81
4.3. RECOMENDACIONES .....	84
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>85</b>



## Resumen

Esta tesis presenta una revisión del desarrollo y aplicación de las tecnologías enfocadas al enfriamiento con desecante activadas térmicamente, y analiza el estado de la deshumidificación desecante giratoria y el aire acondicionado en los siguientes tres aspectos: el desarrollo de materiales desecantes avanzados, la optimización de la configuración del sistema y la utilización de la energía solar y otras fuentes de calor de baja calidad, como la energía solar, la calefacción, el calor residual y la bioenergía.

Se resumen también algunos de los problemas fundamentales que empujan más hacia la investigación y el desarrollo de esta tecnología. Primero se introduce el problema global de la energía y el medioambiente, referidos al consumo de fuentes de energía basadas en el carbono (gas, petróleo y carbón). Posteriormente se menciona la contribución del sector de la construcción a dicho problema, enfocado a la obtención de condiciones saludables y confortables en el interior de los edificios al utilizar principalmente el sistema mecánico por compresión de vapor con equipos que utilizan energía eléctrica de alta calidad.

Posteriormente se discuten las opciones de métodos alternativos para proveer condiciones de confort térmico y un medioambiente saludable en el interior de los edificios a través de tecnologías de enfriamiento con desecante activadas térmicamente con energía térmica de baja calidad –Desecantes sólidos, desecantes líquidos y sistemas híbridos de enfriamiento con desecantes.

Se observa que principalmente la investigación y aplicación se está dando en países avanzados y desarrollados, sin embargo para llegar a una solución a escala global de la contribución del sector de la construcción al problema de la energía para obtener condiciones saludables y confortables dentro de los edificios, se deben diseminar las ideas y las tecnologías al resto de los países en desarrollo que fomenten la aplicación y desarrollo de dichas tecnologías.



# Capítulo 1

## Introducción

El confort en el interior de una oficina o una casa es hoy en día indispensable para el ser humano, sobre todo en climas cálidos y húmedos, donde los equipos de aire acondicionado llegan a consumir hasta el 70% del total de la energía eléctrica de alta demanda que requieren los edificios (Solecki WD, 2006). Casi todos ellos funcionan por medio del sistema mecánico por compresión de vapor. Si el aire llega muy húmedo, el efecto refrigerante será poco eficaz, por eso su uso para acondicionamiento ambiental queda restringido a ciertas zonas geográficas y épocas del año (Luna et al, 2003), por lo que existen alternativas como el enfriamiento evaporativo indirecto (EIAC) y el enfriamiento evaporativo con desecante (Gallegos OR, 2010).

Actualmente se ha logrado mejorar la eficiencia de los equipos que utilizan dicho sistema y con un menor daño al ambiente, pero el consumo aun es excesivo, lo que involucra la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y otras sustancias que contaminan. Una opción es utilizar equipos que no consuman energía eléctrica o sea mínimo su uso, como los Sistemas Activos Térmicamente por fuentes alternativas. Una opción es el sistema de enfriamiento evaporativo con desecante, el cual utiliza energía térmica de baja calidad, su refrigerante es el agua y puede ahorrar hasta un 50% en energía eléctrica (Henning HM., 2001).

De esta manera se pretende investigar las tecnologías de enfriamiento evaporativo por desecante, pueden ser una opción viable como sistemas de aire acondicionado para uso residencial en la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta, Jalisco (clima cálido y húmedo en región Asia-Pacífico). Estos sistemas podrían estar enfocados principalmente en la aplicación de energía térmica solar en el sistema. Y con esto, obtener una visión general de las tecnologías de enfriamiento evaporativo activadas térmicamente con desecantes y la aplicación de la energía solar en este tipo de sistemas, que pueden ser activados y operados con energía térmica de baja calidad.

### 1.1. Problemática y Justificación

La situación ambiental actual es considerada un problema grave alrededor del mundo. El agotamiento de las reservas convencionales de energía es también un aspecto importante a tomar en cuenta (por ejemplo México ha bajado su producción de petróleo a partir del año 2004). Por otro lado, la población mundial está aumentando cada año (ver fig. 1) comportándose como una plaga. Además, la demanda de mejores y más confortables condiciones de vida está aumentando.



Por otro lado, se observa un fenómeno de urbanización en todo el mundo y se pueden ver ejemplos de ello en muchos lugares. La industrialización se está llevando a cabo en todos los rincones del planeta. Los problemas anteriores son complejos, ya que hay muchos parámetros y consideraciones a ser examinados profundamente. Estas situaciones se han convertido en temas políticos, económicos y tecnológicos prioritarios a nivel mundial. La solución para estos problemas es o debería ser una meta común. Por lo tanto estos temas de energía, medio ambiente y tecnología se interrelacionan entre sí y deben ser tratados como interconectados si se quieren alcanzar las condiciones de saneamiento ambiental y ecológico para la supervivencia de la humanidad.

De acuerdo con Lund (Lund, 2006), es necesaria la innovación tecnológica para los futuros sistemas de energía sostenibles. Con esto, la emisión de gases de efecto invernadero tal como el dióxido de carbono se debe reducir, o al menos mantener. Esto implica tanto voluntad política como tecnológica para hacer frente al problema, ya sea a través de la conservación de energía, o el secuestro y la captura de carbono. Además, es necesario el desarrollo de recursos energéticos libres de carbono. Por ejemplo, Francia recortó las emisiones de dióxido de carbono en un 27% en menos de 10 años, a pesar del creciente consumo de energía (Baptiste PJ, 2003).

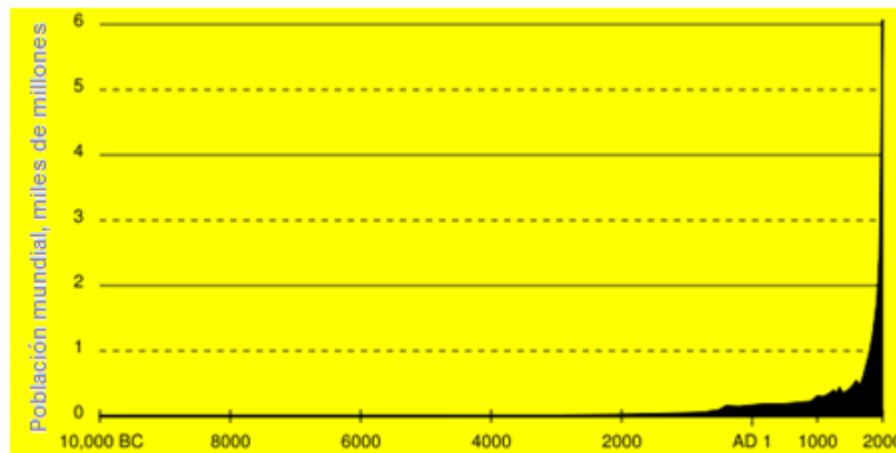


Fig. 1. Crecimiento de la población a nivel mundial (Y. H. Enteria N, Mochida A, Takaki R, Satake A, Yoshie R, et al., 2009).

El problema del consumo de energía está relacionado con situaciones ambientales. Al quemar fuentes de energía convencionales, se emite gran cantidad de gases de efecto invernadero (GHG), especialmente CO<sub>2</sub> (Kahn JR, 2006). La emisión de CO<sub>2</sub> está aumentando cada año, el cual en su mayoría proviene de las regiones en desarrollo (IEA, 2004, 2006 y 2008). Esta emisión de CO<sub>2</sub> cada vez mayor proveniente de dichos países, se debe al enorme avance económico de estas regiones. Además, en esas regiones, la población está aumentando enormemente lo que también se traduce en un mayor consumo de energía (Silveira JJ, 2006), (York, 2007) y (Barrios S, 2006). También, como parte

del desarrollo económico se observa un uso masivo en la aplicación de aparatos, dispositivos y equipos que contribuyen a los problemas medioambientales, ya que muchos de ellos contribuyen con gases de efecto invernadero (GEI) y con sustancias que agotan la capa de ozono. Entre ellos, los equipos de aire acondicionado y calefacción contribuyen con muchos de esos gases (Luken R, 2006).

Como se mencionó con anterioridad, es necesaria la innovación tecnológica para el uso de energías sostenibles. Sin embargo, su desarrollo e implementación son muy costosos, como es el caso de la energía de las olas (Bernhoff H, 2006). Por lo anterior, es necesario tanto el apoyo del gobierno como la implementación de programas serios, de modo que esas fuentes de energía sean gradualmente desarrolladas y utilizadas.

Tal como se presenta en la fig. 2, las emisiones de CO<sub>2</sub> se pueden reducir mediante el desarrollo y aplicación de tecnología. Nandwani (Nandwani, 2006) muestra que minimizar el retorno de la inversión y maximizar la capacidad de las tecnologías lo hacen atractivo. Así, por ejemplo el uso de sistemas combinados tales como la combinación de calefacción y generación de potencia (CHP), o la combinación de sistemas de calefacción, enfriamiento y potencia (CCHP) pueden reducir el consumo de energía y la generación de gases de efecto invernadero.

El suministro y demanda de energía, junto con la emisión de contaminantes es una de las mayores amenazas a la sostenibilidad de la civilización humana. En adelante, el problema del suministro y demanda de energía se está convirtiendo en un escenario de graves problemas económicos y políticos. Las fuentes de energía convencionales llamados a "base de carbono" son la principal fuente de energía desde el comienzo de la civilización humana. Sin embargo, el aumento de la demanda ha sido enorme desde el inicio de la revolución industrial. Las fuentes de energía basadas en el carbono (petróleo, gas y carbón) constituyen la mayor parte del suministro mundial de energía. Ellas representan el 85%, según el informe de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2004, 2006 y 2008). La demanda de estas fuentes de energía se espera que aumente con la explosión demográfica, la urbanización y la industrialización que ya están ocurriendo. Un gran porcentaje del suministro de energía va al mundo en desarrollo que representa ya dos terceras partes.

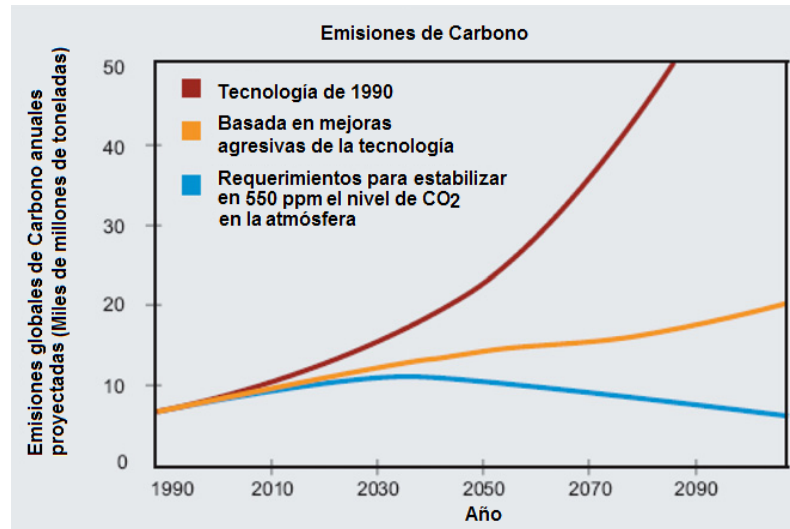


Fig. 2. Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a través del uso de tecnología limpia (GCEP, 2011).

Un escenario alarmante con respecto a la oferta y la demanda de energía es el pico del suministro debido a la rápida utilización. Este escenario también provoca inestabilidad, pues existe imprevisibilidad a largo plazo por la situación del suministro de energía debido a la dominación del proveedor de energía a partir de determinada región y agrupación. Así, la principal fuente de energía convencional viene de depósitos que se encuentran en Oriente Medio y Rusia. El Medio Oriente representa el 33% del suministro mundial de energía convencional. Además, la Federación Rusa se está convirtiendo en el proveedor mundial, en particular de gas natural. Debido a la situación anterior, la política energética y económica está jugando un papel muy importante. Entre los ejemplos más conocidos están la crisis del petróleo de 1973, la guerra del Golfo y la crisis entre Rusia y Ucrania.

La demanda de las fuentes de energía convencionales es en su mayoría para alimentar a las plantas generadoras de electricidad y el transporte. Estos dos representan el 54% de la demanda total de energía y se espera que aumente a 60% en el 2030. El consumo de energía para la industria del transporte, los servicios domésticos, la agricultura y los usos no energéticos, aumentará un 1.6% anual hasta 2030, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) (IEA, 2004, 2006 y 2008). El porcentaje de consumo de energía eléctrica se incrementará de un 16% en 2002 a un 20% en 2030 basándose en el informe anterior. Las plantas de energía eléctrica que queman carbón, que generan el 45% de las necesidades de energía requerida por el mundo en desarrollo aumentarán al 47% en 2030. El producto interno bruto mundial (PIB), se espera que crezca en un 3.2% entre 2002 y 2030. El 1% del incremento en el PIB corresponde al 0.6% de aumento en el consumo de energía primaria. Como el consumo de energía está directamente relacionado con el tamaño de la población; a partir de la población actual de 7,000 millones de personas si se prevé un crecimiento del 1% anual, en el año 2030, el tamaño de la población será de unos

8,100 millones de personas. Además la migración de la población desde las zonas rurales a los centros urbanos va a ocurrir y tenderá a aumentar aún más la demanda de energía (York, 2007).

La condición medioambiental presente es muy compleja debido a los problemas de emisión de gases de efecto invernadero, de sustancias que agotan la capa de ozono, de partículas en el aire, metales pesados y contenido químico y biológico en el aire (Le Treut H, 2007). La fig. 3 muestra el incremento de los gases de efecto invernadero en el aire. Estas emisiones a gran escala de los gases y materiales en el aire debido a las actividades humanas tienen efectos perjudiciales para la salud humana y para la sostenibilidad de la civilización (Strum M, 2006). En el caso de las partículas del aire, como los compuestos químicos y biológicos, ellos representan un peligro para la salud directamente. Hay estudios que muestran que el calentamiento global y el cambio climático se deben realmente a la gran cantidad de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera (Le Treut H, 2007).

Desde el inicio de la revolución industrial, gran cantidad de gases de efecto invernadero fueron depositados en la atmósfera. Por lo tanto, el aumento de contaminantes globales se debe a las actividades humanas (urbanización, industrialización, y otros). Los gases de efecto invernadero son la principal causa del calentamiento global. Las sustancias que agotan la capa de ozono son causa del adelgazamiento de dicha capa. Así, todos ellos tienen consecuencias como el incremento de la temperatura global que tiene graves consecuencias para el clima, con patrones como inundaciones, ciclones y otras perturbaciones meteorológicas. La anterior situación tiene graves consecuencias para la sostenibilidad global según lo concluido por numerosos estudios (Bard, 2006).

Con esto, un enfoque alternativo es necesario para enfrentar el masivo consumo de energía y la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero a gran escala. Tal enfoque alternativo, como la utilización de fuentes alternas de energía es una de las opciones. El desarrollo de tecnologías eficientes y limpias resuelve el problema de las emisiones de gases a gran escala (gases de efecto invernadero y sustancias que agotan la capa de ozono). Las políticas sobre conservación de energía y protección al medio ambiente, tales como los portafolios de energía renovable son una de las mejores opciones para empezar a hacer frente a este problema global (Aldy JE, 2008).

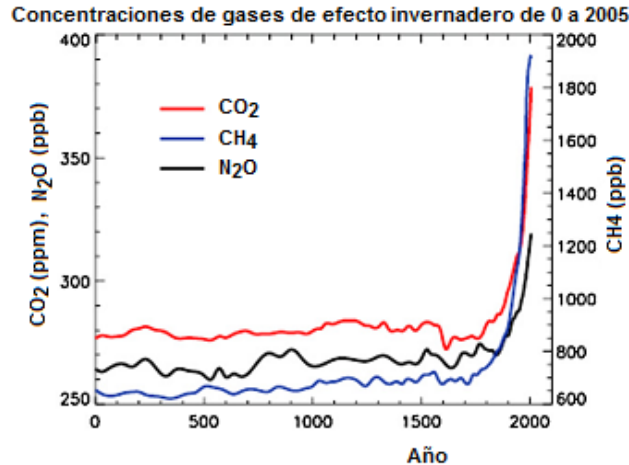


Fig. 3. Concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero de larga duración (Le Treut H, 2007).

## 1.2 Edificios y Confort Humano.

El sector de la construcción (residencial y comercial) consume un gran porcentaje de las fuentes de energía primaria para soportar su operación y mantenimiento. La mayor parte de este consumo es para apoyar las actividades de los habitantes. Esto se debe al hecho de que la mayoría de las actividades humanas se realizan en medioambientes interiores -casas, oficinas, mercados, entretenimiento, industrias, entre otros. Así, para reducir el consumo de energía en el sector de la construcción, se pueden adoptar diferentes medidas abordar dicha cuestión. Este sector es uno de los principales consumidores de energía, llegando al 50% del total, si se incluyen edificios comerciales e industriales (Zimmermann M, 2005). El consumo energético de este sector es utilizado para electrodomésticos, confort térmico y otros, tales como iluminación. A medida que la población mundial crezca, con la urbanización que implica, y un nivel de vida cada vez más alto, se espera que el consumo de energía del sector de la construcción se incremente. Un estudio muestra que el tamaño de la población y la estructura por edades tienen efectos sobre el consumo de energía. El consumo del sector de energía eléctrica se incrementará en un 119% entre 2002 y 2030. El sector residencial, incluyendo la agricultura representó el 56.7% en 2006 frente al 44.2% en 1973 respecto al consumo de energía eléctrica (IEA, 2004, 2006 y 2008).

La provisión de condiciones de confort y condiciones saludables consume gran cantidad de la energía de los edificios. La energía necesaria para obtener condiciones saludables y confort térmico se acerca a 50% del consumo total de energía de los edificios, llegando en ciertas zonas hasta el 65%, sobretodo en zonas con climas calientes y húmedos. En la mayoría de los casos, la energía necesaria es energía eléctrica de alta calidad. Como la mayor parte las plantas

generadoras de energía eléctrica consumen gran cantidad de combustibles fósiles para la generación de energía, significa que la provisión de condiciones de confort térmico humano contribuye con el alto consumo de energía basada en el carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero. De este modo, los métodos alternativos son necesarios cuando se habla de la reducción de consumo de energía convencional y recortar las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es imperativo no sacrificar las condiciones de confort térmico interior sano en aras de la reducción del consumo de energía (Day AR, 2009).

Una gran parte de la energía demandada por los edificios es usada para soportar las condiciones de confort térmico interior. En edificios comerciales es cercana al 50% y varía de acuerdo a la zona climática en que se encuentre localizado el edificio. Hay aproximadamente unos 368 millones de aires acondicionados y bombas de calor instalados alrededor del mundo. La mayor parte del mercado del aire acondicionado esta en el rango de 2-700 kW. En su mayor parte (90%) debajo de los 15 kW de capacidad (IPCC). Una gran parte del consumo eléctrico de los edificios es usado para operar equipos de enfriamiento o calefacción. En climas cálidos y húmedos, la mayor parte del consumo de energía eléctrica es usada para el enfriamiento de los edificios, sobretodo en temporada de verano.

La provisión de condiciones de confort térmico en el interior de los edificios, ya sea para enfriamiento o calefacción es obtenida por equipos llamados aires acondicionados y también por otro tipo de equipos llamados bombas de calor. La mayor parte de esos equipos funcionan por medio del sistema mecánico de compresión de vapor. Varias investigaciones han conducido a mejorar la eficiencia de dicho sistema y a un menor daño al ambiente. Sin embargo, dicho sistema aun consume gran cantidad de energía en forma de energía eléctrica de alta calidad. La principal fuente de energía del sistema mecánico de compresión de vapor es energía eléctrica que se toma de la red eléctrica. Este sistema tiene un rol preponderante en el consumo de energía eléctrica en los edificios, sobre todo en los climas calientes y húmedos. En oriente medio representa más del 70% del consumo total de energía eléctrica. En Europa, 10% del consumo de energía del sector de la construcción es para apoyar la demanda de enfriamiento. En Hong Kong, 45% del consumo de la energía eléctrica de los edificios es también para enfriamiento (Zain ZM, 2007). En Japón, el 3% del consumo eléctrico de los edificios es para aplicaciones de enfriamiento. Se espera que en países tropicales que tienen climas calientes y húmedos, la demanda de energía para enfriamiento y deshumidificación sea muy alta.

Los sistemas de aire acondicionado alternativos que utilicen materiales, procesos y recursos energéticos alternativos pueden tener un enorme impacto en el consumo de energía de los edificios (IPCC, 2008). El uso de sistemas de aire acondicionado alternativo puede disminuir el uso de energía convencional al utilizar fuentes alternas de energía. Se han sugerido diferentes sistemas de enfriamiento alternativo activos para proveer enfriamiento al interior de los edificios

(Grossman G, 1981; Kim DS, 2008). Entre ellos están enfriamiento por inyección de vapor, enfriamiento por absorción y enfriamiento por desecante. Los sistemas de enfriamiento térmico que pueden ser operados a través de energía térmica de baja calidad directamente son opciones importantes para el enfriamiento de los edificios (CFA., 2006). Con ellos, la energía solar puede ser aprovechada para tales propósitos. La principal ventaja de esos sistemas es que la carga de enfriamiento está en fase con la radiación solar disponible. De este modo, durante el verano, coincide una alta carga térmica con una alta radiación solar disponible.

Considerando que en México el consumidor final de energía eléctrica se divide principalmente en uso industrial y residencial, siendo más de la tercera parte del consumo de esta (IEA, 2009). Y en lo que respecta a la zona de estudio de Puerto Vallarta, durante 2009 se tuvo un volumen de ventas de energía eléctrica de 638,250 Megawatts-hora (MWh), (INEGI, CFE, 2009). Por tal motivo es preponderante que a nivel residencial e industrial, el consumo de energía se reduzca para evitar efectos negativos al medio ambiente, en nuestro país.

### 1.3. Soluciones posibles

1. Acondicionar los espacios para un menor uso de la energía, mediante tipos de materiales aislantes y técnicas de arquitectura bioclimática.
2. Generar energía eléctrica a partir de fuentes no contaminantes.
3. Utilizar equipos que no consuman energía eléctrica o sea mínimo su uso, como los Sistemas Activados Térmicamente por fuentes alternativas. Una opción es el sistema de enfriamiento evaporativo con desecante, el cual utiliza energía térmica de baja calidad, su refrigerante es el agua y puede ahorrar hasta un 50% en energía eléctrica (Henning HM., 2001).
4. Combinaciones de las anteriores.

Los sistemas de aire acondicionado alternativos que utilicen materiales, procesos y recursos energéticos alternativos pueden tener un enorme impacto en el consumo de energía de los edificios (IPCC, 2008). El uso de sistemas de aire acondicionado alternativo puede disminuir el uso de energía convencional al utilizar fuentes alternas de energía. Se han sugerido diferentes sistemas de enfriamiento alternativo activos para proveer enfriamiento al interior de los edificios (Grossman G, 1981; Kim DS, 2008). Entre ellos están enfriamiento por inyección de vapor, enfriamiento por absorción y enfriamiento por desecante. Los sistemas de enfriamiento térmico que pueden ser operados a través de energía térmica de

baja calidad directamente son opciones importantes para el enfriamiento de los edificios (CFA., 2006). Con ellos, la energía solar puede ser aprovechada para tales propósitos. La principal ventaja de esos sistemas es que la carga de enfriamiento está en fase con la radiación solar disponible. De este modo, durante el verano, coincide una alta carga térmica con una alta radiación solar disponible.

#### **1.4. Hipótesis**

Las tecnologías de enfriamiento evaporativo por desecante, pueden ser una opción viable como sistemas de aire acondicionado para uso residencial en la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta, Jalisco (clima cálido y húmedo en región Asia-Pacífico). Estos sistemas podrían estar enfocados principalmente en la aplicación de energía térmica solar en el sistema.

#### **1.5. Objetivo general**

Obtener una visión general de las tecnologías de enfriamiento evaporativo activadas térmicamente con desecantes y la aplicación de la energía solar en este tipo de sistemas, que pueden ser activados y operados con energía térmica de baja calidad.

#### **1.6. Objetivos específicos**

- Presentar opciones de métodos alternativos para proveer condiciones de confort térmico y un medioambiente saludable en el interior de los edificios a través de tecnologías de enfriamiento con desecante activadas térmicamente con energía térmica de baja calidad –Desecantes sólidos, desecantes líquidos y sistemas híbridos de enfriamiento con desecantes.
- Presentar la aplicación en el aire acondicionado de la deshumidificación desecante giratoria en los siguientes tres aspectos: el desarrollo de materiales desecantes avanzados, la optimización de la configuración del sistema y la utilización de la energía solar y otras fuentes de calor.
- Resumir algunos de los problemas fundamentales que empujan más hacia la investigación y el desarrollo de esta tecnología.





- Proponer la tecnología de enfriamiento con desecante que sea la más adecuada a la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta (ZMPV); esto de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada y las condiciones climáticas de la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta (ZMPV), Jalisco, México.



# Capítulo 2

## Desarrollo

### 2.1 Principios y conceptos del enfriamiento con desecantes

Se entiende al enfriamiento térmico a aquel en el cual se aplica energía calorífica para producir el efecto de enfriamiento (Grossman, 2002). Sin embargo, ya que las tecnologías son muy variadas en sus principios de funcionamiento y los requisitos de calor, algunas tecnologías de refrigeración térmica tienen aplicaciones limitadas. La ventaja principal del sistema de enfriamiento térmico o del sistema operado térmicamente contra la refrigeración por compresión de vapor es la aplicación de energía térmica directa para el funcionamiento del sistema. En este tipo de sistemas se puede usar energía térmica de baja calidad para operar el sistema. Además de lo mencionado con anterioridad, se pueden usar diversas fuentes de energía para activarlos, tales como el calor desperdiciado de procesos y otros. El concepto de refrigeración térmica es que la mayor parte de la energía necesaria para operar el sistema de refrigeración y proporcionar un efecto de enfriamiento se basa en la utilización de energía térmica. La fig. 4 muestra el principio termodinámico general del sistema de enfriamiento térmico. El concepto está basado en la máquina de Carnot (Abrahamsson K, 1993). Sin embargo, el sistema de enfriamiento térmico utiliza energía eléctrica para la operación de ventiladores, bombas y sistemas de control.

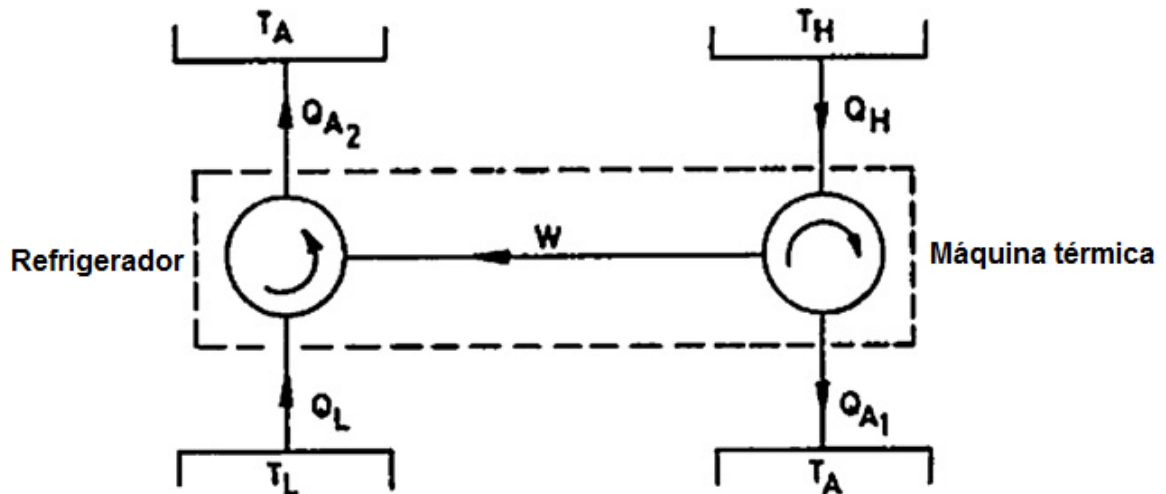


Fig. 4. Principio termodinámico del sistema de enfriamiento térmico (Grossman G, 1981).

Energía térmica combinada con energía eléctrica es posible de generar a partir de la energía solar por medio de un colector termoeléctrico. Este concepto ha sido realizado por Mittelman et al. (Mittelman G, 2007) y Kribus et al. (Kribus A, 2006).

Desde el punto de vista termodinámico, el rendimiento del sistema depende de la temperatura de la fuente de energía térmica y de la temperatura del efecto de enfriamiento. El sistema se basa en las condiciones de temperatura ambiente. Por lo tanto, el rendimiento del sistema termodinámico se puede obtener sobre la base de las condiciones de temperatura del sistema en funcionamiento. Los sistemas de enfriamiento activados/operados térmicamente tienen amplio potencial de aplicaciones. No sólo son aplicables para edificios, sino también a otros sistemas de producción de energía térmica (como calor residual). El transporte y la industria son los otros dos sectores con un buen potencial para el sistema de refrigeración térmica. Así, Mazzei et al. (Mazzei P, 2005) discuten la provisión de confort térmico del sistema de refrigeración activado térmicamente basado en desecante. El sistema puede ahorrar energía convencional hasta un 50% como se comenta por Henning et al. (Henning HM, 2001). Por lo tanto, el sistema de enfriamiento con desecante tiene potencial para el desarrollo y la aplicación a través de la utilización de los recursos energéticos.

Los sistemas de aire acondicionado y de ventilación basados en desecante utilizan la capacidad de los materiales desecantes para remover el contenido de humedad del aire por procesos naturales -el proceso de sorción. El proceso de sorción (adsorción y absorción) es una interacción entre las moléculas absorbentes y sorbato través de interacción intermolecular. Dado que los materiales desecantes tienen baja concentración de vapor de agua, la humedad del aire es atraída a la superficie de los materiales desecantes, debido a la diferencia de presión de vapor de agua entre el aire y la superficie desecante. Con el fin de que el material desecante pueda ser utilizado de nuevo, es necesaria la aplicación de energía térmica para remover el contenido de humedad del material desecante. La figura. 5 muestra un diagrama del concepto básico de las tecnologías de enfriamiento con desecantes activadas térmicamente.

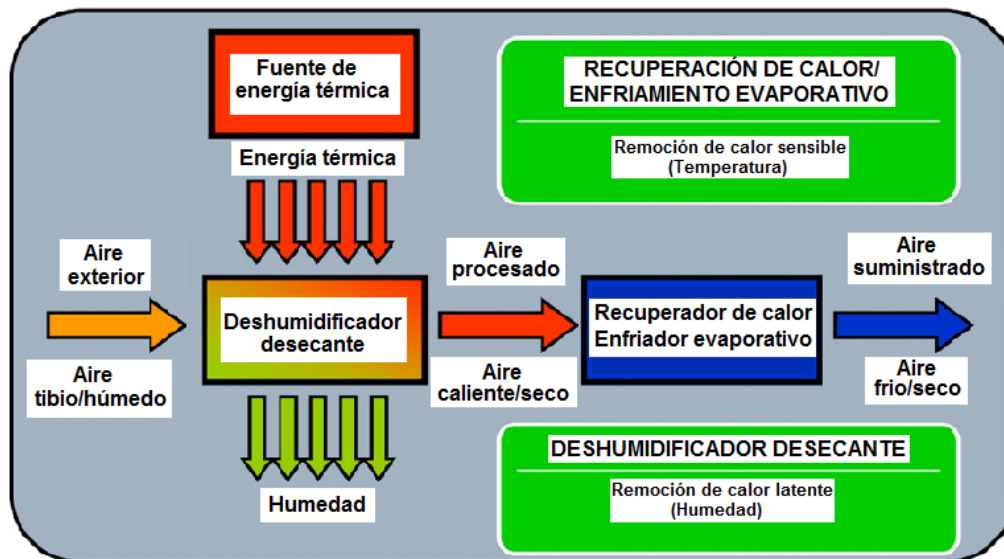


Fig. 5. Conceptos básicos y principio del enfriamiento con desecante

### 2.1.1. Mecanismo de remoción de humedad

Todos los materiales capaces de atraer la humedad son llamados desecantes. Desecantes comerciales mantienen entre el 10% de humedad (ASHRAE, 1989). Los desecantes comerciales capturan la humedad hasta que alcanzan el estado de equilibrio con el aire circundante e incluso algunos absorben más allá del contenido de humedad del aire. La eliminación de la humedad del desecante puede hacerse ya sea por calor o por la reducción de la presión. En aplicaciones comerciales, el calentamiento es el método más preferido, mientras que para los procesos industriales, la reducción de presión es el preferido.

La adsorción es un fenómeno superficial en la interfase de dos fases, en la que las fuerzas de cohesión, incluidas las fuerzas de Van der Waals y los enlaces de hidrógeno actúan entre las moléculas de todas las sustancias independientemente de su estado de agregación. El proceso se llama fisisorción.

La absorción es un proceso químico causado por las fuerzas de valencia llamados quimisorción. El proceso de atraer la humedad del aire es o bien por adsorción o por absorción: el proceso de adsorción es un proceso físico en el que la propiedad del material desecante sigue siendo el mismo, mientras que en el proceso de absorción, además de atraer la humedad, la característica física del material cambia.

Los materiales desecantes pueden ser sólidos o líquidos: los desecantes sólidos y adsorbentes hidrófilicos son el gel de sílice, alúmina activada y las zeolitas con excepción del cloruro de calcio que es absorbente. Los adsorbentes sólidos hidrófobos comerciales son los carbones activados y ciertos óxidos metálicos, especialmente hidruros metálicos porosos y compuestos adsorbentes desarrollados. Algunos materiales desecantes son combinaciones de absorbente y adsorbente para mejorar sus propiedades físicas y su capacidad de sorción llamados compuestos.

El mecanismo básico de la sorción de humedad entre el aire y la humedad del material desecante es la diferencia en la presión de vapor de agua entre la superficie del desecante y del material. La absorción de la humedad del aire hacia el desecante es cuando la presión de vapor en el aire es más alta, la eliminación de vapor a partir del material desecante se realiza cuando la presión de vapor en el aire es menor que en el material desecante. Cuando la presión de vapor es la misma tanto en el aire y en el material desecante, la condición de equilibrio que se alcanza y se detiene el proceso de sorción. El único medio para hacer que el proceso de adsorción continúe es mediante el uso de fuerzas externas, tales como aumentar la presión de aire, disminuir la temperatura o por aplicar fuerza electromotriz artificial. El mismo procedimiento se aplica para la eliminación de la humedad del material desecante que se hace en sentido contrario.

En las aplicaciones industriales, el proceso de sorción basado en el cambio de presión se denomina proceso de oscilación de presión y es más común en los procesos de purificación de gas. En aplicaciones comerciales, el funcionamiento del proceso de desecante se realiza mediante el cambio de la temperatura que se denomina proceso de oscilación de temperatura. La guía de recursos tecnológicos de enfriamiento por desecante elaborada por los Laboratorios de Investigación de Ingeniería de Construcción del Ejército de los EE.UU. (AIC, 2000), muestra las múltiples aplicaciones del enfriamiento por desecante desde la planeación, programación, presupuestación, diseño y guía de ingeniería, construcción, operación y gestión, la cual puede ser aplicada en edificios civiles.

El sistema de enfriamiento por desecante se basa en material desecante para controlar el contenido de humedad del aire tanto para la refrigeración como para la deshumidificación del aire. El material desecante reduce la humedad del aire que pasa a través de él para cualquiera de las aplicaciones de enfriamiento, ya sea por evaporación o por otros medios de enfriamiento del aire.

### **2.1.2. Procesos de enfriamiento del aire**

El aire, después de pasar por el material desecante está caliente y seco debido a la conversión del calor latente del aire en calor sensible, la liberación de calor de sorción en el caso del enfriamiento por desecante sólido, y el traspaso de calor desde el lado de regeneración hacia el lado del proceso. Hay varios procesos de enfriamiento de aire para la reducir el contenido de energía sensible del aire (temperatura). Los procesos naturales tales como el enfriamiento evaporativo, intercambio de calor con agua fría y la aplicación de las bombas de calor (sistema híbrido) se realizan por el aire.

Los sistemas más ampliamente utilizados para enfriar aire cuando se usa enfriamiento por desecante son los enfriadores evaporativos (Henning HM, 2001). Esos enfriadores se pueden aplicar directamente (adición de humedad) o indirectamente (uso de aire secundario para el intercambio de calor sensible con el aire primario). Hay muchos diseños y aplicaciones para el enfriamiento evaporativo directo. Por lo tanto, se aplica ampliamente en el sistema de enfriamiento por desecante. Otro método natural de enfriamiento del aire puede hacerse a través de intercambio de calor con agua fría subterránea. La temperatura del agua del suelo es más fría que el agua de la llave. El intercambio de calor con el aire del material desecante puede reducir la temperatura del aire. Además, la aplicación de otros dispositivos de refrigeración tales como los enfriadores de absorción y el sistema de compresión de vapor y otros dispositivos de refrigeración disponibles pueden ser utilizados para enfriar el aire. La principal ventaja de la refrigeración de aire mediante el sistema de refrigeración disponible

(bomba de calor y enfriadores) es que puede ser operado por encima de la temperatura del punto de rocío del aire. Por lo tanto, su coeficiente de rendimiento se incrementa ya que opera a una temperatura mayor.

Como los desecantes pueden ser sólidos o líquidos, los sistemas de aire acondicionado con desecantes se pueden clasificar en dos categorías, a saber, sistemas de aire acondicionado con desecantes sólidos, que pueden ser de lecho fijo y de rueda giratoria, y los sistemas de aire acondicionado con desecantes líquidos. Debido a que son ventajosos en el manejo de las cargas de calor latente, todas estas tecnologías se han utilizado ampliamente. Especialmente, atraen más atención los sistemas de aire acondicionado con desecantes rotativos, que son compactos y menos sujetos a la corrosión y puede trabajar continuamente. Hasta la fecha, se han llevado a cabo estudios extensos sobre acondicionamiento de aire con desecante giratorio sobre la base de la simulación matemática (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ., 2008), el análisis termodinámico (Kanoglu M, 2007), la investigación experimental y la aplicación práctica (Henning HM, 2001). Una gran cantidad de sociedades académicas, institutos de investigación, universidades, empresas, etc. (Pesaran AA, 1992), han participado en estos trabajos, y han sido alcanzadas mejoras significativas en el rendimiento del sistema, el coste y la fiabilidad. En la actualidad, la investigación continua y el desarrollo (I+D) que trabajan para la tecnología de acondicionamiento de aire con desecante giratorio se han dirigido a: (1) los materiales avanzados desecantes, (2) configuraciones de sistemas óptimos y las correspondientes aplicaciones prácticas. Este trabajo se centrará principalmente en los recientes esfuerzos en estos aspectos y algunos trabajos anteriores también se incluyen para la consistencia e integridad. Por otra parte, se resumen los obstáculos y las necesidades de I+D para trabajos futuros.

### **2.1.3. Enfriamiento y deshumidificación del aire**

La deshumidificación del aire con materiales desecantes y el enfriamiento del aire por medio de procesos de enfriamiento evaporativo o por otros medios, separa el manejo de los contenidos de energía sensible y latente del aire. Por lo tanto, con estos procesos, diferentes fuentes de energía se puede utilizar para manejar la energía sensible y latente del aire. En una bomba de calor ordinaria, la manipulación de estas dos cargas térmicas del aire es realizada en el mismo proceso, por lo tanto, el rendimiento del sistema se reduce debido a la utilización excesiva de energía a partir de una sola fuente.

El sistema de enfriamiento con desecante maneja de manera separada la energía latente del aire de la energía sensible con la aplicación de material desecante para remover la humedad del aire por procesos naturales –proceso de

sorción. Por otra parte, la reducción del contenido energía sensible del aire se puede hacer de muchas maneras diferentes. El enfriamiento del aire puede ser obtenido con métodos naturales, como el enfriamiento evaporativo y con agua fría del subsuelo. Por otro lado, las bombas de calor y enfriadores de sorción se pueden utilizar para enfriar el aire. Por lo tanto, con este método, su rendimiento es mayor debido a su funcionamiento a mayor temperatura -por encima de la temperatura de punto de rocío del aire. De este modo, los sistemas de enfriamiento con desecante son métodos prometedores de enfriamiento y deshumidificación los cuales pueden utilizar diferentes fuentes de energía térmica, ya sea a partir de fuentes renovables de energía, fuentes no convencionales de energía o de sistemas que combinan calor y producción de energía.

La principal ventaja del sistema de enfriamiento por desecante es el manejo independiente de las cargas sensibles y latentes del aire. En el caso de la carga latente, el material desecante puede manejarla a través de la aplicación de energía térmica. En el caso de la carga sensible, se pueden aplicar tanto la recuperación de calor, como el enfriamiento evaporativo directo. Así, para el aire caliente y húmedo, con carga latente que alta, el potencial de reducción en el consumo de energía convencional (energía eléctrica) es posible. A pesar de que hay varios problemas que surgen dentro de la amplia aplicabilidad del sistema de enfriamiento con desecante, el sistema se está aplicado actualmente en diferentes condiciones climáticas.

#### **2.1.4. Características de materiales desecantes**

Los materiales desecantes han desempeñado un papel crucial en el desarrollo de acondicionamiento de aire con desecante. Las características del material desecante que se utilizan impactan significativamente el rendimiento de los sistemas de acondicionamiento de aire con desecantes. Comúnmente los materiales desecantes utilizados incluyen carbón activado, alúmina activada, tamiz molecular, gel de sílice, cloruro de litio, cloruro de calcio, etc.

Dos principios fundamentales para la selección de materiales desecantes apropiados son: (1) los materiales desecantes deben poseer gran cantidad de adsorción saturada y poder ser reactivados fácilmente, (2) el rendimiento de adsorción de los materiales desecantes deben acercarse al material de Tipo 1 M (Waugaman DG, 1993), que representa la forma óptima para aplicaciones de aire acondicionado, como se muestra en la fig. 6. Cabe señalar que, aunque la fracción de carga normalizada (contenido actual de agua en el desecante que corresponde a una cierta HR vs el máximo contenido de agua en el desecante que corresponde a una HR = 100%) del tipo de material 1E es mayor que la de material de Tipo 1



M, también significa que es más difícil de regenerar debido a que su HR es muy baja.

Las investigaciones recientes sobre los desecantes sólidos generalmente constan de cuatro aspectos, a saber, la modificación de desecante convencional, desecantes naturales a base de roca, bio-desecantes (Beery KE, 2001) y desecantes compuestos. Para la deshumidificación de los desecantes giratorios, los investigadores están buscando encontrar materiales desecantes que se acerquen al material de tipo 1M en su rendimiento de absorción (Waugaman DG, 1993), y se han identificado compuestos formados por sales porosas adsorbentes que pueden ser efectivas.

Como se sabe, mientras que la capacidad de adsorción de gel de sílice disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura, especialmente cuando la presión parcial del vapor de agua es baja, el cloruro de litio y el cloruro de calcio tienen una mayor capacidad higroscópica, pero el fenómeno de lyolysis, que conduce a la pérdida de material desecante y puede reducir el rendimiento, frecuentemente ocurre después de la formación de hidrato cristalino sólido. Sin embargo, el desarrollo de gel de sílice porosa y materiales compuestos a base de haloides no sólo combinan sus ventajas, sino superan la limitada capacidad de deshumidificación de gel de sílice y los problemas de corrosión y cristalización de los haloides. Además, la correspondiente temperatura de regeneración requerida se reduce significativamente, lo que facilita el uso de fuentes de calor de baja calidad.

Hasta ahora, se han realizado amplios esfuerzos de I+D sobre desecantes compuestos. Un número de compuestos desecantes basados en gel de sílice se han desarrollado. Kuma y Okano (Kuma T, 1989) han fabricado un gel de sílice y sintetizado compuestos desecantes a base de zeolita. Debido a la combinación de los méritos de gel de sílice y la zeolita, de las cuales las capacidades de adsorción son favorables en condiciones de altas y bajas humedades relativas, respectivamente, los materiales compuestos desecantes han sido capaces de exhibir una excelente capacidad de adsorción de humedad y a obtener un punto de rocío ultra -bajo, y por lo tanto podría aplicarse para deshumidificar aire de muy alta humedad y alcanzar la deshumidificación profunda. Sin embargo, la tecnología de procesamiento es comparativamente complicada. Aristov et al. (Aristov Yul, 1996) han fabricado algunos compuestos adsorbentes con sales inorgánicas ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{NaSO}_4$ ) y gel de sílice o  $\text{SiO}_2$ .

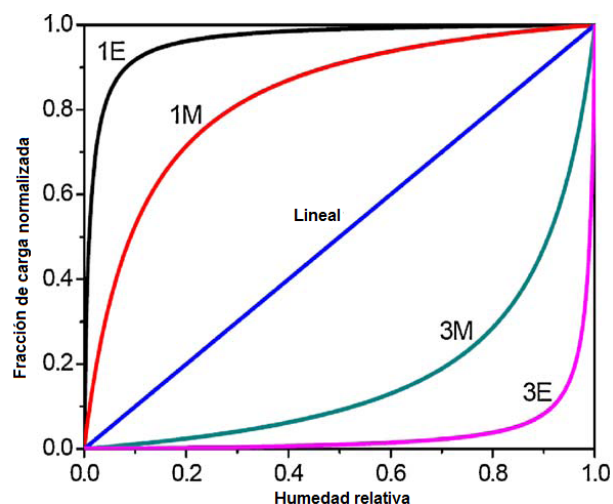


Fig. 6. Comparación entre isoterms de adsorción de tipo 1 extremo (1E), tipo 1 moderado (1M), lineal, tipo 3 moderado (3M), y tipo 3 extremo (3E) (Collier RK, 1986).

Los compuestos desarrollados se han aplicado a dos tipos de equipo para adsorber agua del aire y se han probado la eficiencia dinámica y equilibrio de adsorción. Como informó, alrededor del 80% del agua adsorbida pudo ser desorbida con una correspondiente temperatura de desorción en el intervalo de 80-90 °C. Liu et al (Liu YF, 2003) introdujeron un compuesto adsorbente  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaCl}_2$  que fue fabricado con gel de sílice y cloruro de calcio macroporoso. Los impactos de la estructura de los poros y la relación de mezcla se estudiaron. Ellos encontraron que el equilibrio de adsorción del compuesto desecante alcanza hasta 0.4 g de  $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$  de peso seco de adsorbente en condiciones de ingesta de 25°C y 40% de humedad relativa, que era 5.7 veces mayor que la de gel de sílice macro-poroso, 2.1 veces mayor que el gel de sílice microporoso, 1.9 veces la de la zeolita sintética 13X y 6.8 veces la de carbón activado. Aun más, el agua adsorbida en el adsorbente podía ser desorbida con fuentes de calor de baja calidad de 60-80°C. Zhang y Jia (Jia CX, 2006) han investigado compuestos basados en gel de sílice impregnados con  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{LiCl}$  sucesivamente. La investigación experimental indicó que la eliminación de humedad de la rueda con gel de sílice- $\text{CaCl}_2$  era más grande que la de la rueda con gel de sílice convencional por un valor medio de alrededor de 20% con una temperatura de regeneración inferior a 120°C bajo condiciones típicas de climas calientes y húmedos.

Las comparaciones entre las isoterms de adsorción de gel de sílice- $\text{LiCl}$  y desecantes tradicionales (gel de sílice y tamiz molecular 13X) fueron realizadas a temperaturas clásicas (25°C, 35°C y 40°C). Los resultados demostraron que la capacidad de adsorción se mejoró en aproximadamente 67-145%. Además, González et al (Gonzalez JC, 2001) han desarrollado dos tipos de sepiolita a base de compuestos desecantes, a saber, sepiolita-carbón activado y cloruro de calcio-sepiolita. El primero combina la naturaleza hidrofílica y fibrosa de

la sepiolita con la estructura hidrófoba y porosa de carbón activado y amplía la gama de aplicaciones de la sepiolita (89-39%). Esto último mejora la capacidad de adsorción de la sepiolita sustancialmente y aumenta la capacidad de la sepiolita como regulador de humedad debido a la impregnación de cloruro de calcio. Tokarev et al (Tokarev M, 2002) sintetizaron un nuevo material de trabajo. Se informó que la absorción de agua era una combinación de una absorción de líquido y una adsorción heterogénea. Además, aunque el área superficial específica de la MCM-41 se redujo de 1050 m<sup>2</sup>/g a 325 m<sup>2</sup>/g, su capacidad de absorción aumenta hasta 0.75 g agua/g de sorbente seco, que garantiza una capacidad de almacenamiento de energía alta de 2.1 kJ/g.

Sobre la base de arcilla-CaCl<sub>2</sub>, Thoruwa et al (Thoruwa TFN, 2000) han desarrollado tres compuestos desecantes regenerativos solares a bajo costo,. Los resultados experimentales de la absorción de humedad y características de regeneración han demostrado que estos materiales podrían utilizarse para el secado de cultivos solares y deshumidificación de aire debido a la baja temperatura de regeneración menor a 100°C. Además, Mathiowitz et al (Mathiowitz E, 2001) han propuesto un concepto novedoso para la preparación de desecantes basado en mezclas poliméricas. En primer lugar, un agente canalizador hidrófilo se mezcla con un polímero hidrófobo para producir canales de interconexión hidrófilos en el polímero hidrófobo. A continuación, un material absorbente de agua se mezcla en la matriz polimérica para ser distribuido dentro de la porción hidrófila. El material compuesto se puede conformar en diferentes figuras y es adecuado para aplicaciones farmacéuticas e industriales.

## 2.2 Clasificación del enfriamiento con desecante

Las principales clasificaciones del sistema basado en desecante se hacen por los materiales del desecante usado en la reducción de humedad contenida en el aire y en la aplicación del material desecante con sistemas comunes de tratamiento de aire. La Tabla 1 muestra las clasificaciones de los sistemas de deshumidificación de aire basado en desecante y enfriamiento.

## Tecnologías de enfriamiento con desecante termicamente activado

Sistema de desecante solido	Sistema de desecante liquido	Sistema de desecante hibrido
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lecho fijo</li> <li>• Cinturón</li> <li>• Rueda de flujo axial</li> <li>• Rueda de flujo radial</li> <li>• Lecho de flujo cruzado</li> <li>• Rueda multipasos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorbedor rotativo</li> <li>• Esparado</li> <li>• Lecho empacado</li> <li>• Serpentín esparado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desecante solido               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rueda de flujo radial</li> <li>• Lecho de flujo cruzado</li> </ul> </li> <li>• Desecante liquido               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lecho empacado</li> <li>• Lecho de flujo cruzado</li> </ul> </li> </ul>

Tabla 1. Clasificación de las tecnologías de enfriamiento con desecante térmicamente activado.

El sistema basado en desecante solido usa materiales sólidos para el secado removiendo el contenido de humedad del aire. Hay diferentes tipos de materiales de desecante solido –silica gel, silicatos de titanio, cloruro de calcio, alúminas activadas, zeolita (natural y sintética), tamiz molecular, cloruro de litio, desecantes de base orgánica, polímeros y desecantes compuestos. La aplicación de estos materiales depende de los costos, condiciones de operación y la fuente de energía térmica (Grossman G, 1981).

El sistema basado en desecante líquido utiliza materiales desecantes líquidos para la remoción del contenido de humedad del aire. Los extensos materiales usados como desecante líquido son el cloruro de litio, bromuro de litio, cloruro de calcio y sustancias con base glicol. Además, la aplicación de estos materiales depende del costo, operación y la fuente de energía térmica. Además, algunos desecantes son corrosivos y requieren un manejo adecuado en su aplicación (Grossman G, 1981). Sin embargo, la principal ventaja del desecante líquido es la gran capacidad de remoción de humedad con bajos requerimientos de temperatura de regeneración.

El sistema en base hibrido está basado en ambos materiales desecantes solido o liquido usados para la remoción del contenido de humedad del aire en conjunto con la aplicación del sistema de compresión de vapor con un enfriador de aire y regenerador de desecante. El sistema hibrido de enfriamiento con desecante solido es usualmente una combinación del sistema de compresión de vapor y la rueda desecante giratoria (Sheridan JC, 1985). El condensador del sistema de compresión de vapor sirve como regenerador de la rueda desecante,

mientas, el evaporador sirve como el enfriador de aire del aire procesado (después de la rueda desecante) (Jia CX, 2006). La principal ventaja del sistema híbrido es el manejo independiente de la energía latente del aire y la energía sensible contenida. En este caso, el rendimiento de compresión de vapor se incrementa debido a que solo maneja el contenido de energía sensible del aire mientras que el material desecante maneja el contenido de energía latente del aire.

### **2.2.1 Enfriamiento con desecante sólido**

El sistema de acondicionamiento de aire con desecante rotatorio, que combina la tecnología de deshumidificación desecante y enfriamiento evaporativo, es ventajoso al estar libre de CFC, al usar energía térmica de baja calidad y controlar la humedad y la temperatura por separado. En comparación con el sistema convencional de compresión de vapor de aire acondicionado, conserva las ventajas de ser respetuoso del medio ambiente, ahorro de energía, sano, cómodo, etc. Investigaciones en curso y obras de desarrollo sugieren que los nuevos materiales desecantes y nuevas configuraciones del sistema tienen un potencial significativo para mejorar el rendimiento y la fiabilidad y reducir el costo y el tamaño del sistema de aire acondicionado con deshumidificador desecante giratorio, aumentando así su competitividad en el mercado y romper el nicho de mercado bastante pequeño actual.

Con el fin de ofrecer una visión general de los recientes esfuerzos en estos temas y mostrando como los sistemas de aire acondicionado con desecantes rotatorios se pueden diseñar y acoplar a la energía térmica disponible. Se presenta y analiza el estado de la deshumidificación desecante giratoria y el aire acondicionado en los siguientes tres aspectos: el desarrollo de materiales desecantes avanzados, la optimización de la configuración del sistema y la utilización de la energía solar y otras fuentes de calor de baja calidad, como la energía solar, la calefacción, el calor residual y la bioenergía. Se resumen también algunos de los problemas fundamentales que empujan más hacia la investigación y el desarrollo de esta tecnología.

Los materiales desecantes atraen la humedad, sobre la base de diferencias en la presión de vapor. Debido a su enorme afinidad para absorber agua y considerable habilidad para retenerla, se han aplicado ampliamente agentes desecantes a la carga marina, farmacéutica, electrónica, plásticos, alimentos, almacenamiento, etc (Wurm J, 2002). Recientemente, el rápido desarrollo de la tecnología de acondicionamiento de aire con desecante, que puede manejar las cargas de calor sensible y latente de forma independiente sin necesidad de utilizar CFC ni consumir una gran cantidad de energía eléctrica, y así satisfacer las demandas actuales de confort de los ocupantes, el ahorro de energía y protección

del medio ambiente, se ha ampliado la industria desecante para otras aplicaciones, tales como hospitales, supermercados, restaurantes, teatros, escuelas y edificios de oficinas.

La idea básica de acondicionamiento de aire con desecante es integrar las tecnologías de la deshumidificación desecante y el enfriamiento evaporativo en un solo equipo. Mientras que el primero adopta el agua como refrigerante y puede ser impulsado por energía térmica de baja calidad como la energía solar, la calefacción, el calor residual y la bioenergía, este último es una tecnología con costo cercano a cero. Esto indica que el aire acondicionado con desecante no sólo sería eficiente en consumo de energía y favorable al medio ambiente, sino también competitivo en costo, especialmente para las zonas cálidas húmedas y cálidas secas. Además, puesto que los desecantes eliminan la humedad en la fase de vapor sin líquido condensado, la deshumidificación con desecante puede continuar incluso cuando el punto de rocío del aire está debajo de la congelación, en cambio, la refrigeración basada en deshumidificación está limitada por el fenómeno de congelación que ocurre a 0 °C. Como resultado, el aire acondicionado con desecante es capaz de manejar el punto de rocío del aire a -40 °C, mientras que el aire acondicionado por compresión de vapor tradicional (VCA) es 4 °C (Mazzei P, 2005).

### **2.3. Procesos básicos de aire acondicionado con deshumidificación por desecantes rotatorios.**

La fig. 7 ilustra esquemáticamente el principio básico de funcionamiento del deshumidificador desecante giratorio. Como se ve, el material desecante se impregna en una estructura de soporte. La sección transversal de la rueda se divide en el lado de aire de proceso y el lado del aire de regeneración por tablilla. Cuando la rueda gira constantemente a través de dos secciones separadas, el aire de proceso es secado por el desecante debido a los efectos de adsorción del material desecante y material de soporte. Al mismo tiempo, el aire de regeneración se humidifica después de ser calentado por un calentador y desorber el agua de la rueda en tándem. Cabe señalar que el proceso de deshumidificación desecante está cerca de ser un procedimiento isoentálpico, a saber, simplemente convierte la energía latente en energía sensible y no produce ningún enfriamiento útil.

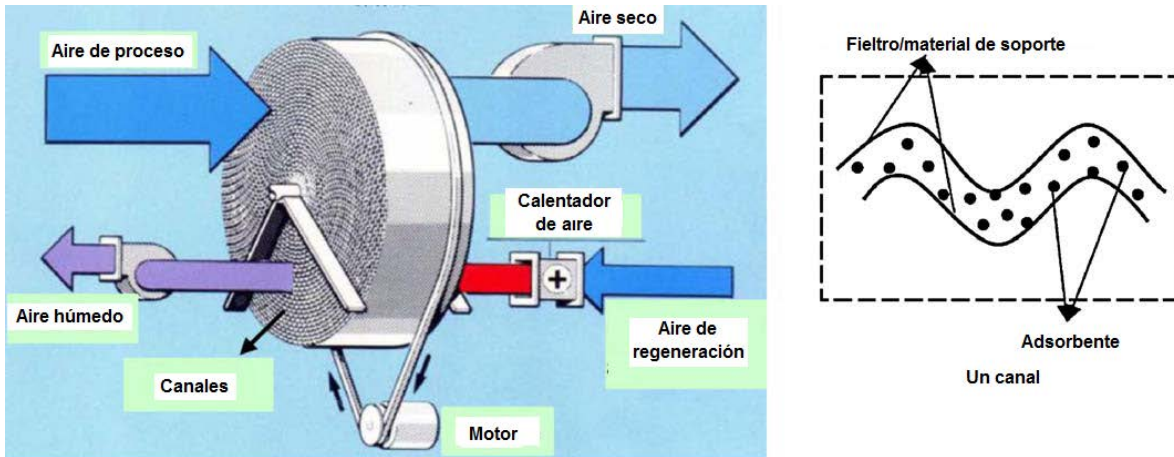


Fig. 7. Diagrama esquemático de un deshumidificador rotatorio desecante (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ., 2008).

Por lo tanto, con el fin de tener efecto de enfriamiento, un enfriador auxiliar tal como un enfriador evaporativo u otros equipos de aire acondicionado deben ser incorporados para eliminar el calor sensible; y el rendimiento de los sistemas de aire acondicionado con desecante está principalmente determinado por la configuración del sistema cuando el material desecante, estructura de la rueda y las condiciones de operación son invariantes. Por esta razón, varios tipos de sistemas de aire acondicionado con desecante rotativos se han propuesto y estudiado tanto analítica como experimentalmente (Waugaman DG, 1993).

La primera patente en el ciclo de acondicionamiento de aire con desecante giratorio fue presentado por Pennington en 1955 (Pennington, 1955). La fig. 8 muestra el ciclo de Pennington, también conocido como ciclo de ventilación, esquemática y psicrométrica. Aire ambiente en el punto de estado 1 se adopta como aire de proceso y pasa a través de una rueda desecante (DW), donde se elimina la humedad y la temperatura se incrementa debido al efecto de calor de adsorción. Luego este aire caliente y seco se enfría sensiblemente del punto 2-3 en un intercambiador de calor (HE). Después, el aire de proceso se enfría por evaporación al estado de aire de suministro al pasarlo a través de un enfriador evaporativo directo (DEC). En el lado del aire de regeneración, el aire de regeneración en el estado 5 es enfriado y humedecido en otro DEC. Este aire es entonces sensiblemente calentado en el intercambiador de calor con el aire de proceso para preenfriar el aire de proceso y precalentarse a sí mismo. La corriente de aire tibio es entonces calentada desde el punto de estado 7-8 por la fuente de calor (HS). Después de la regeneración de la DW, el aire se descarga en el punto de estado 9.

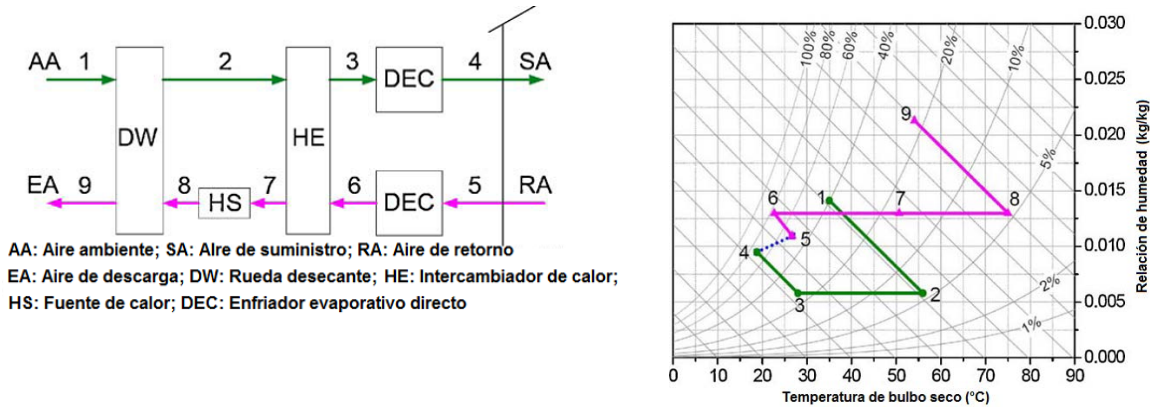


Fig. 8. Ciclo Pennington.

Cuando la salida de aire del edificio o de la habitación no está centralizado o no se encuentra en una ubicación conveniente para el co-procesamiento del aire ambiente para algunas aplicaciones, se propone un ciclo de ventilación modificada (Fig. 9), que también procesa el aire ambiente al edificio, pero utiliza el aire ambiente para la regeneración.

Es obvio que, los resultados térmicos incluyendo coeficiente térmico de rendimiento (COP) y capacidad de enfriamiento específica se reduce en comparación con el ciclo de ventilación estándar, debido a que tanto la relación de humedad y temperatura del aire ambiente son generalmente más altas que la del aire de retorno.

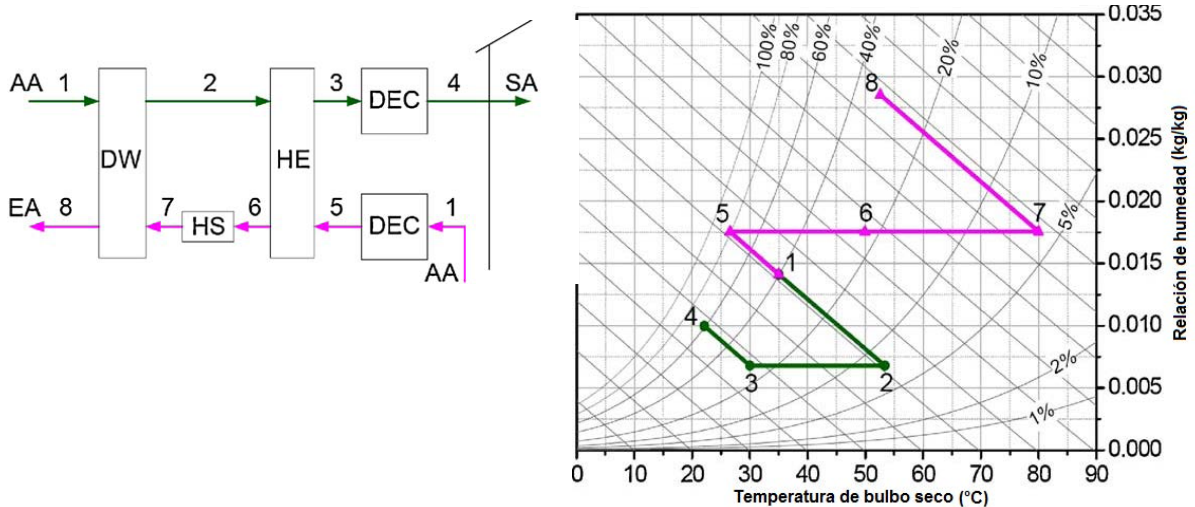


Fig. 9. Ciclo de ventilación modificado.

Para elevar la capacidad de enfriamiento, se desarrolla el ciclo de recirculación, que es una variación del ciclo de Pennington y reutiliza aire de retorno como aire de proceso. Como se representa en la fig. 10, el aire ambiente se utiliza para la regeneración en este ciclo. Debido a que la relación de humedad y temperatura son relativamente bajas, el COP térmico de este ciclo es



comúnmente no más de 0.8 (Waugaman DG, 1993). La principal desventaja de ciclo de recirculación es que carece de aire fresco.

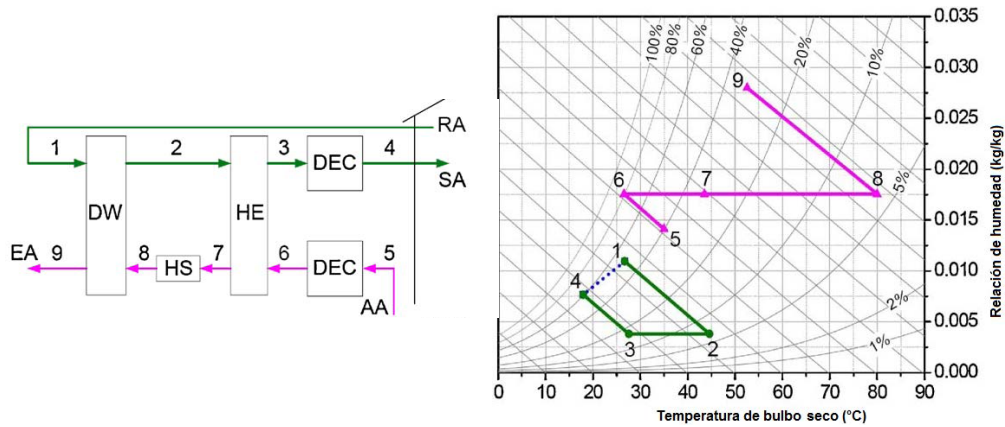


Fig. 10. Ciclo de recirculación

El ciclo Dunkle (Dunkle, 1965) combina las ventajas de ciclo de ventilación, que puede proporcionar aire frío con relativa baja temperatura para el HE, y el ciclo de recirculación, que puede proporcionar al espacio acondicionado una cantidad relativamente grande de la capacidad de refrigeración. Como se ve en la fig. 11, se incorpora un intercambiador de calor adicional. Como el ciclo de recirculación, el ciclo Dunkle también está limitado por la falta de aire fresco. Es obvio que el aire fresco no sólo significa comodidad y salud sino que también representa una carga adicional. Además, muchas cargas de enfriamiento no requieren que el aire exterior sea la fuente de sistema. Por lo tanto, el aire fresco debe mantenerse en el nivel requerido para asegurar un rendimiento favorable del sistema y una buena calidad del aire interior.

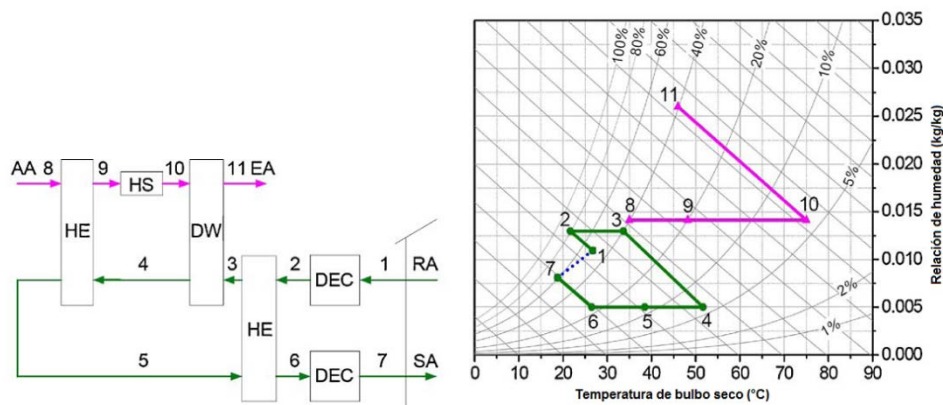


Fig. 11. Ciclo Dunkle.

En vista de esto, Maclaine-cross (Maclaine-cross, 1974) propusieron un ciclo simplificado avanzado con desecante sólido, nombrado, ciclo SENS. La fig. 12 (a) ilustra el diagrama esquemático del ciclo SENS. Como se ve, el aire ambiente es primero deshumidificado en un DW. A continuación, el aire es enfriado sensiblemente en dos HEs en tándem. Después, se mezcla con cierta

cantidad de aire de retorno y se enfría adicionalmente en un serpentín de enfriamiento (CC) mediante el intercambio de calor con agua fría de una torre de enfriamiento (CT). Entonces la corriente de aire se divide en dos partes. Mientras una parte es redirigida a la CT y sacada después de intercambiar calor con el aire de proceso en un HE, la otra parte se suministra al espacio acondicionado. En el lado de regeneración, el aire ambiente se calienta previamente en un HE. A continuación se calienta con HS, que pasa por el DW y mandado fuera hacia el exterior.

El modelado matemático predijo que el ciclo SENS puede alcanzar un COP térmico por encima de 2.0. Por otra parte, las pruebas en el Laboratorio de Aplicaciones de Energía Solar de la Universidad Estatal de Colorado (Waugaman DG, 1993) demostraron que el COP térmico de este ciclo era de 2.45 en condiciones ambientales de 26°C y 26%HR. Sin embargo, este ciclo está bloqueado por su complejidad. El ciclo REVERS (Maclaine-cross, 1974) es una versión simplificada del ciclo SENS con el único cambio de la eliminación de un HE, tal como se muestra en la figura. 12 (b).

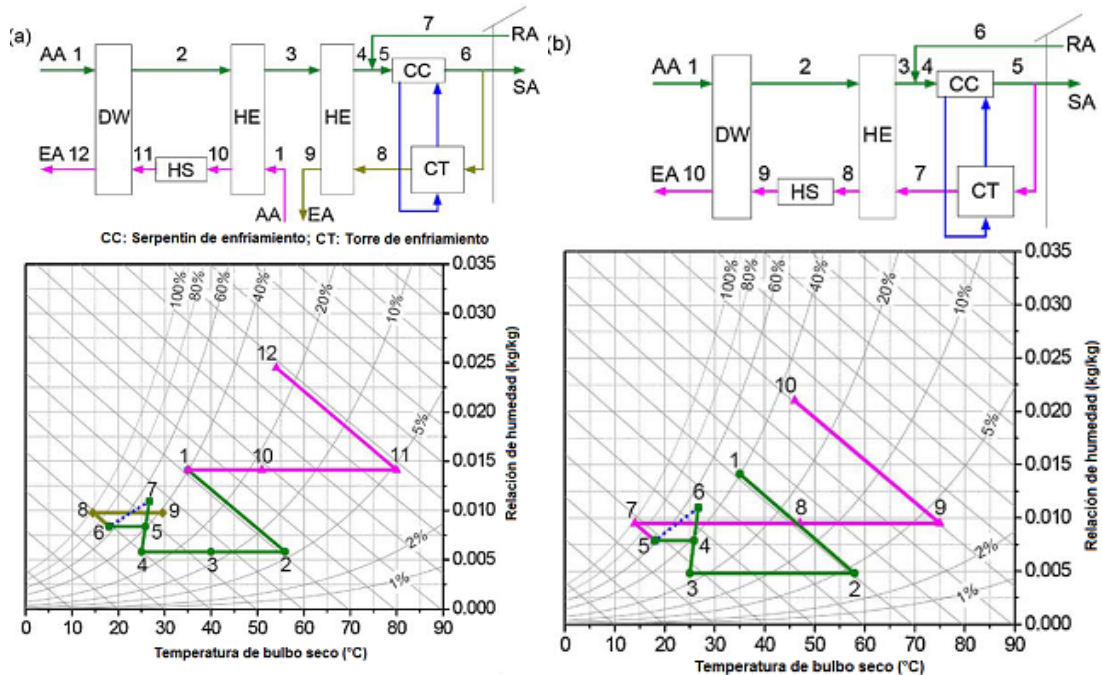


Fig. 12. (a) Ciclo SENS y (b) Ciclo REVERS.

La fig. 13 representa el ciclo con enfriador evaporativo directo-indirecto (DINC) propuesto por investigadores de Texas de la universidad A & M (Waugaman DG, 1993). A diferencia del ciclo REVERS, el CC y CT son reemplazados por un enfriador evaporativo indirecto (IEC) y un DEC. Este cambio simplifica la configuración del sistema. Además, sólo un IEC se añade en comparación con el ciclo de ventilación modificado. Como Waugaman (Waugaman

DG, 1993) predijo, el COP térmico del ciclo DINC podría ser más de 1.6 en condiciones ARI.

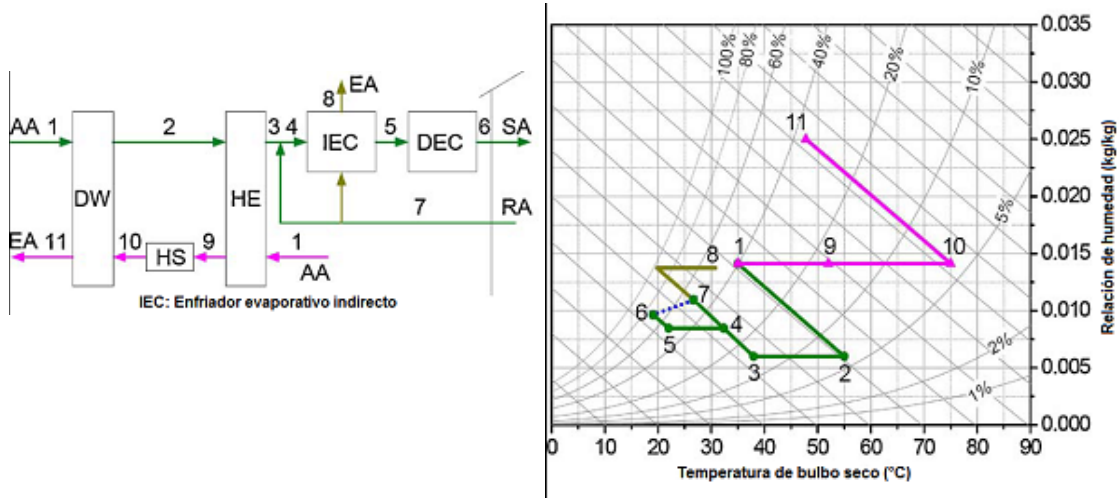


Fig. 13. Ciclo DINC.

### 2.3.1. Regeneración por etapas

Para mejorar el rendimiento térmico de los sistemas de aire acondicionado con desecante rotativo, se ha reintroducido la regeneración por etapas para la regeneración del desecante, que fue propuesta y patentada por Glav en 1966 (Glav, 1966). Como se ilustra en la fig. 14, después de ser precalentado en el HE (desde el punto de estado 6-7), sólo una fracción del aire de regeneración se calienta mediante el HS (desde el punto de estado 7-8), mientras que la mayor parte del aire de regeneración se introduce directamente en el área de pre-regeneración. Obviamente, el proceso de regeneración incluye dos etapas, a saber, primera etapa de regeneración en el lado de pre-regeneración con relativa baja temperatura y sin calentamiento adicional, y la segunda etapa de regeneración en el lado de regeneración con la temperatura elevada deseada proporcionada por un HS adicional. Básicamente, el desecante es primero precalentado y pre-regenerado con calor de baja temperatura, y luego se regenera con una mayor cantidad mucho más pequeña de calor a alta temperatura.

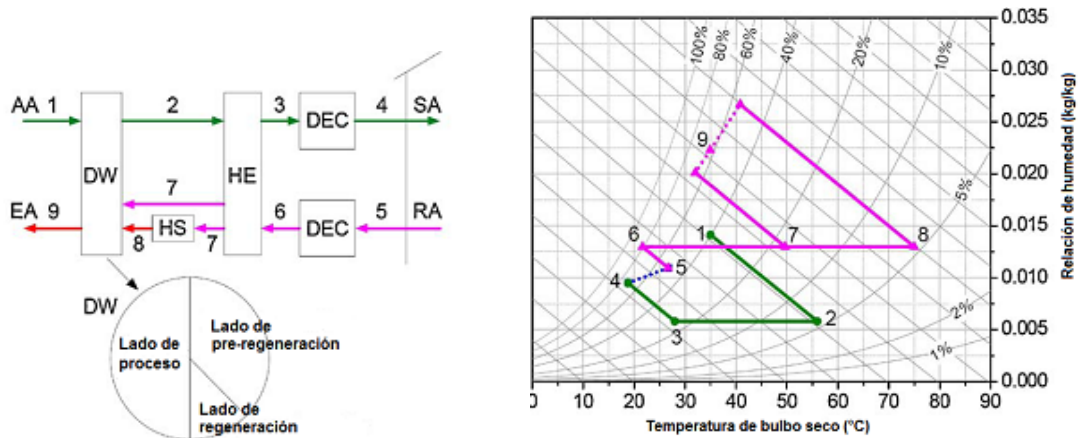


Fig. 14. Ciclo de regeneración por etapas.

Collier y Cohen (Collier RK, 1986) compararon el efecto de la regeneración por etapas en mejorar el COP térmico de los sistemas desecantes contra la adición de capacidad de inerte de calor a la matriz desecante. Se encontró que, aunque ambos incrementan su COP térmico por sacrificar la capacidad de enfriamiento, la regeneración por etapas combinada con una baja capacidad térmica era superior a la adición de la capacidad de calor inerte a la matriz de desecante para elevar el rendimiento del sistema. Como se sugiere por los autores, el mejor rendimiento del sistema se obtendría mediante la división de los procesos de regeneración y reducir al mínimo la cantidad de capacidad de calor inerte. Worek et al (Worek WM, 1991) han informado de que un alto rendimiento de un ciclo de ventilación se podría lograr mediante el uso de material de Tipo 1M regenerado a 165°C, con una fracción de regeneración por etapas de 16%. Por otra parte, la regeneración por etapas es ventajosa no sólo en la reducción del tamaño del HE, y por lo tanto la reducción de tamaño y coste del sistema, sino también reducir el requisito de eficacia de HE sin pérdida adicional en el rendimiento.

### 2.3.2. Deshumidificación isotérmica

Debido al efecto del calor de adsorción liberado durante el proceso de deshumidificación, la temperatura del aire de proceso se incrementa y su humedad relativa disminuye. Como resultado, la diferencia de presión de vapor, que en realidad es la fuerza impulsora para la deshumidificación, se reduce, y la capacidad de deshumidificación correspondiente se limita entonces. Debido a esto, una temperatura de regeneración mucho más alta es necesaria para obtener la capacidad de deshumidificación deseada, especialmente para climas húmedos.

Para combatir este problema, la deshumidificación isotérmica es de gran importancia, ya que puede minimizar la irreversibilidad de la deshumidificación y enfriamiento del aire de proceso suficientemente (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ., 2008). La idea básica es la siguiente: cuando el aire fluye alternativamente sobre ruedas desecantes infinitas e inter-enfriadas, su proceso termodinámico estaría cerca de ser isotérmico.

La figura. 15 muestra psicrométricamente el proceso de tratamiento de aire de un sistema ideal de múltiples etapas en comparación con un sistema de una sola etapa. Con otras condiciones sin cambios, la temperatura de regeneración de un sistema de enfriamiento con desecante ideal infinito de etapas múltiples sería el mínimo y el consumo de calor de regeneración se reduce a través de la adopción de inter-enfriadores. De este modo, tanto el rendimiento térmico como la aplicabilidad se podrían mejorar significativamente.

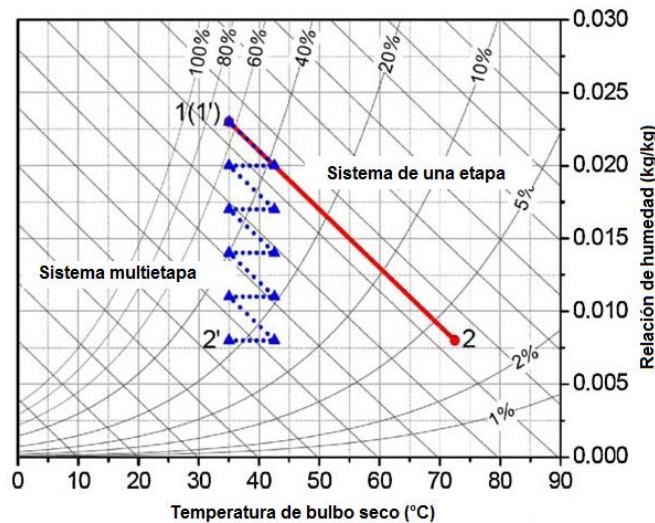


Fig. 15. Comparación entre el sistema de una etapa y el de múltiples etapas en la carta psicrométrica.

Meckler (Meckler, 1989) ha propuesto un sistema de acondicionamiento de aire con desecante sólido de dos fases integrándolo con un sistema de HVAC. Un intercambiador de entalpía se emplea para pre-enfriar y pre-deshumidificar el aire de proceso mediante el intercambio de calor sensible y latente con aire de retorno desde el espacio acondicionado, sin adición de calor externo o regeneración. Después, la rueda desecante convencional se utiliza para deshumidificar el aire aún más con calor externo. Como se informó, 30-50% de la tarea de deshumidificación puede ser realizada por el intercambiador de entalpía. Este tipo de sistema de dos etapas también se ha introducido por Henning (Henning HM, 2001). En la unidad, dos ruedas desecantes, dos intercambiadores de calor de tubo, dos calentadores directos de gas, dos ruedas de recuperación de calor y dos enfriadores evaporativos están dispuestos alternativamente. Las corrientes de aire de regeneración se enfrían primero en los enfriadores por evaporación y, a

continuación pasan a través de las ruedas de recuperación de calor para adsorber el calor transferido desde el aire de proceso. Detrás de las ruedas de recuperación de calor, las corrientes de aire se calientan por los intercambiadores de calor de tipo tubo, que transfieren el calor del aire de regeneración que sale de las ruedas desecantes, y los calentadores de gas de fuego directo en tándem. Las corrientes de aire caliente a continuación pasan a través de las ruedas desecantes y reactivan el desecante.

Bajo las condiciones de diseño, el COP térmico de este sistema de dos etapas fue de 0.89. Se demostró que el uso anual de energía eléctrica y el costo de la energía por la unidad desecante eran 60% y 40% menores que la de la unidad de VAC, respectivamente. Además, Zhang y Niu (Zhang H, 1999) han discutido el uso de bajas temperaturas de regeneración en un sistema de enfriamiento por desecante de dos etapas. Los resultados de la simulación muestran que una temperatura más baja de regeneración se requiere que para un sistema desecante de una etapa de enfriamiento.

Últimamente, investigadores de la Shanghai Jiao Tong University (SJTU) (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ., 2008) han desarrollado de manera sucesiva dos sistemas de dos etapas, nombrados; sistema de enfriamiento rotativo con desecante giratorio de dos etapas (TSDC) utilizando dos ruedas desecantes y un rotor de dos etapas con enfriamiento rotativo desecante (OTSDC) basado en una rueda, tal como se representa en las Figs. 16 y 17. La principal diferencia radica en la división de la sección transversal de la rueda. Como se ve en la fig. 18, mientras que la sección transversal del sistema TSDC es la misma que la rueda desecante convencional con proceso de deshumidificación de una etapa.

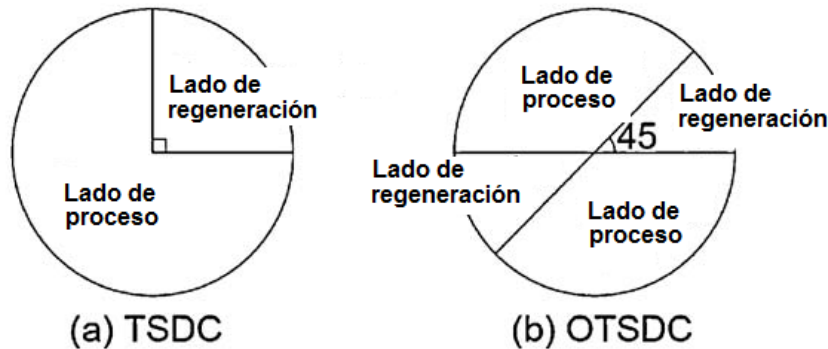


Fig. 16. Esquema de las secciones transversales de los sistemas (a) TSDC y (b) OTSDC.

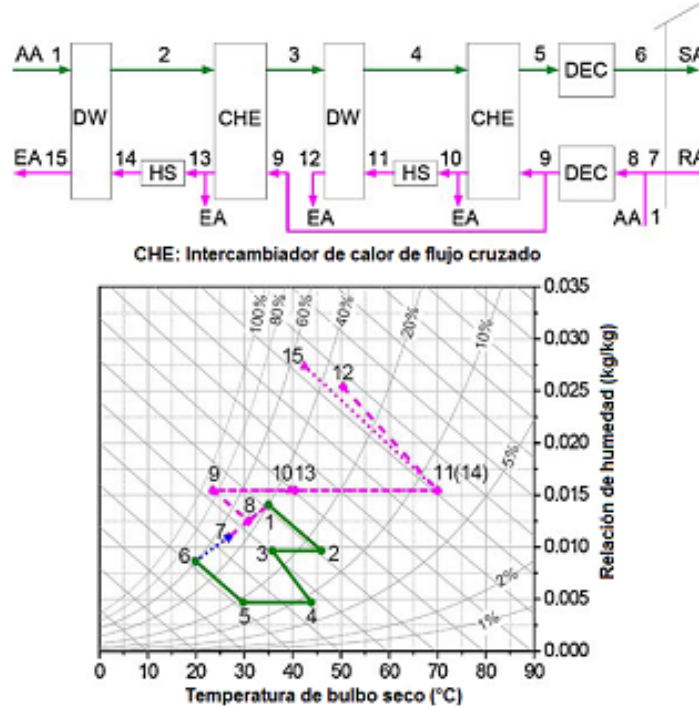


Fig. 17. Sistema de enfriamiento con desecante de dos etapas.

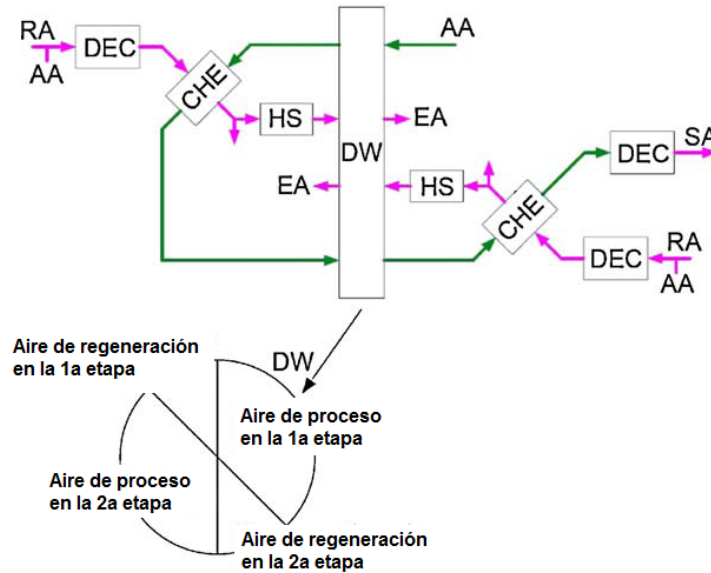


Fig. 18. Sistema de enfriamiento con desecante de un rotor y dos etapas.

La sección transversal se divide en dos partes: una para el aire de proceso y el otro para el aire de regeneración, la sección cruzada del sistema OTSDC se divide en cuatro partes: dos para el aire de proceso y dos para el aire de regeneración. Se han utilizado nuevos compuestos desecantes que se han desarrollado basados en gel de sílice-cloruro de litio, con mejor capacidad de remover humedad y menores requerimientos de temperatura de regeneración.

Además, enfriadores internos han sido incorporados para lograr una mejora adicional en el rendimiento del sistema. Se ha encontrado que los dos sistemas pueden ser accionados por fuentes de calor por encima de 50°C y lograr un COP térmico favorable arriba de 1.0. Como se informó por Ge et al (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ., 2008), para el sistema TSDC, la temperatura requerida para alcanzar una eliminación de la humedad de aproximadamente 6 g/kg disminuyó de 100°C a 70° C en comparación con los sistemas convencionales de una sola etapa de sistema bajo condiciones de verano ARI. Además, el tamaño del sistema OTSDC se ha reducido aproximadamente a la mitad en comparación con el sistema anterior TSDC, lo cual sería de gran beneficio para la promoción del sistema de acondicionamiento de aire con desecante giratorio en edificios residenciales.

### **2.3.3. Sistemas Híbridos de aire acondicionado con desecantes**

Los sistemas desecantes de refrigeración descritos anteriormente manejan la carga de calor sensible a través de un exceso de secado del aire de proceso para permitir su enfriamiento adicional por enfriamiento evaporativo directo o indirecto.

En el caso de climas cálidos y húmedos, la capacidad de enfriamiento de estos sistemas debería ser limitado debido a que la posible deshumidificación no puede ser lo suficientemente alta como para permitir el enfriamiento por evaporación del aire de alimentación. Para la salida de aire de suministro cualificada, otras tecnologías de aire acondicionado, como la unidad tradicional VAC y la máquina de refrigeración por absorción, deben ser incorporadas para constituir el sistema híbrido.

La fig. 19 ilustra un típico sistema híbrido de acondicionamiento aire con desecante esquemáticamente y psicométricamente (S. K. Li Y, Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ., 2006). Como puede verse, la carga de calor latente y la carga de calor sensible se eliminan mediante la rueda desecante y el evaporador, respectivamente. En el lado de la regeneración, la corriente de aire es calentada previamente a través de la recuperación de calor del condensador antes de ser calentada por la fuente de calor.

Las ventajas de esta combinación son las siguientes: (1) mejora de la calidad del aire interior para el control independiente de la relación de temperatura y humedad, (2) temperatura más baja que la de la regeneración del sistema desecante debido a la menor humedad se requiere para ser eliminado por la rueda desecante, (3) la conservación global de energía sustancial desde el condensador proporciona la mayor parte del calor de regeneración, (4) por unidad de tamaño VAC para el manejo de carga de sólo calor sensible, (5) mejorar el rendimiento de la unidad VAC debido a la operación a la temperatura de evaporación superior.



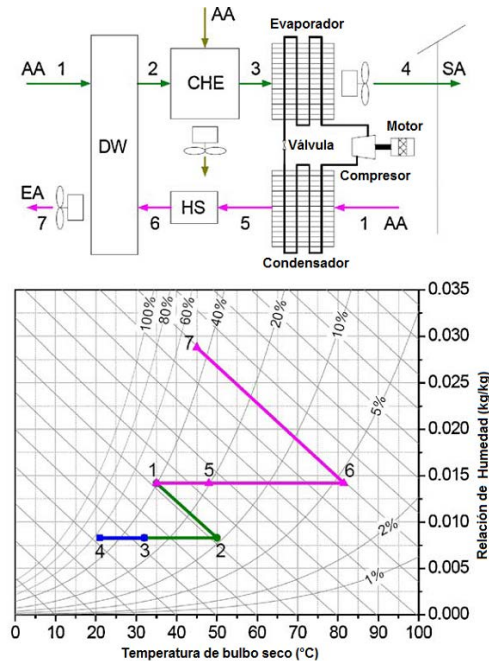


Fig. 19. Sistema híbrido de enfriamiento con desecante (S. K. Li Y, Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ., 2006).

Muchas investigaciones teóricas sobre el sistema híbrido de acondicionamiento de aire con desecante se han llevado a cabo (Waugaman DG, 1993). Las actividades de investigación son principalmente acerca de Desecantes híbridos y unidades VAC. La mayoría de los actuales trabajos de investigación y desarrollo sobre sistemas desecantes híbridos son de este tipo. Burns et al (Burns PR, 1985) han estudiado el rendimiento de tres posibles configuraciones de sistema híbrido en aplicaciones de supermercados y han comparado sus resultados con el sistema tradicional VAC sobre la base del concepto de consumo de energía ponderado, con una unidad de energía eléctrica ponderado doble que la de la energía térmica. Como se informó, se podría lograr un ahorro de aire acondicionado total que va de 56.5% al 66%, por las condiciones de diseño especificados (condiciones ambientales: 30°C, 16 g/kg; las condiciones del interior: 24°C, 10.4 g/kg; relación de calor sensible: 0.35).

Además, Dhar y Singh (Dhar PL, 2001) han evaluado el rendimiento de cuatro ciclos híbridos, que incluyen un nuevo ciclo de propuesto a los ciclos propuestos por Burns et al. (Burns PR, 1985), para las condiciones típicas del clima caluroso y seco y caliente-húmedo, utilizando el método de la analogía de Maclaine-Cross (Maclaine-cross, 1974). Los efectos del factor de calor de la habitación sensible, relación de ventilación por mezcla, y la temperatura de regeneración se han estudiado. Se encontró que sistemas híbridos de aire acondicionado basados en desecante sólido dieron considerables ahorros de energía en comparación con los convencionales de compresión de vapor de refrigeración basados en sistemas de aire acondicionado en las situaciones más comunes.

Además, Sheridan y Mitchell (Sheridan JC, 1985) han analizado el rendimiento de un sistema híbrido de refrigeración desecante para climas cálido-húmedos y calientes en seco. Los resultados mostraron que los ahorros de energía varían de 20% a 40% en aplicaciones de alta carga de calor sensible y el sistema híbrido ahorró más energía en un clima caliente seco que el que en un clima cálido-húmedo, en el que incluso podrían usar más energía de la que un sistema convencional.

Maclaine-Cross (Maclaine-cross, 1974) ha investigado la viabilidad de los sistemas híbridos de refrigeración a gas con desecantes para proyectos generales de aire acondicionado para aplicaciones medianas y grandes. La unidad desecante, que consta de un deshumidificador regenerativo, intercambiador de calor, enfriador evaporativo, serpentín de calefacción y ventiladores, maneja el aire fresco latente, y parte de la carga de calor sensible. La carga de calor sensible restante se elimina mediante un motor de gas impulsado planta VAC. Los resultados del análisis sugieren que la mitad de los costos de la energía se podría ahorrar para las condiciones australianas, si el calor residual se recuperó para disparar la unidad desecante.

Worek (Worek WM, 1991) han modelado el rendimiento de un sistema VAC híbrido integrado con desecante. El calor residual rechazado de un ciclo de VAC se utiliza para activar un ciclo de deshumidificación con desecante sólido directamente. La sensibilidad de rendimiento de un sistema híbrido de primera generación prototipo VAC a las variables condiciones al aire libre se ha estudiado y se comparó con el rendimiento de los sistemas convencionales de VAC. Los resultados mostraron que la mejora en el rendimiento sobre los sistemas VAC podría ser 60% en el mismo nivel de deshumidificación en condiciones de verano ARI.

Capozzoli et al (Capozzoli A, 2006) presentaron un estudio de caso de la comparación de un sistema de climatización tradicional a los sistemas híbridos con deshumidificación química para aplicaciones de supermercados. Utiliza los códigos de simulación dinámica (DOE y DesiCalc™) y los datos anuales de prueba de referencia (TRY). Sobre la base de los costos de operación anuales estimados, los ahorros grandes eran obtenidos con sistemas híbridos. Además, la reducción considerable de la demanda de energía eléctrica y un mejor control de las condiciones higrométricas térmica-se observaron. Esto dio como resultado una recuperación simple de aproximadamente 1 año. Por otra parte, una operación de reconversión virtual en el 30% de los actuales sistemas de climatización en los supermercados italianos mostró un importante ahorro de costos operativos.

Elsayed et al (Elsayed SS, 2006) han evaluado y examinado la viabilidad y el rendimiento de un enfriador por ciclo de aire que maneja un sistema de aire acondicionado con desecante integrado. Los resultados indicaron que el rendimiento del sistema, que aumentó con la proporción de aire exterior, depende altamente de la relación de la cantidad de aire exterior hacia el suministro de aire.

También se sugirió que el sistema tenía un potencial para convertirse en una buena alternativa para el sistema convencional VAC con carga ambiental baja, especialmente para las aplicaciones necesitan alta proporción de aire exterior y un control preciso de humedad.

Más aún, Mazzei et al (Mazzei P, 2005) han revisado el control de la humedad en los edificios. Varias configuraciones posibles AHU fueron examinadas y también fueron analizados los sistemas de HVAC para un teatro y un supermercado. En comparación con el sistema VAC tradicional, las siguientes ventajas de los sistemas híbridos se han resumido: un notable ahorro en los costos de operación y los altos costos de las plantas (un tiempo simple de amortización de 2-3 años para un supermercado), la reducción notable de la demanda de energía eléctrica y un mejor control de la humedad ambiental.

Ghali (Ghali, 2008) ha simulado el comportamiento transitorio de un sistema híbrido desecante VAC para las condiciones ambientales de Beirut. El consumo anual de energía de la comparación del sistema híbrido con el sistema VAC convencional se ha estudiado para la estación de enfriamiento. Se logró un periodo de amortización inferior a cinco años. Turner et al (Turner RH, 1988) han llevado a cabo algunas investigaciones sobre sistemas de bomba de calor de la rueda desecante accionados por motor de combustión interna. Parte de la energía de regeneración es suministrada por el calor de escape del motor. Los resultados previstos mostraron que tanto potencial favorable de ahorro de energía se podría lograr en comparación con la bomba en varios climas diferentes de Estados Unidos.

### **2.3.3.1. Desecante híbrido y máquina de absorción**

Debido a que ambas tecnologías integradas están térmicamente activadas, el sistema híbrido puede funcionar con sólo una pequeña cantidad de consumo de energía eléctrica. Además, esta integración es adecuada para uso en cascada de energía, ya que los sistemas de absorción por lo general deben ser conducidos con calor la temperatura más alta (un solo efecto: 80-100°C, COP térmico 0.7; doble efecto: 140-160°C, COP térmico 1.1-1.2 (Henning HM, 2001)) que el de los sistemas desecantes (50-80°C, COP térmico por encima de 1.0) y el calor de escape de los sistemas de absorción puede ser reutilizado por los sistemas desecantes. Por lo tanto, mucha más energía puede ser ahorrada. Sin embargo, el requisito de temperatura de fuente de calor también se incrementará, por lo que el rendimiento de los sistemas de absorción puede ser asegurada.

Schinner y Radermacher (Schinner EN, 1999) han combinado un sistema desecante de aire con un sistema de absorción de una etapa de amoníaco-agua para desarrollar un sistema de triple efecto. Es ventajoso en el uso de los

componentes de la plataforma. Cuatro casos se han analizado para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del sistema de desecante/absorción. Se predijo que el uso más eficiente del sistema daría lugar utilizando aire exterior como aire de proceso y de aire de retorno para la regeneración. Para asegurar una operación cerca de su eficiencia óptima, el sistema combinado necesita ser integrado con el sistema de control del sistema general de HVAC.

### **2.3.3.2. Desecante híbrido y máquina de adsorción**

Al igual que los sistemas de absorción, los sistemas de adsorción son también impulsados por la energía térmica. Sin embargo, el grado de temperatura requerida es mucho menor (60-85°C, COP térmico 0.3-0.5). Dai et al (Dai YJ, 2002) han propuesto un sistema híbrido de refrigeración solar para refrigeración de granos. En este sistema, una rueda desecante giratorio se utiliza para la deshumidificación, mientras que un colector solar de adsorción actúa como una unidad de adsorción y un colector solar. El diseño especial, con el colector solar de adsorción colocado en el techo del almacén de grano, reduce la carga de calentamiento de la luz solar en un grado mayor. Resultados de los análisis demostraron que el nuevo sistema híbrido obtenido mejores resultados que el sistema de refrigeración de adsorción sólido solo. En condiciones típicas, la COP térmica del sistema estaba por encima de 0.4 y la temperatura de salida estaba por debajo de 20°C.

### **2.3.3.3. Desecante híbrido y techos fríos**

Este método utiliza las ventajas de los techos fríos, tales como una menor diferencia de temperatura interior y la temperatura de evaporación más alta en comparación con el tradicional sistema de climatización, que conducen a un entorno interior más cómodo y un mejor rendimiento del sistema. Además, el sistema desecante integrado puede satisfacer la carga de calor latente de espacio acondicionado y prevenir al techo frío de condensación en la superficie.

Zhang y Niu (Zhang H, 1999) han realizado una serie de investigaciones sobre el sistema de techos refrigerados basado en el acondicionamiento de aire desecante híbrido. Los resultados indicaron que un techo enfriado combinado con enfriamiento desecante baja de manera significativa la cantidad de consumo de energía primaria, en comparación con un sistema convencional todo aire de volumen. Además, la mayoría de las horas anuales de operación de regeneración del desecante se podrían lograr por el calor de baja calidad de menos de 80°C con

el nuevo ciclo. Se encontró que la deshumidificación y ventilación antes de la operación de los paneles de refrigeración se requiere para reducir los riesgos de condensación en climas cálidos y húmedos, y 1h en avance de deshumidificación/ ventilación en verano podría eliminar por completo los problemas de condensación. Además, también han reportado algunas investigaciones experimentales (S. K. Li Y, Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ., 2006).

Subramanyam et al (Subramanyam N, 2004) estudiaron un aire acondicionado para el acondicionamiento de aire de baja humedad integrado con una rueda desecante. Funciona de manera similar al modo de recirculación, con el aire de retorno que pasa a través de la sección de regeneración, evaporador y la sección de deshumidificación en tándem. Mientras que la rueda desecante deshumidifica y calienta el aire de suministro, la regeneración del desecante se logra por el aire de retorno, que se enfría y humidifica, sin fuente adicional de calor. En comparación con el sistema convencional de recalentamiento, el sistema entrega aire a una temperatura mucho más baja que la del punto de rocío con una penalización marginal en COP. Se sugirió que existía una velocidad de la rueda óptima de aproximadamente 17.5 rph en el que tanto la capacidad de eliminación de la humedad como el COP fueron máximos.

Li et al (S. K. Li Y, Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ., 2006) han estudiado experimentalmente un sistema de aire acondicionado híbrido y deshumidificación por desecante, el cual adoptó una rueda desecante de LiCl, en rangos típicos operativos para aplicaciones de aire acondicionado, sobre todo para regiones húmedas como Hong Kong. Los resultados experimentales mostraron que el calor latente se eliminó por la rueda desecante, mientras que el calor sensible se manejó eficazmente por un enfriador evaporativo indirecto y acondicionador de aire convencional. La temperatura de regeneración así como la tasa de flujo de aire de proceso tenía un papel significativo en el rendimiento del sistema. Además, el sistema híbrido logró un rendimiento de carga parcial superior, y por lo tanto asegura el funcionamiento eficaz durante todo el año en las regiones húmedas calientes.

Jia et al (Jia CX, 2006) han llevado a cabo experimentos en un sistema híbrido de acondicionamiento de aire con desecante. Se encontró que, 37.5% de la potencias eléctrica se economiza en comparación con el sistema convencional de VAC en condiciones de entrada de 30°C y 55% de humedad relativa. Estableciendo los modelos termodinámicos del sistema híbrido con desecante y R-22 como refrigerante, el impacto de los parámetros de funcionamiento de la relación de calor sensible del evaporador y la tasa de ahorro de energía eléctrica han sido analizados. Como se informó, la mayoría de los evaporadores podrían operar en la condición seca, incluso si la temperatura de regeneración fue menor (es decir, 80 °C).

Khalid et al (Khalid A, 2009) han realizado estudios de simulación y experimentos en un sistema híbrido de enfriamiento para aplicaciones de aire

acondicionado en Pakistán asistido por energía solar. Un sistema de refrigeración híbrido con desecante previamente enfriado ha sido construido para llevar a cabo las pruebas y validar un modelo del mismo en TRNSYS para simular su rendimiento solar. Resultados de la simulación demuestran que mejor COP podría lograrse usando enfriador evaporativo indirecto para enfriador evaporativo de pre-enfriamiento y directo para post-refrigeración de aire. Basado en el ciclo de vida y las evaluaciones económicas de colector solar de aire, los períodos de amortización de la energía y del medio ambiente resultaron ser 1 y 1.5 años, respectivamente

#### **2.3.4. Sistema de lecho fijo.**

El sistema de enfriamiento con desecante tipo lecho fijo sólido es otro tipo de sistema. Se han realizado estudios sobre este sistema. La ventaja del sistema de lecho fijo es que el proceso de sorción se puede hacer de forma isotérmica. Esto significa que la temperatura del aire después de pasar por el material desecante no se incrementa. Por lo tanto, el proceso de sorción se incrementa debido a la eliminación de calor de sorción.

Yuan et al (Yuan W, 2008) propusieron un deshumidificador compacto con desecante sólido de flujo cruzado. El objetivo del diseño es hacer el proceso de deshumidificación más fresco debido al intercambio de calor entre el aire deshumidificado y el aire secundario. Se muestra en el resultado que el rendimiento del diseño es mejor que sin enfriamiento secundario.

Worek (Worek WM, 1991) investigó el ciclo abierto de cama fría enfriada usando el sistema de enfriamiento con desecante para deshumidificar la cama fría. Se muestra que el rendimiento del sistema es más sensible a la temperatura interior y de regeneración así como a la relación de humedad al aire libre que a la relación de la humedad interior y la temperatura exterior. Esto demuestra que el sistema de lecho frío puede ser regenerado a una temperatura tan baja como 50 °C. La fig. 20 muestra la cama fija de flujo cruzado con enfriador de aire deshumidificado. Henning (H. Henning, 2007) muestra la aplicación de un lecho fijo en operación cíclica llamado intercambiador de calor deportivo con enfriamiento evaporativo (ECOS).

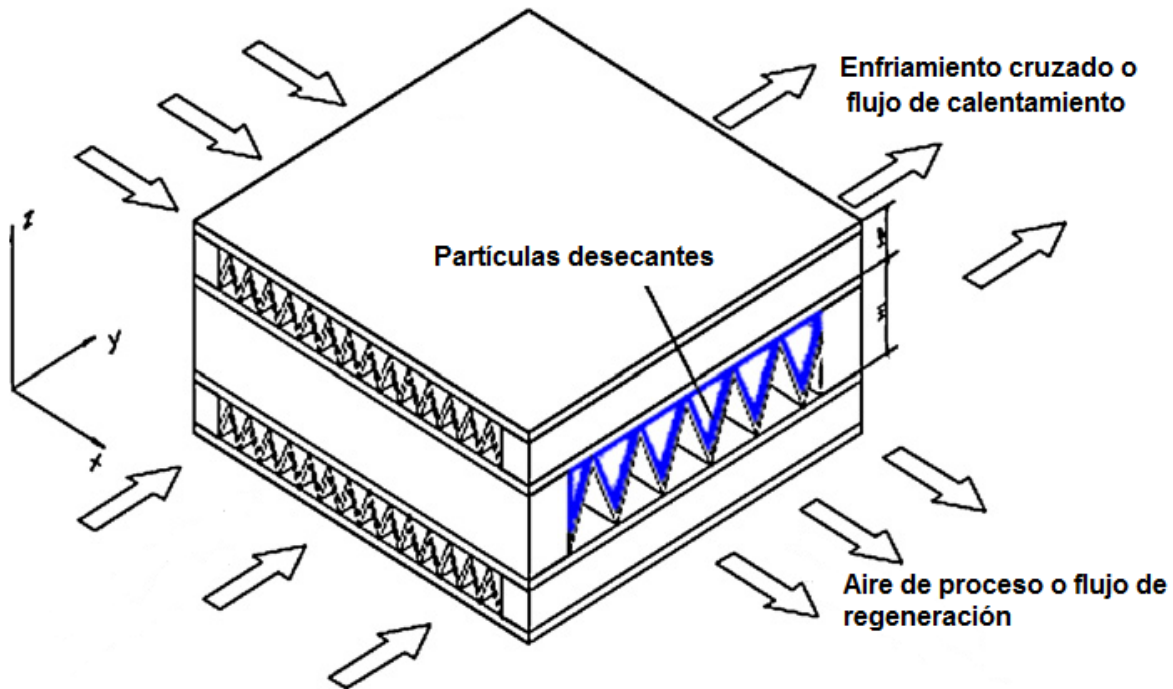


Fig. 20. Deshumidificador compacto de enfriamiento cruzado recubierto con desecante.

### 2.3.5. Tipos modificados

En la mayoría de los diseños, el funcionamiento del sistema de enfriamiento con desecante sólido es a través de procesos de humidificación y deshumidificación. Con tales procesos, el aire es llevado a un muy bajo contenido de humedad para aplicaciones de enfriamiento evaporativo. Por ello, la temperatura de regeneración requerida debe ser incrementada. El proceso de deshumidificación constante es otra opción para evitar la deshumidificación profunda que podría ser aplicable para climas calientes y húmedos. Enteria et al (Y. H. Enteria N, Satake A, Mochida A, Takaki R, Yonekura H, et al., 2011) presentaron el ciclo de enfriamiento de aire con desecante a humedad constante, como se muestra en la fig. 21.

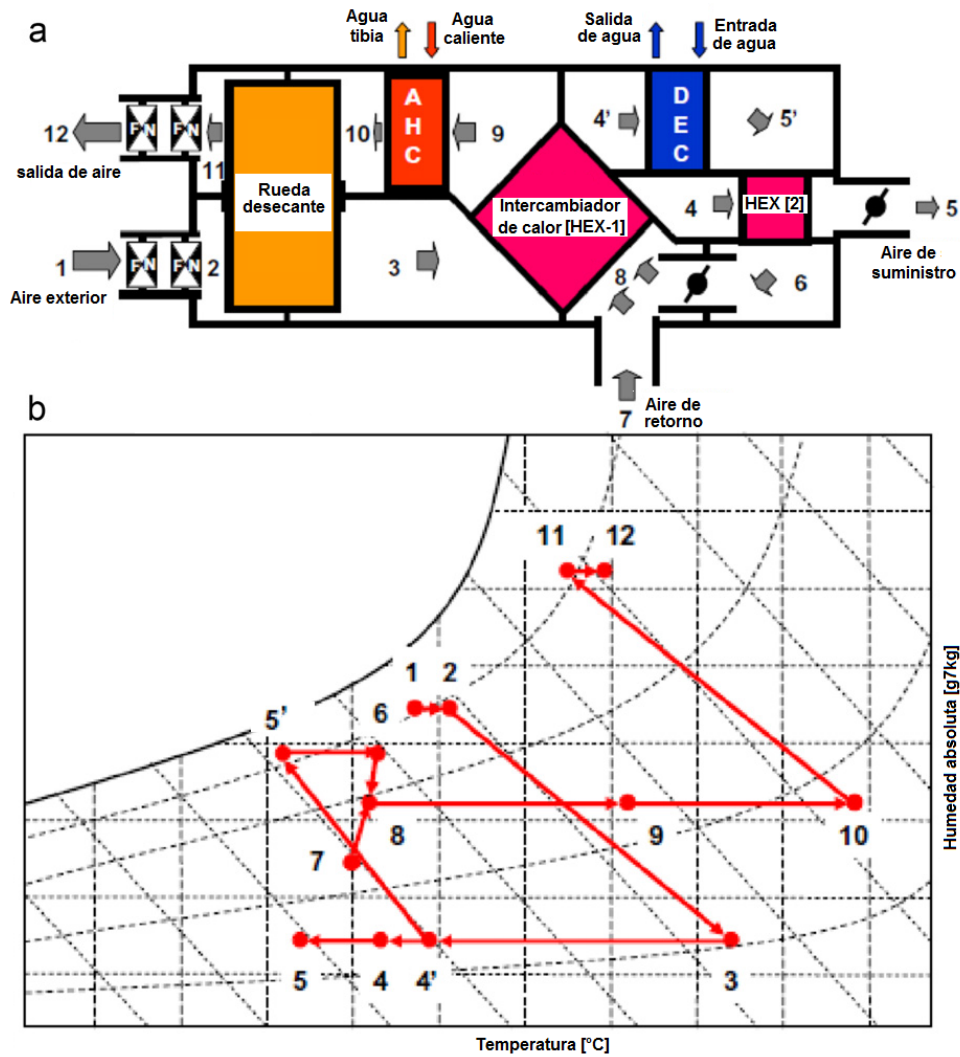


Fig. 21. Sistema de enfriamiento con desecante con humedad constante del aire (Y. H. Enteria N, Satake A, Mochida A, Takaki R, Yonekura H, et al., 2011)

Ando et al (Ando K, 2005) muestran el proceso de deshumidificación de doble etapa. En este proceso de deshumidificación de doble etapa, se emplean dos ruedas desecantes (Fig. 22). El propósito principal de la deshumidificación de doble etapa es reducir el contenido de humedad del aire en el caso de aire húmedo con bajos requisitos de regeneración de temperatura.



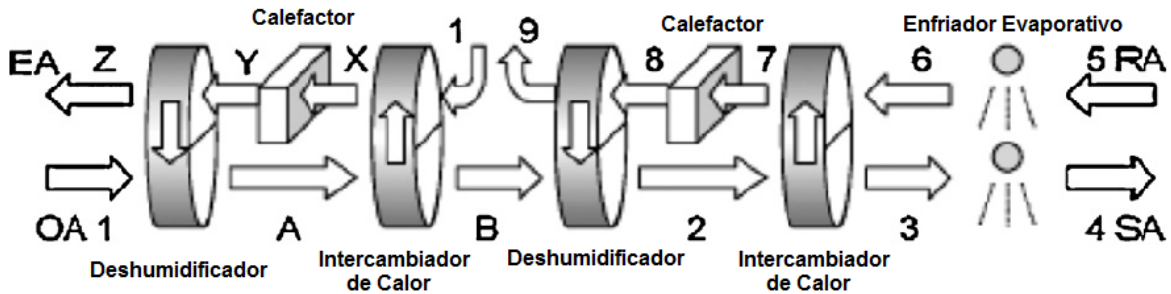


Fig. 22. Sistema de enfriamiento y deshumidificación con desecante de doble etapa (Ando K, 2005).

Ge et al (L. Y. Ge TS, Wang RZ, Dai YJ. , 2009) investigaron el sistema de enfriamiento con desecante de doble etapa. Ellos muestran que los requerimientos de temperatura de regeneración son menores con un COP más alto. Kodama et al (Kodama A, 2005) muestran una rueda desecante multipaso en la figura 24. Ello muestra que una temperatura de regeneración de 50°C es suficiente para la rueda de secante. Aun más Kodama et al (Kodama A, 2005) presentaron varios diseños del sistema de enfriamiento con desecante para climas húmedos. Ellos muestran que ruedas de cuatro ciclos (2 para secado y 2 para regeneración) pueden ser usadas para todas las condiciones climáticas. Además, la rueda de tres ciclos (1 desecante, 1 regeneración y 1 intercambio de calor) es mejor que la rueda de 4 ciclos.

### 2.3.6. Aplicación y evaluación.

El mercado de la industria de la deshumidificación desecante rotatorio ha sido bien desarrollado desde la década de 1980 (Wurm J, 2002). Correspondientes sistemas de acondicionamiento de aire con desecante rotatorio también han experimentado un aumento agresivo en la aplicación comercial durante varias décadas. Con más de medio siglo en I+D en deshumidificación desecante giratorio para el control de confort, así como el incremento de las demandas de confort de los ocupantes y el deterioro de la crisis mundial de la energía y el medio ambiente, cada vez más propietarios de edificios comerciales han estado dispuestos a invertir en equipos de deshumidificación. Por lo tanto, se pueden esperar perspectivas favorables del mercado.

Debido a que el gasto de energía más grande en un sistema desecante es el calor utilizado para la regeneración del desecante, de acuerdo con la fuente de calor, los sistemas de aire acondicionado con desecante giratorio pueden clasificarse generalmente en dos categorías en la aplicación práctica, es decir, alimentados por energía solar y accionados por otras fuentes de calor de baja calidad, tales como la calefacción urbana, el calor suministrado desde una

producción combinada de calor y electricidad (CHP), el calor residual y la bioenergía.

### 2.3.6.1 Aplicación de sistemas de aire acondicionado solares accionados por desecantes rotatorios

Puesto que la temperatura requerida para una regeneración eficiente de la rueda desecante es baja, dentro del rango de 45-90°C, el sistema de energía solar térmica, el cual es perfectamente ventajoso en la adecuación del perfil de demanda de refrigeración, se espera que proporcione una parte sustancial de la energía necesaria para el aire acondicionado. Estos han provocado un creciente interés en el acoplamiento de energía solar y aire acondicionado con desecante giratorio. Se han realizado una gran cantidad de análisis teóricos basados en investigaciones (Khalid A, 2009) y algunos proyectos piloto se han aplicado también (Henning HM, 2001).

La fig. 23 muestra un sistema de refrigeración con desecante asistido por energía solar instalado en un centro tecnológico en Riesa / Sajonia, Alemania (Russ, 2003). Una sala de conferencias de 330m<sup>3</sup> está acondicionada con un caudal de aire nominal de 2,700 m<sup>3</sup>/h. Un sistema colectores de placa plana de 20m<sup>2</sup> con un tanque de agua caliente 2m<sup>3</sup> de almacenamiento intermedio se emplea para accionar el sistema. Según las condiciones de exterior y a la carga de refrigeración/calefacción, cinco modos de operación del sistema son posibles, a saber, calefacción activo, recuperación de calor, ventilación libre, enfriamiento adiabático y enfriamiento desecante (ciclo de ventilación). Además, los ventiladores del sistema se pueden controlar para obtener caudales variables para que coincida con la carga de refrigeración.



Fig. 23. Sistema de aire acondicionado solar con desecante instalado en Riesa, Alemania (Russ, 2003).

La experiencia de funcionamiento indica que el sistema era operable con temperaturas de regeneración oscilando entre 50 y 70°C. Los resultados de las mediciones mostraron que el sistema podía alcanzar una potencia de refrigeración máxima de alrededor de 18 kW, una fracción solar para la refrigeración en el intervalo de 76% y COP térmica en el intervalo de 0.6.

Financiado por el programa Thermie de la UE, ATECNIC, un fabricante de equipos de aire acondicionado, instaló un sistema solar de aire acondicionado con desecante en Sintra, Portugal. La fig. 24 muestra el edificio acondicionado, la unidad desecante instalada y el campo de colectores. Una rueda de recuperación de calor y un humidificador tipo boquilla se emplean para pre-enfriar y humidificar el aire de proceso. Además, un humidificador que se adopta en el lado de la regeneración para humidificar el aire de retorno. Siendo alimentado por 75m<sup>2</sup> de colectores parabólicos compuestos, conectados a un tanque 3m<sup>3</sup> con intercambiador de calor de placas, la unidad de refrigeración con desecante funciona con flujo de aire variable, hasta un máximo de 9,600m<sup>3</sup>/h, con una potencia de refrigeración máxima de 75kW y una carga eléctrica máxima de 15kW.

El COP térmico de este sistema fue de 0.78 en condiciones de diseño y se espera fracciones solares para la refrigeración y calefacción de 70%. Existen, entre otros, más sistemas instalados en Italia, España, Austria, Países bajos y China.

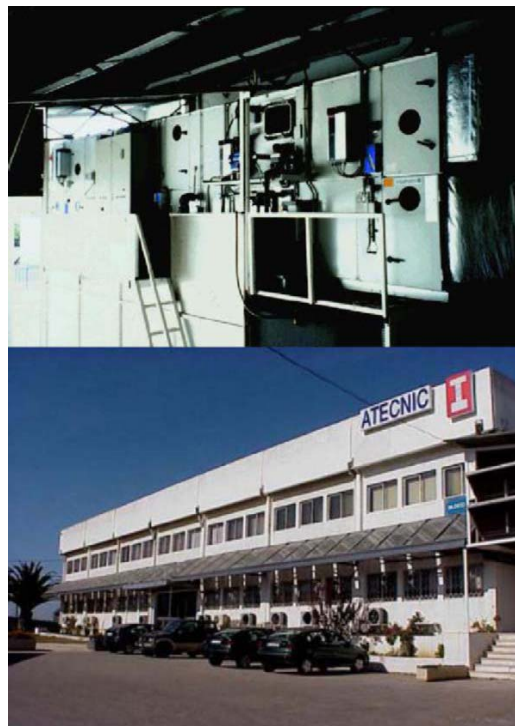


Fig. 24. Sistema de aire acondicionado solar con desecante, instalado en Sintra, Portugal (Russ, 2003).

### **2.3.6.2. Aplicación de sistemas de aire acondicionado con rueda desecante alimentados por otras fuentes de calor de baja calidad**

Como es conocido por todos, la energía solar depende en gran medida de las condiciones meteorológicas y de la posición geométrica. Incluso si el área cuenta con abundante radiación solar en tiempo nublado y lluvioso el rendimiento del colector solar sería pobre y no podría satisfacer totalmente la demanda de calor de la unidad de aire acondicionado. Por estas razones, la mayoría de los sistemas de refrigeración con desecantes instalados están acoplados con quemador de gas, calefacción de distrito o el calor de una planta de cogeneración, etc (Mazzei P, 2005).

Hasta la fecha, se han presentado extensas aplicaciones, sobre todo en lugares con alta humedad o que requieren un estricto control sobre los niveles de humedad, tales como supermercados, pistas de hielo, teatros, bodegas y cuartos de hospital en funcionamiento (Mazzei P, 2005). Entre otros, se menciona un sistema desecante de enfriamiento rotativo desarrollado por SEMCO Co., de EE.UU. (Fischer J, 2004) que incluye un serpentín de expansión directa con compresor de velocidad variable y un ventilador de impulsión accionado por inversor se integran para pre-enfriamiento del aire de proceso y controlar el caudal del aire de proceso. Este sistema se acopla con módulos de recuperación total y funciona como unidades dedicadas de aire exterior. Patrocinados por el Departamento de Energía EE.UU., cuatro de estos sistemas han sido instalados en Pepperell High School en Georgia (Fischer J, 2004). Un generador de gas natural accionado por motor es adoptado para alimentar el sistema. El calor recuperado del motor se utiliza para regenerar las ruedas desecantes durante la estación de enfriamiento y para el calentamiento del aire de suministro durante los meses de invierno. Como se informó, la calidad del aire interior se ha mejorado significativamente, los contaminantes tales como los formaldehidos se redujeron a los niveles deseados, problemas microbianos fueron eliminados, y el nivel de CO<sub>2</sub> disminuyó. Además, mediante la combinación de una eficiencia eléctrica de 33.4% con una eficiencia térmica de 37.2%, se logró una eficiencia total del sistema de 70.5%, mucho más alta que la eficiencia de 45% típica de una red de distribución comercial. Los resultados demostraron que la demanda eléctrica máxima en el lugar se redujo en más de 100kW. Además, los gastos de energía se redujeron aproximadamente en 21% para enfriamiento y 29% para calefacción. Otros sistemas han sido instalados en Australia, EEUU, Alemania y otros países de la UE, los cuales muestran resultados similares.

El sistema de enfriamiento basado en desecantes sólidos ha sido aplicado en muchas condiciones climáticas diferentes. Además se han hecho estudios de

factibilidad a través de estudios numéricos han sido hecho acerca de la aplicabilidad del sistema. White et al (White SD, 2009) realizaron investigaciones numéricas del sistema de enfriamiento con desecante y energía solar en diferentes condiciones climáticas de Australia. La investigación se centró en la aplicación directa de energía solar para la regeneración de la rueda desecante. La investigación mostró que el sistema es aplicable en el clima cálido templado de Melbourne y Sydney; sin embargo, en el clima tropical de Darwin es inaplicable debido a que el aire exterior es caliente y húmedo. Ellos mostraron que la energía solar puede soportar las condiciones de confort al usar altas tasas de ventilación.

Bourdoukan et al (Bourdoukan P, 2008) condujeron investigaciones numéricas de un sistema de enfriamiento con desecante solar usando colectores de tubos evacuados. Ellos mostraron que las áreas des los colectores varían con diferentes localizaciones debido a la carga de enfriamiento requerida. Para condiciones de alto contenido de humedad exterior, la necesidad de área de colectores solares es mayor cuando se comparan en tras localizaciones geográficas (La rochelle-Francia-13.4g/kg, Bolzano-Italia-11.4g/kg, Berlin-Alemania-9.5g/kg) más aun, el muestra que los tubos evacuados son mejores que los colectores de placa plana debido al pequeño respaldo de energía técnica requerido.

Sand y Fizsher (Fischer J, 2004) investigaron la aplicación del sistema con desecante sólido en equipo HVAC de paquete. Ellos mostraron que los módulos de secante activos suministran el aire en las condiciones requeridas a un menor costo. Henning et al (Henning HM, 2001) hicieron investigación con respecto a la aplicación de enfriamiento con desecante solar en Europa. Ellos mostraron la posibilidad de tener un sistema de refrigeración con desecante de diseño simple totalmente dependiente de la energía solar. Sin embargo las condiciones de aire interior algunas veces excedieron los niveles requeridos. El clima en el cual ese sistema es aplicable es clima templado. Además el enfriamiento con desecante solar es factible en términos económicos y energéticos con posibles ahorros de hasta 50% de energía. Mavroudaki et al (Mavroudaki P, 2002) presentaron una investigación numérica con respecto a la aplicación de un sistema de enfriamiento con desecante de un solo paso en ciudades Europeas. El resultado muestra que el sistema es aplicable en algunas partes del sur de Europa siempre y cuando la carga latente no sea alta. Esto es debido a las altas temperaturas de regeneración requeridas para aire con alta humedad relativa. Este sistema es factible en la mayor parte de Europa central. Las regiones Atlánticas y las regiones interiores del sur de Europa parecen ser mucho más adecuadas para ésta tecnología que las regiones costeras Mediterráneas.

Smith et al (Smith RR, 1994) investigaron la aplicación del sistema de enfriamiento con desecante solar de energía solar en edificios residenciales por medio de simulación del Transient System Simulation (TRNSYS). El estudio se enfocó en Pisttburgh, MA, Macon, GA, Albuquerque, NM. Se encontró que la demanda de enfriamiento de los edificios fue conseguida. Demostró que la energía

solar es adecuada en la operación del desecante en el Suroeste con 72.7 % de energía del sol. Mientras que solo fue 18% para el Sureste.

Casas y Schmitz (Casa W, 2005) investigaron la aplicación de un intercambiador de calor de pozo en el sistema de enfriamiento con desecante de un motor a gas. El sistema está instalado en el edificio de demostración. El muestra que el sistema ahorra un 70% de la energía para el desecante con el intercambiador de calor de pozo. En el caso de utilizar desecante con enfriador, se puede ahorrar hasta el 30%.

Cler (Cler, 1992) investigó la posibilidad de aplicar la deshumidificación con desecante en instalaciones militares. Mostró que es recomendable cuando se requiere capacidad adicional de enfriamiento en los sistemas HVAC existentes. También, para obtener mayores cantidades de aire exterior de reposición, el sistema basado en desecante es ideal para este tipo de aplicaciones. En construcciones nuevas, debería ser considerado equipo de deshumidificación. Esto podría reducir la demanda de energía eléctrica y enfriamiento. Además, al diseñar nuevos sistemas de enfriamiento con desecante, energía solar, cogeneración y otros deberían ser considerados en las fases iniciales de diseño. Halliday et al (Halliday SP, 2003) investigaron la posibilidad de aplicar el sistema de enfriamiento con desecante sólido solar en el Reino Unido y ellos mostraron que es posible su uso en edificios, siempre y cuando se aplique de manera adecuada en el sistema.

Henning et al (H. Henning, Pagano T, Mola S, Wiemken E., 2007) mostraron la aplicación del sistema de enfriamiento con desecante en sistemas tri-generación (energía, calefacción y enfriamiento). Se utiliza el enfriador de compresión de vapor y desecante de gel de sílice con la electricidad para impulsar el enfriador procedente de la CCHP mientras que se obtiene la regeneración de la rueda desecante del calor residual del CCHP. Se muestran ahorro de electricidad de más del 30% comparado con los sistemas convencionales de manejo de aire.

Fong et al. (Fong KF, 2010) Hicieron investigación relacionada a la aplicación de sistema de enfriamiento con desecante solar en el clima subtropical de Hong Kong. Aunque el sistema de enfriamiento con desecante típico no es eficiente en energía, él puede suministrar el suficiente aire fresco requerido al edificio resultando una buena calidad de aire interior y una ventilación efectiva.

Hao et al (Hao X, 2007) investigaron la aplicación de la deshumidificación desecante con techo enfriado y ventilación por desplazamiento. Esto demuestra que es factible de ser aplicada en el clima caliente y húmedo debido a su capacidad para responder a la demanda constante de enfriamiento. Además, se reduce el consumo energético del edificio hasta el 8.2% en comparación con el sistema convencional.

Niu et al (Niu JL, 2002) investigaron la aplicación de la deshumidificación por rueda desecante en un techo enfriado. El objetivo de la instalación desecante es reducir el contenido de humedad del aire y por lo tanto evitar la condensación de humedad en el panel del techo y al mismo tiempo enfriar el aire por medio del techo enfriado. Los resultados muestran que el sistema combinado puede ahorrar hasta el 44% del consumo de energía primaria en la que 70% del tiempo de operación de la deshumidificación desecante puede ser proporcionado por aire con un bajo grado de regeneración de menos de 80°C.

Khalid et al (Khalid A, 2009) llevaron a cabo investigación numérica con respecto a la aplicación del enfriamiento desecante solar en las condiciones climáticas de Pakistán. El mostro que el sistema tiene un mayor COP en esas condiciones climáticas sin enfriamiento auxiliar. Hirunlabh et al (Hirunlabh J, 2007) investigaron la aplicabilidad del enfriamiento con desecante sólido del tipo lecho fijo en las condiciones calientes y húmedas de Tailandia. Demuestra que se puede ahorrar el 24% de la energía eléctrica. Además, es práctico para la aplicación en grandes edificios y sistema de aire acondicionado centralizado.

Nagaya et al (Nagaya K, 2006) investigaron la aplicación de la rueda con desecante sólido en sistema de aire acondicionado de un automóvil. Se muestra que el sistema es eficiente en el consumo de energía en comparación con el sistema convencional. Uno de los problemas encontrados es el difícil control de la humedad del aire y de la temperatura debido al intercambio de calor y el flujo de refrigerante al evaporador.

Camargo et al (Camargo JR, 2005) investigaron la aplicación del sistema de enfriamiento con desecante sólido en América Latina y en ciudades tropicales y ecuatoriales. Dicho sistema se compone de la rueda desecante y enfriador evaporativo. El resultado muestra la aplicabilidad del sistema como alternativa al sistema de compresión de vapor, ya que puede proporcionar condiciones humanas de confort térmico.

Dupont et al (Dupont M, 1994) investigaron la aplicabilidad de la sílice como desecante en un sistema de enfriamiento de lecho compacto alimentado por energía solar. La investigación se llevó a cabo en el clima tropical de Guadalupe. Esto demuestra que se puede producir la energía para la refrigeración. Sin embargo, el sistema no es eficaz debido a las pérdidas.

Hamed (Hamed, 2003) investigó un lecho poroso empacado con arcilla quemada e impregnada con cloruro de calcio líquido como desecante. Demuestra que la velocidad de transferencia de masa tiene un efecto significativo sobre el gradiente de concentración en la cama. Jain et al. (Jain S, 1994) investigaron el sistema de enfriamiento con desecante sólido para climas cálidos y húmedos en 16 ciudades de la India. Muestran que el ciclo con intercambiador de calor de superficie húmeda da mayor coeficiente de rendimiento (COP) que otros ciclos. Se ha encontrado que el Ciclo Dunkle es mejor en todas las condiciones climáticas.

Una eficacia por encima de 0.8 es deseable en Intercambiadores de calor para ciclos que no utilizan intercambiadores de calor de superficie húmeda. El efecto sobre el COP del enfriador evaporativo es insignificante pero puede controlar el factor de carga sensible de la habitación. Joudi y Madhi (Joudi KA, 1987) investigaron la aplicabilidad del sistema de enfriamiento solar con desecante en Basora, Iraq. Por las condiciones climáticas locales, muestra que se puede obtener una temperatura de regeneración de 70 °C utilizando la energía solar en cielo despejado. Kabeel (Kabeel, 2007) investigó la aplicación de la rueda desecante con cloruro de calcio construida a partir de una capa de alambre de hierro y ropa. El sistema utiliza únicamente energía solar para la regeneración del desecante. El sistema se ha probado en el clima egipcio, que tiene un alto rendimiento después del mediodía solar y la eficacia de la rueda depende de la radiación solar y la tasa de flujo de aire.

En México se estudió un ciclo de Pennington abierto con regeneración solar, el cual permite tener condiciones de confort durante todo el día en una oficina de la UABC en Mexicali; el valor del COP está en un rango entre 1.5 y 2.0. Esta opción compite favorablemente con los sistemas de compresión mecánica de vapor, pero en el escenario económico actual no es rentable financieramente y la inversión inicial está fuera de las posibilidades del sector de la población de bajos recursos económicos (Gallegos OR, 2010).

## **2.4. Enfriamiento con desecante líquido.**

El sistema de enfriamiento con desecante líquido utiliza desecante líquido para el control del contenido de humedad del aire. El proceso de reducción de la humedad del aire es a través de proceso de absorción. Tras la reducción del contenido de humedad del aire, el aire se pasa de la misma manera como se hace en el sistema de enfriamiento con desecante sólido.

El diseño del sistema de enfriamiento con desecante líquido utiliza una película descendente en la membrana con aire que pasa a su superficie. Algunos diseños aplican el tipo de pulverización para aumentar la superficie de contacto aire-desecante. El diseño del deshumidificador de aire se puede hacer con proceso isotérmico haciendo pasar aire fresco / agua en la parte posterior de la película de desecante que cae. La regeneración del material desecante es por medio de calor. Por lo tanto, muchos de los diseños de los regeneradores para desecante líquido se realizan con energía solar.

El enfriamiento del aire es en la misma forma que en los sistemas de enfriamiento con desecantes sólidos. El sistema utiliza materiales líquidos desecantes en la eliminación de contenido de humedad del aire. Los materiales



más utilizados como desecantes líquidos son el cloruro de litio, bromuro de litio, cloruro de calcio y sustancias con base de glicol (Grossman G, 1981). La aplicación de estos materiales depende del costo, las operaciones, y la fuente de energía térmica. Además, algunos desecantes líquidos son corrosivos y requieren un manejo adecuado en su aplicación. Sin embargo, la principal ventaja del desecante líquido es la capacidad de eliminación de humedad alta con menores temperaturas de regeneración.

#### **2.4.1. Desarrollo y evolución**

Los sistemas de enfriamiento con desecante líquido tienen la ventaja de inferiores temperaturas de regeneración con mayor capacidad de sorción de humedad que los sistemas de enfriamiento con desecante sólido debido una mayor tasa de transferencia de humedad. Uno de los problemas principales del sistema de enfriamiento por desecante líquido es el traspaso al suministro de aire. Por lo tanto, varios estudios se han hecho sobre el tema. Además, los materiales desecantes líquidos son corrosivos y el manejo de los medios de trabajo es difícil y necesita materiales especiales. Sin embargo, el avance en el campo es rápido, lo que ha dado lugar a algunas aplicaciones con una cuota de mercado potencial.

#### **2.4.2. Diseños de los sistemas de enfriamiento con desecante líquido**

Alizaldeh y Saman (Alizaldeh, 2002) investigaron la aplicación con colector solar directo en la regeneración del desecante. Esto demuestra que la tasa de pérdida de agua por lo general disminuye con la creciente tasa solución de flujo de masa. También es aplicable a las condiciones de verano en Adelaide. Factores como la temperatura inicial del aire y temperatura de la solución, aislamiento solar y racionamiento del aire ambiente pueden afectar al rendimiento.

Kabeel (Kabeel, 2007) estudió la regeneración del desecante líquido a través de la aplicación de colectores solares. Se muestra la potenciación de la regeneración para el flujo forzado en comparación con el flujo natural. Esto debido al aumento del coeficiente de transferencia de masa.

Fumo y Goswami (Fumo N, 2002) investigaron la torre de cloruro de litio embalada al sistema desecante. Esto demuestra que los principales factores que afectan a los deshumidificadores son la concentración del desecante, la temperatura y la humedad del aire. En el caso del regenerador, se muestra que la temperatura desecante, la concentración del desecante y el caudal de aire son los

factores clave. Otros factores que influyen en el rendimiento son el flujo de masa de aire con respecto a las soluciones de desecante.

Gandhidasan (Gandhidasan, 2004) investigó la deshumidificación del aire con desecante líquido. El muestra que el enfriamiento del desecante más que el deshumidificador con agua de torre de enfriamiento afecta a la tasa de deshumidificación. A menor temperatura de agua de enfriamiento de la torre, aumenta la tasa de la humedad retirada. Además, la eficacia intercambiador de calor afecta al rendimiento deshumidificador. Lazzarin et al (Lazzatin RM, 1999) investigaron el sistema de desecante líquido con agua y solución de bromuro de litio y agua y solución de cloruro de calcio.

Li et al (Li Z, 2005) introdujeron el diseño del intercambiador de calor desecante líquido total que se muestra en la fig. 25. El EER simulado (Índice de eficiencia energética para el aire del procesador) es 6.3-7.3 en condiciones de verano. Liu et al (Liu X, 2006) presentaron el diseño del sistema de enfriamiento por desecante líquido. Tu et al (Tu M, 2009) propusieron un sistema de enfriamiento con desecante líquido. El sistema emplea como desecante cloruro de litio. Se utiliza enfriamiento por evaporación indirecta y directa para reducir la temperatura del aire de proceso.

Xiong et al (Xiong ZQ, 2009) investigaron un híbrido de dos etapas con sistema de enfriamiento por desecante utilizando el bromuro de litio como el deshumidificador primario, asistido por cloruro de calcio y accionado por energía solar. Los resultados muestran una mejora en la capacidad de almacenamiento de energía en comparación con el sistema de desecante líquido ordinario, también, un mejor rendimiento de deshumidificación debido al efecto de predehumidificación. El rendimiento del sistema es mayor que con desecante líquido ordinario por 15.8% y 32% (TCOT y COP). El costo de las secciones de desecante líquido disminuyó un 5%, siempre y cuando no haya una fuente abundante de energía solar.

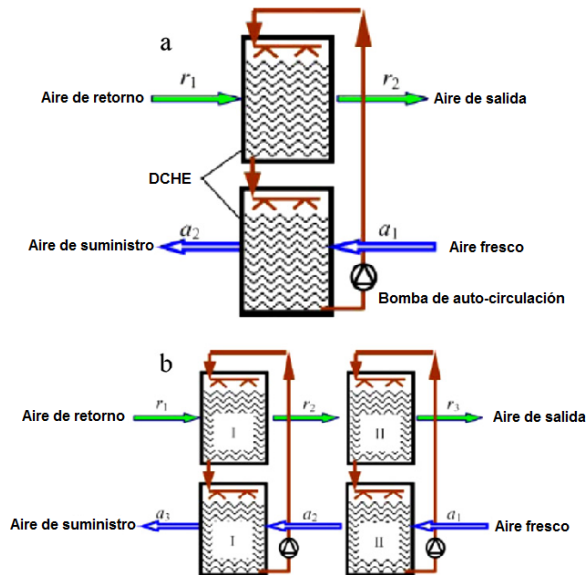


Fig. 25. Intercambiador de calor con desecante líquido: (a) un estado y (b) doble estado (Li Z, 2005).

Yin et al (Yin Y, 2008) presentaron un novedoso regenerador / deshumidificador con desecante líquido. El diseño se basa en el intercambiador de calor de placas de aleta (PFHE). Durante la deshumidificación enfriado internamente, la eficiencia del desecante disminuyó con el aumento de temperatura del agua. Esto demuestra que la eficacia de la regeneración cuando es calentado internamente es mejor que la regeneración adiabática.

Li y Yang (Y. H. Li Y, 2008) investigaron la potencia de un sistema de refrigeración solar con desecante líquido. En la aplicación en el clima de Hong Kong, muestra un 25-50% de ahorro de energía en comparación con el sistema de compresión de vapor. Además, cuanto mayor sea la carga latente en la carga total de ventilación, mayor es el ahorro de energía. Badami y Portoraro (Badami M, 2009) investigaron la pequeña planta de trigeneración con un sistema de refrigeración y desecante líquido. Se acopla a una pequeña máquina de combustión interna en la cal los gases de combustión y el agua de enfriamiento del motor se recuperan para su operación con desecante líquido. Esto muestra que el enfriamiento con desecante es una posible alternativa a otras soluciones técnicas, incluyendo el punto de vista económico.

Kessling et al (Kessling W, 1998) investigaron el sistema de enfriamiento con desecante líquido y con almacenamiento térmico. Los factores importantes para el proceso de absorción eficiente son la concentración de entrada del desecante líquido y la temperatura durante el proceso de absorción. Para una capacidad de almacenamiento de energía alta, se requiere alta relación del aire a la solución para lograr una gran diferencia entre la entrada de la solución y la relación de concentración de salida.

Khan y Matinez (Khan AY, 1998) numéricamente investigaron el rendimiento del amortiguador con desecante líquido. Se muestra que el rendimiento de la absorción depende del tamaño físico del absorbedor, la concentración de la solución, y las tasas de enfriamiento de la masa de aire. Además, el estudio muestra que el flujo a contracorriente y amortiguadores de flujo paralelo no tienen diferencia de rendimiento. La efectividad varía mucho con el número de unidades de transferencia de masa entre el aire procesado y las soluciones desecantes.

Oliviera et al (Oliviera AC, 2000) investigaron el ventilador de aire con impulsor de fibra que se humedece con solución de desecante líquido. Se muestra que el sistema tiene un costo inicial inferior de la rueda debido al tamaño y volumen del sistema. Esto es debido al calor superior y la zona de transferencia de masa en la aguja del motor impulsor. Pietruschka et al (Pietruschka D, 2006) investigaron el absorbedor de desecante líquido con intercambiador de calor (Fig. 26). La ventaja del absorbedor con intercambiador de calor es la deshumidificación del aire de refrigeración combinada y que hace que la eficiencia del proceso de absorción sea alta.

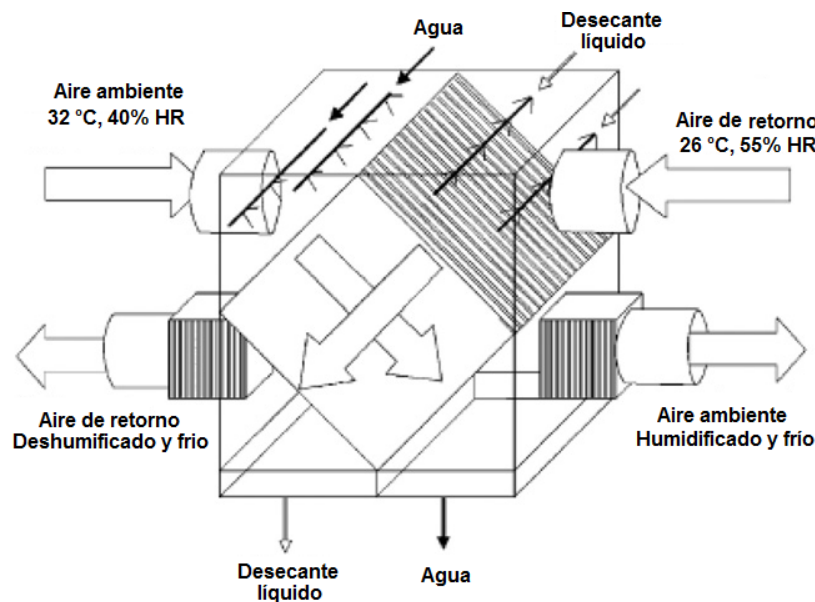


Fig. 26. Unidad absorbedora intercambiadora de calor con desecante líquido (Pietruschka D, 2006).

Saman y Alizaldeh (Saman YM, 2002) investigaron el intercambiador de calor y absorción desecante líquido. Se muestra el intercambiador de calor realizado con el absorbedor de desecante líquido. Además, en el ángulo de inclinación de 45°, tiene un flujo de masa de aire óptima en la que la eficacia del intercambiador de calor y la efectividad de deshumidificación está en un máximo. Por lo tanto, en ángulo de 45°, el intercambiador de calor funciona bien como un enfriador/deshumidificador evaporativo indirecto. Además, se muestra que el rendimiento depende del tamaño físico, el número de unidades de transferencia,

tanto en el lado de agua y el lado de la solución, la concentración de la solución, y los tipos de masas de aire de flujo. Además, se muestra que la configuración en paralelo no tiene ningún efecto a la configuración de contra-flujo. Por lo tanto, se sugiere configuración paralela con menos caída de presión.

Sultan et al (Sultan GI, 2002) investigaron el desempeño de una torre regenerador de paquete. Se demuestra que el proceso de regeneración depende en gran medida de la temperatura de entrada del aire, de la humedad y la velocidad de flujo. Además, la tasa de regeneración disminuye con un aumento de la relación de humedad del aire y concentración de la solución. La evaporación del agua del desecante aumenta con el aumento de la tasa de flujo de aire y temperatura de la solución. Además, Lowenstein (Lowenstein, 2008) hizo investigación sobre el desarrollo de los sistemas de enfriamiento basados en desecante líquido desde el concepto básico de los materiales desecantes.

### **2.4.3. Aplicación y evaluación.**

Se ha investigado la instalación de un sistema de enfriamiento con desecante líquido en un edificio de oficinas. Se usó agua con una temperatura de 12-14°C para enfriar los techos durante el verano. Las soluciones de agua con cloruro de litio como desecante deshumidificaba el aire exterior. El desecante líquido se regeneraba con energía solar a temperaturas de entre 70-80°C por medio de energía solar con consumo de energía eléctrica para las bombas y ventiladores. La fig. 27 muestra la instalación esquemática del sistema en el edificio.

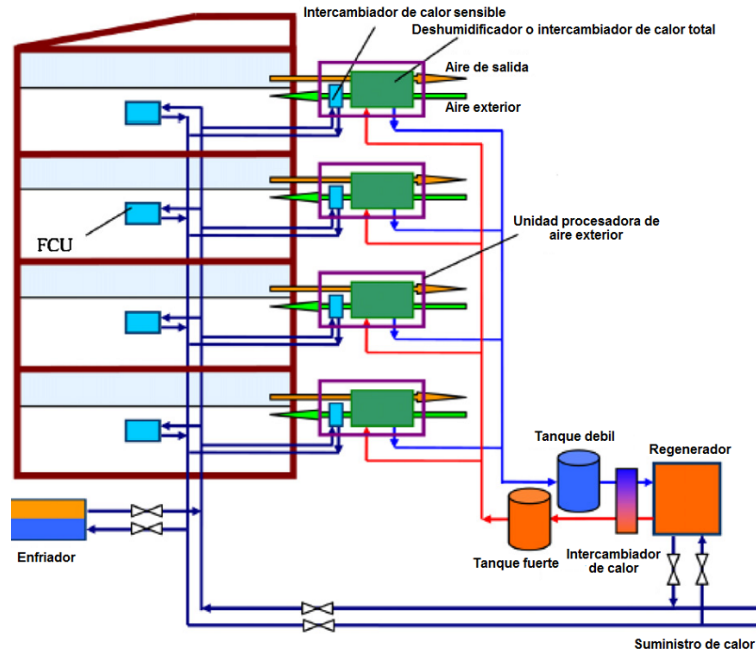


Fig. 27. Sistema de enfriamiento con desecante líquido aplicado a un edificio real (Chen XY, 2005).

Chen et al (Chen XY, 2005) investigaron la instalación de un sistema de refrigeración por desecante líquido en una construcción real. Se muestra que puede reducir 30% del coste en comparación con el sistema convencional (Fig. 28). Además, funciona muy bien incluso en climas muy húmedos.

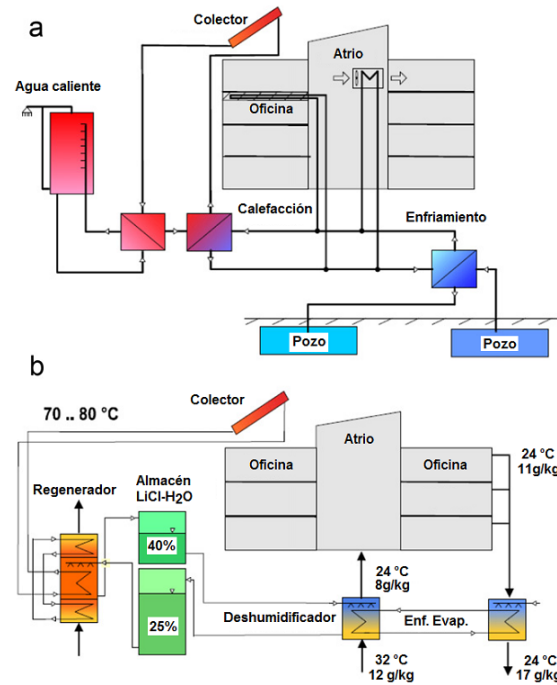


Fig. 28. Instalación de un sistema de enfriamiento solar con desecante líquido.

Liu et al (Liu X, 2006) mostraron la aplicación del sistema enfriamiento con de desecante líquido en el edificio con cogeneración (Fig. 29). Los resultados muestran que la eficacia total de la unidad de cogeneración es más de 80%. Además, el tanque de almacenamiento térmico y el tanque de almacenamiento desecante alargan las horas de operación resultantes de la reducción de la energía térmica de la caldera de gas, la reducción de la energía para el refrigerador de compresión, y para el sistema de desecante líquido. Además, en términos de la emisión de CO<sub>2</sub>, se reduce a 60% más que la del sistema convencional HVAC.

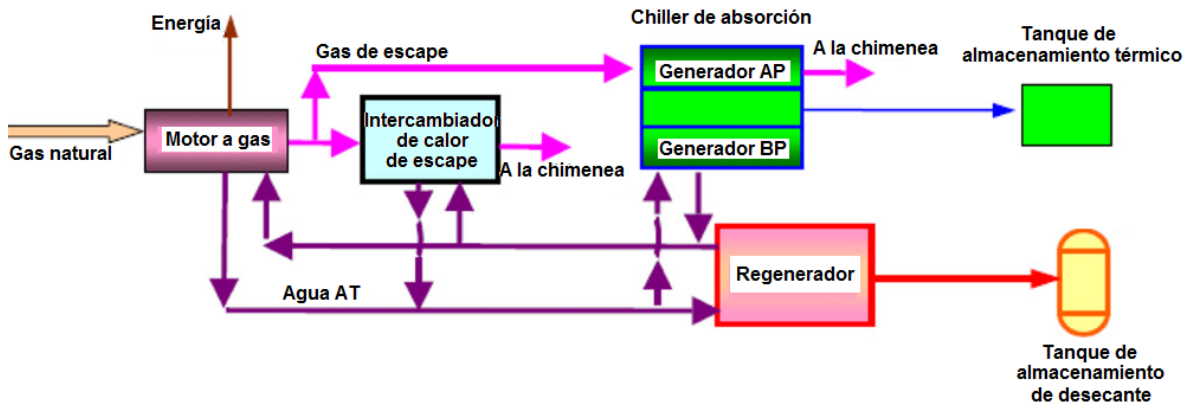


Fig. 29. Sistema de enfriamiento con desecante líquido y cogeneración (Liu X, 2006).

Gasparella et al (Gasparella A, 2005) investigaron la deshumidificación desecante con bomba de calor y fuente de la tierra de un moderno edificio de oficinas en el norte de Italia. Se utiliza un desecante líquido en la columna de relleno. El agua del intercambiador de calor del pozo se utiliza para controlar la carga sensible del aire, mientras que el desecante se utiliza para controlar la carga latente del aire.

Esto demuestra que se ahorra un 30% de la energía primaria en comparación con un sistema convencional de HVAC. El concepto de sonda geotérmica se había realizado como potencial para la refrigeración del edificio en el Reino Unido. Yong et al (Yong L, 2006) realizaron estudios experimentales del sistema de enfriamiento con desecante sólido híbrido en Hong Kong, que muestra que es eficaz debido a la operación de carga parcial, por lo tanto aplicable a climas húmedos. La carga se basa en tres modos diferentes de funcionamiento: sistema híbrido en funcionamiento, solo deshumidificador y el IEC en funcionamiento.

Katejanekarn et al (Katejanekarn T, 2009) presentaron el sistema de refrigeración por líquido desecante, alimentado mediante energía solar, instalado en el Instituto Tecnológico Asiático de Tailandia. La principal ventaja de esta instalación es la ubicación geográfica, ya que está localizado en un clima tropical cálido y húmedo. Se utiliza la energía solar pura para la regeneración del material desecante y agua fría para la refrigeración de aire. Por lo tanto el sistema reduce

la temperatura por  $1.2^{\circ}\text{C}$  y una humedad absoluta de  $0.0042\text{kg/kg}$ . Una de las limitaciones importantes del sistema es el enfriamiento del aire mediante el agua fría de la torre de enfriamiento. Dado que el aire exterior es húmedo, la temperatura del agua de la torre de enfriamiento no se puede reducir más.

Jain et al (Jain S, 1994) investigaron el sistema de enfriamiento por desecante líquido en climas cálidos y húmedos en 16 ciudades de la India. Los resultados muestran que la superficie húmeda del intercambiador de calor da consistentemente un alto COP pero la velocidad de circulación necesaria por tonelada de refrigeración es también más alta. Los ciclos PRM (Proceso en modo de Recirculación, por sus siglas en inglés) y ERM (Modo de recirculación de escape) fluctúan ampliamente para diferentes condiciones de aire exterior, por lo tanto no es apto para el clima tropical. Los valores más altos de eficiencia del intercambiador de calor de aire, las temperaturas más bajas del agua de la torre de enfriamiento y la deshumidificación del aire a bajos niveles de humedad reducen la velocidad de circulación y mejoran el COP del ciclo. Un incremento en la cantidad de ventilación reduce el COP del ciclo- que deberá mantenerse en el mínimo la calidad del aire del interior.

Saman et al (Saman W, 2007) investigaron la aplicación del desecante líquido en los climas del sudeste de Asia. En las tres ciudades investigadas - Bangkok, Jakarta y Singapur, demuestra el potencial del sistema en combinación con el sistema de compresión de vapor, reduciendo la cantidad de energía para enfriamiento y el pico de energía eléctrica demandada. Gahddar et al (Ghaddar N, 2003) investigaron el enfriamiento por desecante líquido como remplazo al sistema de compresión de vapor. Muestran que para el clima de Beirut, el uso de desecante líquido reduce la carga latente del sistema HVAC. Adicionalmente el rendimiento mejoró.

Gommed y Grossman (Gommed K, 2004) investigaron el sistema de enfriamiento por desecante líquido abastecido por el sol en Haifa, Israel. Esto aplicado a las oficinas en edificios. En la investigación paramétrica realizada, muestra que los factores de acondicionamiento de aire (temperatura ambiente y velocidad de flujo) afectan la transferencia de calor y masa en el deshumidificador. La temperatura sufre un pequeño efecto. La temperatura y velocidad de flujo del calentamiento y enfriamiento de agua y el flujo y soluciones de desecante en el deshumidificador y los efectos en el regenerador por humedad del aire suministrado.

Kinsara et al (Kinsara AA, 1997) investigaron la aplicación del sistema de enfriamiento por desecante líquido en medio oriente. Se uso en el sistema con cloruro de calcio como desecante. La temperatura de desecante líquido de entrada tuvo efecto en el desempeño del sistema. El coeficiente del sistema incrementa su desempeño cuando decrece el rango de calor sensible en el espacio. El desempeño del sistema es afectado por la eficiencia del intercambiador de calor.





Zurigat et al (Zurigat YH, 2004) investigaron la deshumidificación del aire con trietilenglicol como desecante en una columna empacada en climas cálidos y húmedos. Demuestran que la velocidad de remoción de la mezcla aumenta cuando se incrementa la concentración de desecante en el flujo y la velocidad del flujo de aire.



# Capítulo 3

## Resultados

### 3.1 Cálculos de calor latente y calor sensible

Para darnos una idea de la importancia que tiene la carga latente del aire (el contenido de humedad en el aire) para el aire acondicionado, a continuación se muestran las siguientes imágenes en secuencia donde se puede ver en la fig. 30 una pantalla con el resultado de la simulación en TRNSYS para las condiciones de la ZMPV, desde la hora 5554 hasta la hora 5560, que de acuerdo a la fig. 31, corresponden desde las 10:00 a.m hasta las 16:00 p.m del día 20 de agosto de un año típico meteorológico:



Fig. 30. Pantalla de la simulación en TRNSYS 16 de la Tbs (°C), HR (%) y radiación horizontal (W/m<sup>2</sup>) para la ZMPV.

AÑO																
DIA A BUSCAR	DD/MM	HORA INICIAL		HORA FINAL												
20-ago		5545	5568													
Nota: Menos 1 para inicio en TRNSYS																
ORA DEL DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HORA ANUAL	5545	5546	5547	5548	5549	5550	5551	5552	5553	5554	5555	5556	5557	5558	5559	5560

Fig. 31. Pantalla de programa en Excel, que muestra el día y la hora del año.

En la fig. 32, se pueden apreciar los resultados obtenidos de la simulación en TRNSYS 16 de la Tbs (°C), HR(%), Radiación horizontal (W/m<sup>2</sup>) y Radiación

inclinada a 10° (W/m<sup>2</sup>). Dichos datos desde la hora 5554 (10:00 a.m.) a la 5560 (16:00 p.m.).

TIME	Ambient	relative	label	label	Rad_Hor	Rad_Incl0	label	label
HOURS	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	NAV	NAV	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	NAV	NAV
5554.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5555.00	29.87	94.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5556.00	30.25	91.50	0.00	0.00	314.70	314.70	0.00	0.00
5557.00	30.78	88.50	0.00	0.00	414.78	414.78	0.00	0.00
5558.00	31.03	86.50	0.00	0.00	195.33	195.33	0.00	0.00
5559.00	31.00	86.00	0.00	0.00	165.19	166.16	0.00	0.00
5560.00	30.96	86.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 32. Pantalla en Excel, mostrando datos de Tbs (°C), HR (%), Radiación horizontal (W/m<sup>2</sup>) e inclinada (W/m<sup>2</sup>) para la ZMPV de la hora 5554 a la 5560.

Finalmente, en la fig. 33 se muestra una imagen parcial de una carta psicrométrica de la ASHRAE para aire a temperaturas normales y a nivel del mar, en la cual se ubicó al aire de acuerdo a la simulación. Para este ejemplo a la hora 5555, que corresponde a las 11:00 a.m. del 20 de agosto, de acuerdo con las figuras 30 y 32, la Tbs es de aproximadamente 30°C y la HR es del 94% (punto **A** de la fig. 33). La entalpía del aire en esas condiciones es de aproximadamente 95.3 kJ/kg de aire seco.

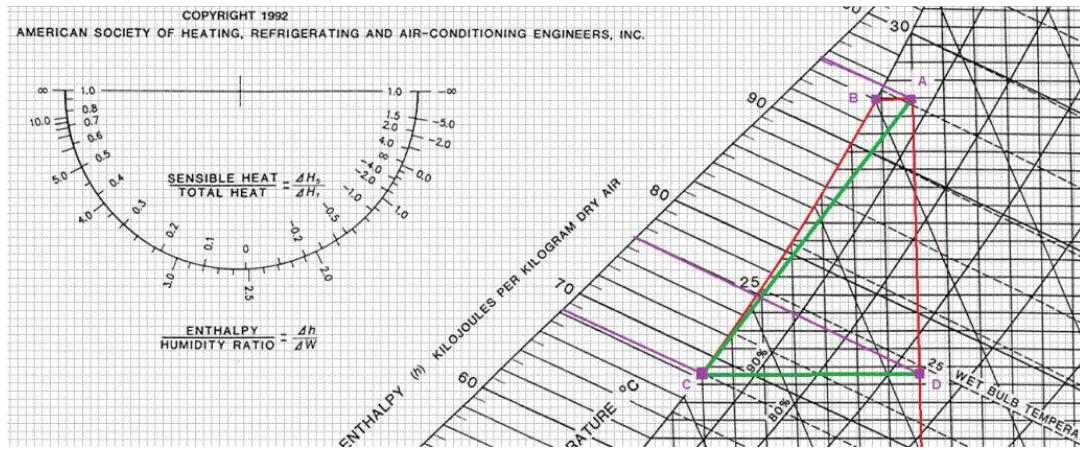


Fig. 33. Imagen parcial de una carta psicrométrica mostrando el recorrido del aire para enfriarlo y deshumidificarlo desde 30°C con 94% de HR hasta 23°C y 100% de HR.

Para un equipo de aire acondicionado VAC, que tomara 100% aire del exterior en esas condiciones y quisiera enfriarlo e introducirlo al espacio acondicionado a 23 °C, el recorrido del aire a través del evaporador sería **ABC**, en el cual, el aire primero pierde calor sensible y baja su temperatura de 30 °C a unos 28.8 °C y la HR aumenta de 94% a 100% (punto **B**). Posteriormente, el aire va perdiendo humedad y baja su temperatura hasta llegar a 23 °C con 100% de HR, que corresponde al punto **C**. En ese punto, la entalpía del aire es de unos 68.3

kJ/kg de aire seco. Para llegar desde **A** hasta **C**, el equipo VAC debió extraer al aire 27 kJ/kg de aire seco que movió.

Si se traza una línea horizontal desde **C** hasta cruzar con la Tbs de 30°C, se encontrará al punto **D**. A este punto le corresponde una entalpía de 76 kJ/kg de aire seco. Se puede observar que se forma un triángulo **ACD**.

Si a la entalpía que le corresponde al punto **D** se le resta la entalpía que le corresponde al punto **C**, se obtiene:

$$76 \text{ kJ/kg} - 68.3 \text{ kJ/kg} = 7.7 \text{ kJ/kg de aire seco.}$$

Ese valor es la cantidad de energía que se le extrajo al aire para bajar su temperatura de 30 °C a 23°C y se le conoce como “carga sensible”. El resto (19.3 kJ/kg de aire seco) es energía que se le debió extraer al aire para condensar el vapor de agua debido a su alta humedad y se le conoce como “carga latente”. Se puede observar que si el aire exterior hubiera estado en el punto **D**, a 30 °C y 66% de HR, para llevarlo desde **D** hasta **C**, solo se hubieran requerido extraerle al aire 7.7 kJ/kg de aire seco en vez de los 27 kJ/kg de aire seco.

Si se realiza la división:

$$7.7 \text{ kJ/kg} / 27 \text{ kJ/kg} = 0.28,$$

Este resultado se conoce como “Factor de calor sensible”, y corresponde al ángulo marcado en el semicírculo izquierdo de la carta, cuando su centro se coloca en el punto de inicio (**A**) y se traza la línea **AC**, o se traza una línea paralela a AC iniciando en el centro del semicírculo. La ecuación mostrada en la carta es “Calor sensible/calor total”.

### 3.2 Caracterización climática de la Zona Metropolitana de Puerto Vallarta, ZMPV

Para determinar que sistema de enfriamiento con desecante sería el más conveniente para la ZMPV, primero se consideró la caracterización de su clima, siendo del tipo Cálido Subhúmedo, a partir de la clasificación de tipos de clima para México de Köppen-García (CONABIO, 2010) y que se muestran en la fig. 34.



Fig. 34. Mapa de los tipos de climas en México, (CONABIO, 2010).

De igual forma se confirmó esta información a partir de los datos ofrecidos por estaciones meteorológicas instaladas en la ZMPV por parte del Sistema Meteorológico Nacional (SMN, 2010), tabla 2, estos datos normales registrados aproximadamente de 36 años, se analizaron para caracterizar a detalle el clima de la zona resultado que es un clima cálido y subhúmedo del tipo más cercano al subtipo húmedo, siendo poca la oscilación de temperatura durante el día, presentando canícula en los meses lluviosos de verano, como se puede ver en la tabla 3.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

ESTADO DE: JALISCO		NORMALES CLIMATOLÓGICAS												PERIODO: 1951-2010
ESTACION: 00014116 PUERTO VALLARTA		LATITUD: 20°36'48" N.						LONGITUD: 105°13'52" W.				ALTURA: 10.0 MSNM.		
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
<b>TEMPERATURA MAXIMA</b>														
NORMAL	28.8	28.9	29.2	30.1	31.6	32.7	33.7	34.0	33.7	33.7	32.3	29.7	31.5	
MAXIMA MENSUAL	31.8	31.7	31.9	32.3	36.7	42.7	36.9	36.4	35.7	35.9	34.0	33.4		
AÑO DE MAXIMA	1978	1957	1980	1958	1957	1957	1957	1954	1957	1979	1960	1957		
MAXIMA DIARIA	35.0	35.0	36.0	36.0	43.5	45.0	45.0	39.0	38.0	39.0	37.0	36.0		
FECHA MAXIMA DIARIA	11/1959	05/1978	18/1978	19/1962	30/1957	24/1957	03/1957	14/1956	29/1955	08/1958	07/1959	07/1960		
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
<b>TEMPERATURA MEDIA</b>														
NORMAL	23.0	22.9	23.3	24.2	26.3	28.1	28.7	28.8	28.7	28.2	26.3	24.2	26.1	
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
<b>TEMPERATURA MINIMA</b>														
NORMAL	17.3	16.9	17.5	18.3	21.0	23.5	23.6	23.7	23.7	22.8	20.3	18.6	20.6	
MINIMA MENSUAL	15.4	14.7	15.9	3.7	18.8	21.7	21.8	22.1	22.2	21.3	17.9	16.1		
AÑO DE MINIMA	1976	1960	1986	1983	1979	1981	1975	1984	1985	1984	1979	1955		
MINIMA DIARIA	11.0	10.5	10.0	0.5	12.0	18.0	20.0	20.0	19.0	18.5	10.0	10.0		
FECHA MINIMA DIARIA	25/1955	03/1960	12/1972	13/1983	07/1960	05/1951	09/1982	23/1982	08/1960	23/1979	17/1973	14/1971		
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
<b>PRECIPITACION</b>														
NORMAL	25.0	6.6	5.9	7.4	10.6	209.6	362.4	315.3	360.0	119.6	13.0	19.2	1,454.6	
MAXIMA MENSUAL	125.0	53.2	141.5	172.7	168.2	635.3	709.9	742.9	842.1	379.0	133.0	132.9		
AÑO DE MAXIMA	1980	1966	1968	1959	1983	1972	1975	1980	1971	1967	1972	1974		
MAXIMA DIARIA	98.0	25.8	76.5	76.5	89.5	160.0	218.5	145.0	241.5	131.5	76.0	92.0		
FECHA MAXIMA DIARIA	30/1984	11/1966	04/1968	16/1959	26/1983	28/1970	13/1951	17/1980	08/1978	07/1967	26/1982	26/1974		
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
<b>EVAPORACION TOTAL</b>														
NORMAL														
AÑOS CON DATOS														
<b>NUMERO DE DIAS CON</b>														
LLUVIA	1.7	0.9	0.5	0.4	0.7	11.7	17.1	16.5	17.1	6.2	1.1	1.7	75.6	
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
NIEBLA	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.6	0.0	0.0	0.1	1.6	
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
GRANIZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		
TORRENTA E.	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	2.3	6.4	5.8	5.6	2.7	0.3	0.0	23.5	
AÑOS CON DATOS	38	37	38	38	38	37	38	38	38	36	36	36		

Tabla 2. Normales climatológicas de Puerto Vallarta, (SMN, 2010).

**Datos Generales**

**Datos Generales del Clima**

Ciudad:	<b>Puerto Vallarta</b>	Temp. (°C) ;	Prec. (mm)
Estado:	Jalisco	Temp. Maxima:	28.8
Estación:	SMN	Temp. Media:	26.1
Coordenadas Geográficas:		Temp. Mínima:	22.9
Latitud:	20° 37' N	Prec. Máxima:	362.4
Longitud:	105° 15' Oeste	Prec. Mínima:	5.9
Altitud:	5 msnm	Prec. Total.	1,454.6
Periodo de observación:		P/T	55.82
Temperatura	36 años	% Prec. Inverna	2.58%
Precipitación	36 años	Oscilación	5.9

**Grupo climático**

**CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA**

A Cálido	Aw2(w) (i')w''
	w2 Subhúmedo
	i' con poca oscilación entre 5 y 7 °C
	w'' Indica la presencia de canícula en los meses con régimen de lluvias de verano. Se llama canícula, sequía de medio verano o sequía intraestival a una pequeña temporada menos húmeda que se presenta en la mitad caliente y lluviosa del año; se manifiesta como una merma en las cantidades de lluvia de los meses veraniegos.

Tabla 3. Caracterización del clima de Puerto Vallarta, según las normales climatológicas.

De igual forma se obtuvo información climática de un año típico meteorológico de la región a partir del programa METEONORM (METEONORM, 2004), el cual, dentro de una base de datos de estaciones meteorológicas obtiene diferentes variables climáticas las cuales podemos visualizar en el programa de TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program), (TRNSYS, 2005), Fig. 35, siendo los parámetros relevantes para el estudio Temperatura (gráfica 1), Humedad Relativa (gráfica 2) y Radiación Total en la Horizontal y en plano inclinado.

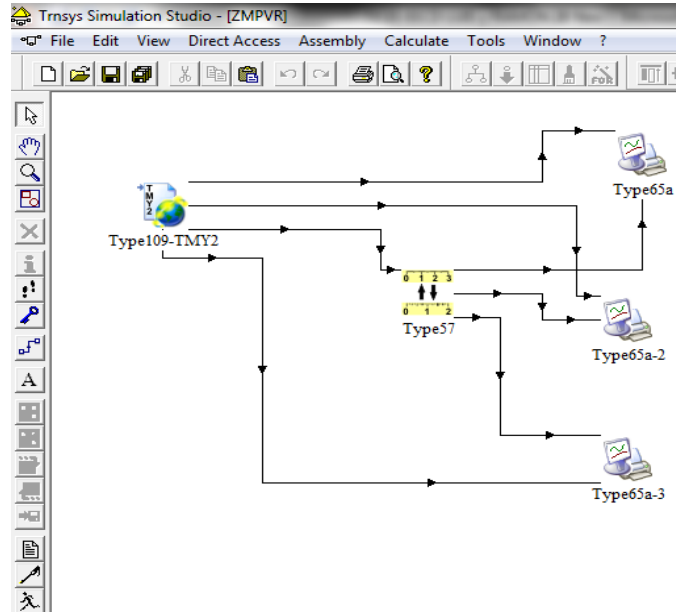
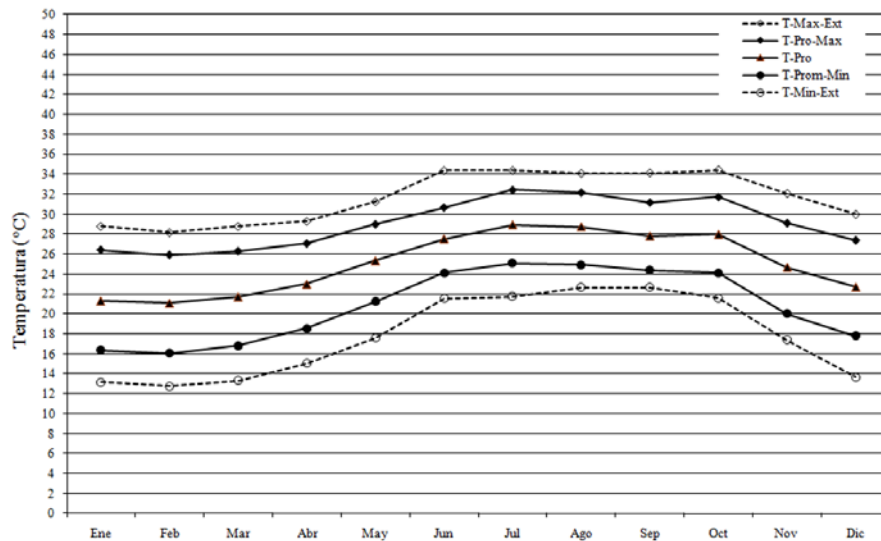
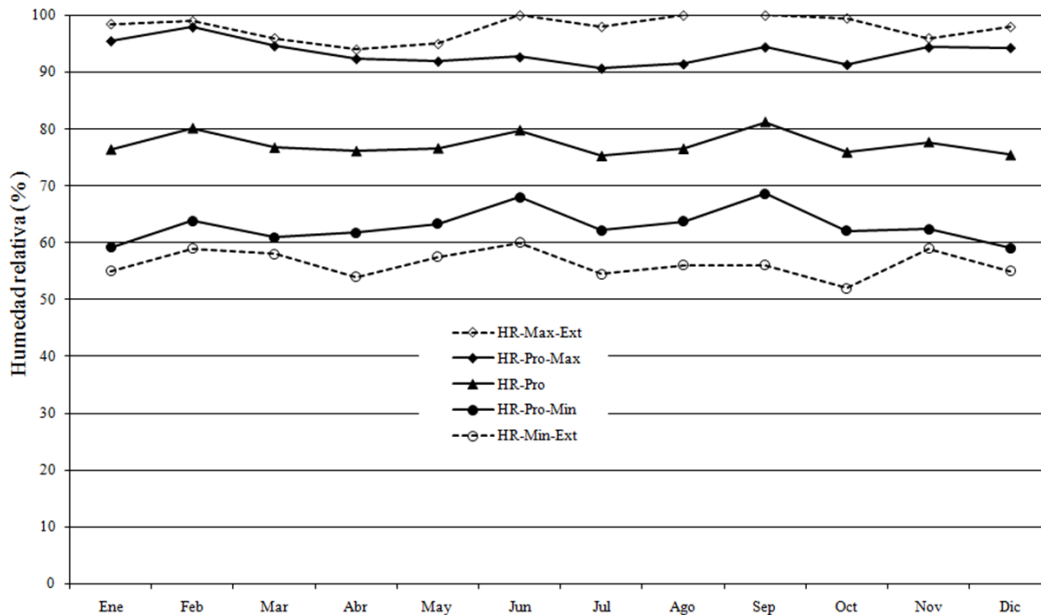


Fig. 35. Simulación del año típico meteorológico de Puerto Vallarta en TRNSYS, (TRNSYS, 2005)



Gráfica 1. Temperaturas promedio mensuales en un año típico meteorológico en Puerto Vallarta.





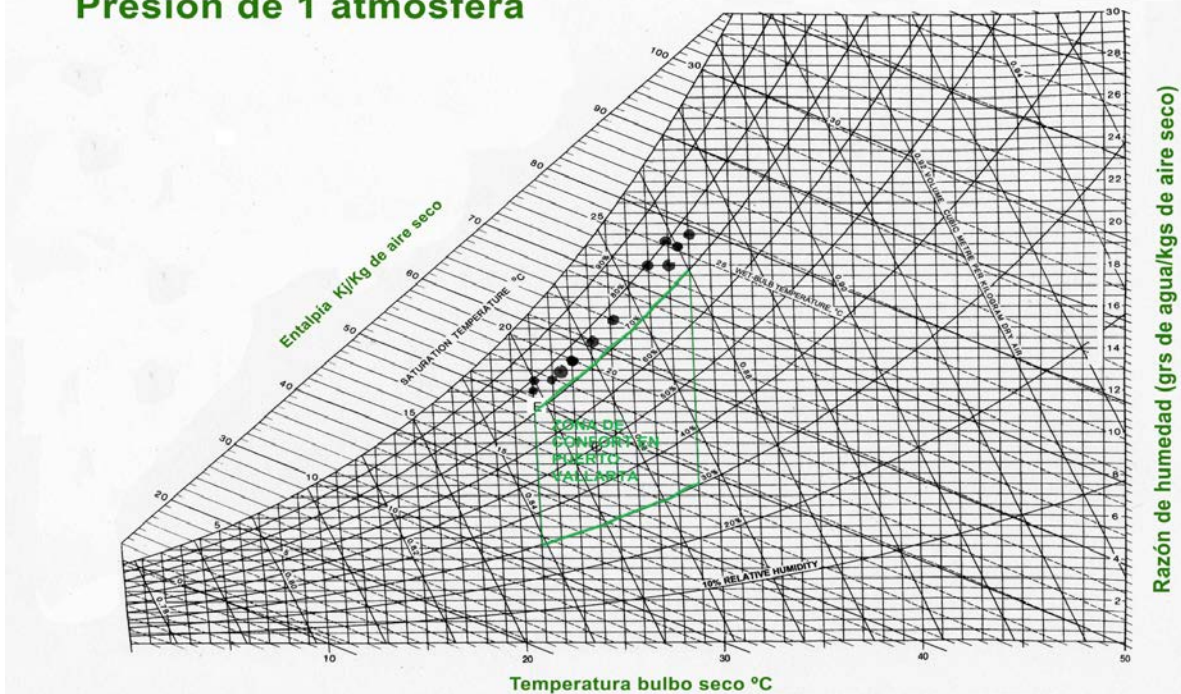
Gráfica 2. Humedad relativa promedio mensuales en un año típico meteorológico en Puerto Vallarta.

Con estos datos podemos graficar en una carta psicrométrica (gráfica 3) para observar de que manera se comporta el clima con respecto a la humedad y que tanto se alejan estos datos del confort térmico al que debe de estar una habitación u oficina, la cual debe de estar en los rangos dentro de 30 a 70% de humedad relativa y entre los 21 a 29°C de temperatura, según la regla de dedo de sistemas de acondicionamiento de aire.

En la gráfica 3 podemos observar que todos los valores promedio mensuales de Humedad Relativa se encuentran por encima del 70% y a pesar de que se encuentra con valores promedio de temperatura dentro del rango de confort, pero recordando que la oscilación de la temperatura durante el día no es mayor a 7°C por el tipo de clima que anteriormente caracterizamos en la zona.

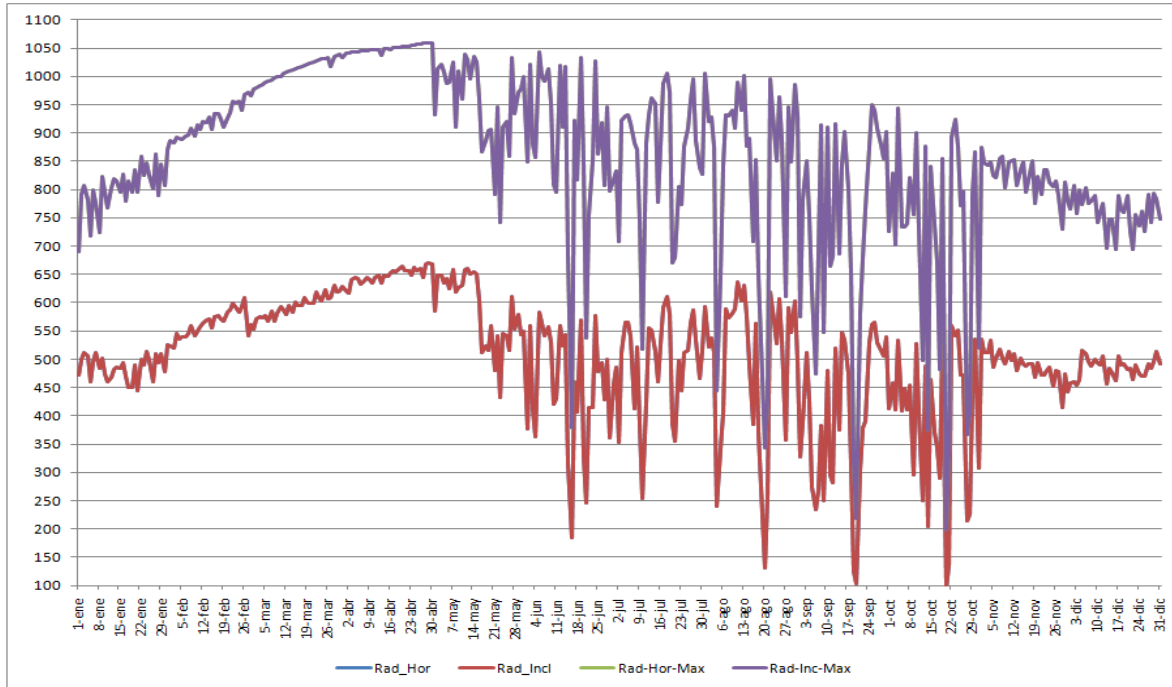
La humedad provoca sobre la temperatura una sensación térmica mayor por lo que durante todo el año sería ideal utilizar un sistema de enfriamiento en habitaciones u oficinas de trabajo.

**Tabla Psicométrica a nivel del mar  
Presión de 1 atmósfera**

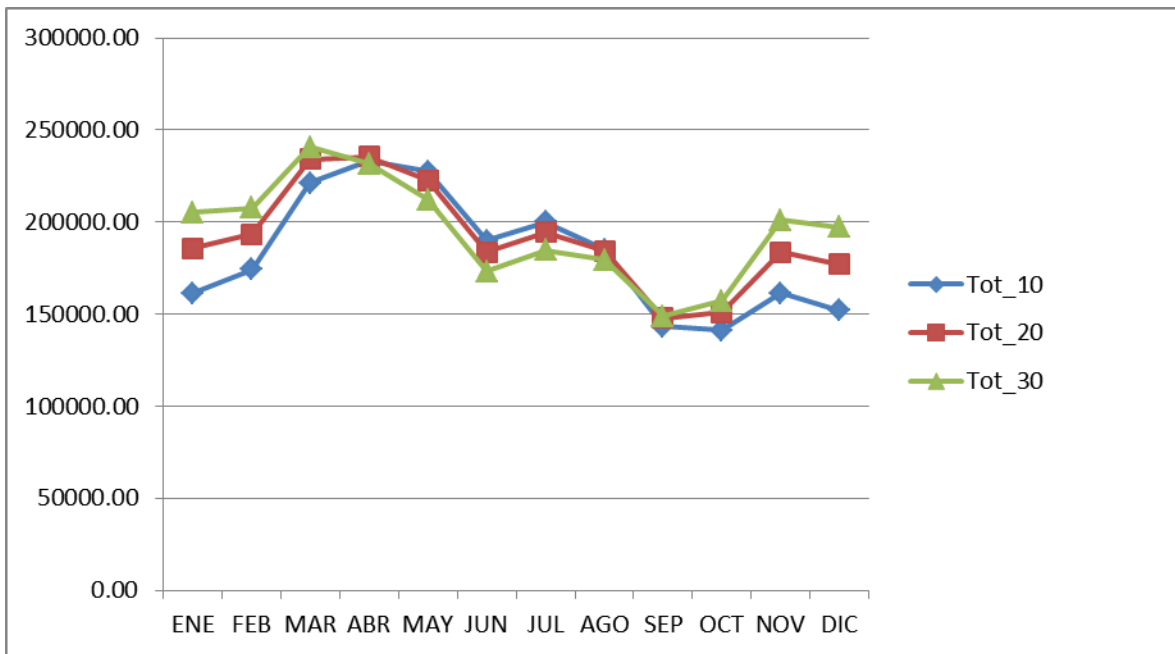


Gráfica 3. Carta psicométrica con los valores promedio mensuales de temperatura y humedad relativa en Puerto Vallarta.

De igual manera se graficaron los datos de radiación del año típico meteorológico de Puerto Vallarta (gráfica 4), obteniendo la cantidad de recurso solar que se puede aprovechar durante el año para utilizarlo en la regeneración del sistema de desacado solar, por lo que se realizaron graficas a diferentes inclinaciones (gráfica 5) para comparar el comportamiento que se tiene de recurso y elegir la opción más viable para su uso en la época que se requiere mayor cantidad de regeneración del sistema,



Gráfica 4. Radiación horaria en un año típico meteorológico en Puerto Vallarta en la horizontal, Inclinación a 10° y de igual forma en valores máximos horarios diarios.



Gráfica 5. Radiación horaria en un año típico meteorológico en Puerto Vallarta en Inclinación a 10°, 20° y 30°.

Se puede observar claramente que la opción más viable para la inclinación óptima de los colectores solares para la regeneración del sistema de desecado

para aire acondicionado es de 10° orientados hacia el sur del lugar. Ya que durante los meses de verano, cuando se tiene alto valores de humedad se tendrá que tener el mejor desempeño de regeneración para la rueda desecante.

Esta información ser útil para la simulación del sistema completo, para el cual es necesario tomar en cuenta todos los type con los que se acondicionará el lugar. Entre estos type son los de Variables climáticas del lugar, equipos de enfriamiento evaporativo, sistema desecante, calentador solar, sistema de control, habitación climatizada y consideraciones de confort óptimo.

### **3.3. Propuesta de sistema híbrido de enfriamiento evaporativo con desecante para la ZMPV.**

De acuerdo a los resultados obtenidos al caracterizar el clima de la ZMPV, se observa que en este lugar el aire acondicionado se usa todo el año, especialmente desde principios de junio a finales de octubre, ya que ese período es el más caluroso, húmedo y nuboso del año. El resto del tiempo el clima aún es húmedo, pero despejado, por lo que se debería usar:

- *Un sistema híbrido: Con rueda del tipo multietapa con desecante sólido, enfriamiento evaporativo, solar y VAC; que permita acondicionar el espacio todo el tiempo que sea requerido.*

Con rueda del tipo multietapa con desecante sólido porque:

- La rueda desecante quitaría la humedad y por tanto la carga latente del aire; lo que significa que el equipo VAC sería usado para bajarle la carga sensible al aire. Esto permite usar un equipo VAC de menor capacidad y que por tanto consuma menos EE de alta calidad. Esto es válido todo el año.
- Rueda con desecante sólido porque el sistema con desecante líquido tiene el riesgo de que el líquido desecante sea arrastrado por el aire de proceso, el cual además es corrosivo. Lo que significa que no es muy seguro para la salud. El sistema de lecho fijo es intermitente, mientras que la rueda desecante permite un funcionamiento continuo.



- Con secado multietapa, ya que permite una temperatura de fin de secado mucho menor que el de una sola etapa. Y esto disminuye el tamaño del enfriador evaporativo y el VAC.

Con enfriamiento evaporativo porque:

- Permite hasta 100% del aire exterior; lo que es muy saludable, le baja la temperatura al aire de proceso para la multietapa de la rueda y que dicho aire llegue relativamente frío al VAC, lo cual a su vez permite un VAC de menor capacidad. En ciertas épocas del año, es posible que con el enfriamiento evaporativo sea suficiente para acondicionar el espacio y no sea usado el VAC.
- Su uso permite bajar el consumo de EE de alta calidad.

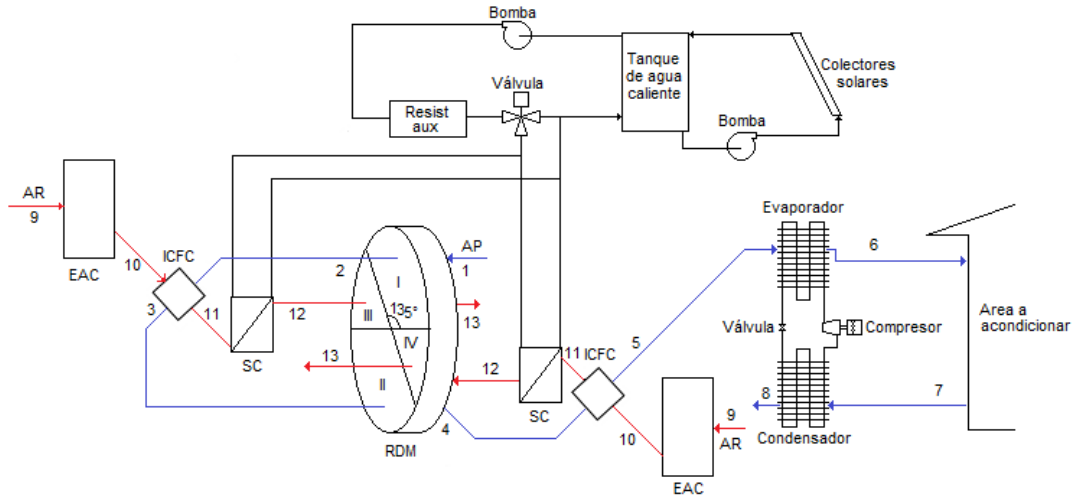
Solar porque:

- La regeneración de la rueda desecante requiere un importante consumo de energía, por lo que es muy conveniente que esta sea energía térmica de baja calidad, a través de colectores solares planos (que dispuestos convenientemente en la azotea también bajen la carga térmica del edificio), lo que a su vez permite el ahorro de EE de alta calidad por todos lados.
- Su uso, combinado con la rueda desecante y el enfriador evaporativo puede ser suficiente en ciertas épocas del año para acondicionar el espacio sin usar el VAC.

VAC porque:

- Su uso permite acondicionar el espacio en cualquier época del año, especialmente en el período de junio a octubre.
- Como el aire le llegaría relativamente frío tanto al evaporador como al condensador, al estar combinado con el resto del sistema, su COP debería ser muy alto por lo que puede suministrar las condiciones adecuadas para el edificio con muy bajo consumo de EE de alta calidad. Un termostato lo activaría cuando el resto del sistema no fuera capaz de obtener las condiciones requeridas.

El sistema propuesto se puede ver en la fig. 36.



EAC: Enfriador evaporativo directo; ICFC: Intercambiador de calor de flujo cruzado  
 SC: Serpentin de calentamiento; AP: Aire de proceso; AR: Aire de regeneración; RDM: Rueda desecante multietapa

Fig. 36. Propuesta de sistema híbrido de enfriamiento evaporativo con desecante para la ZMPV

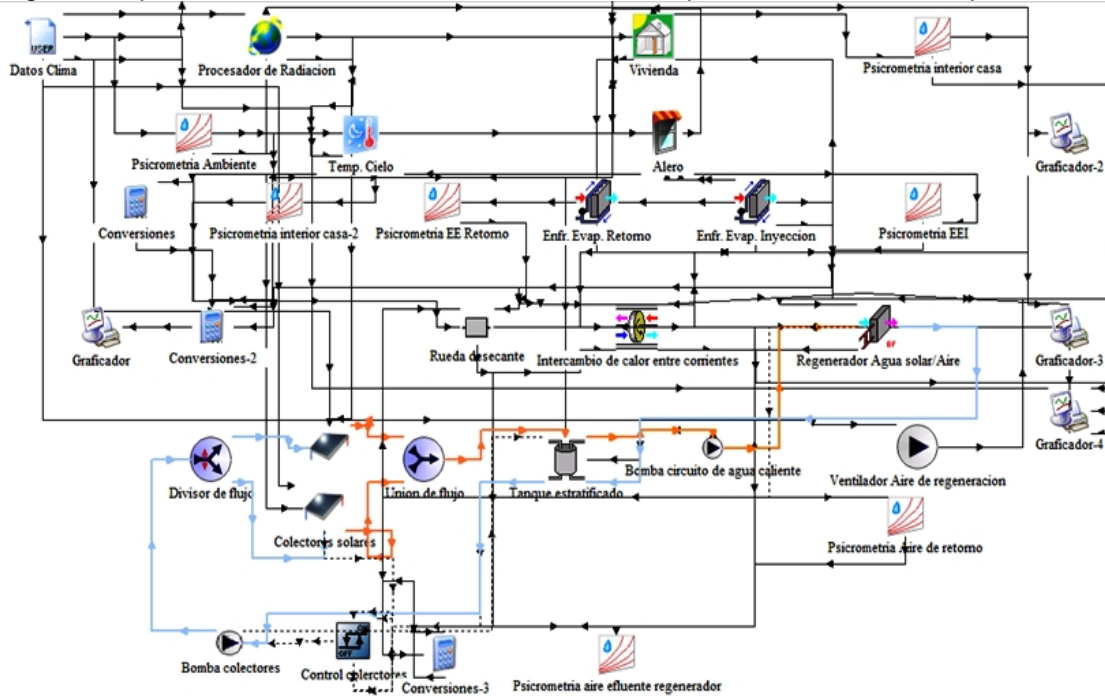


Fig. 37. Primer intento de simulación del sistema de Enfriamiento Evaporativo en TRNSYS.  
 (Gallegos OR, 2010).

Para la realización de la simulación fuimos apoyados por el departamento del Centro de Energías Renovables de la Universidad Autónoma de Baja California quienes realizaron una simulación en TRNSYS de un sistema de ciclo abierto Pennington, pero en nuestro caso no se puede simular en las mismas circunstancias ya que el sistema es diferente y en cuestiones climáticas en



Mexicali se tiene un clima tipo cálido y seco, por lo que en su caso son diferentes las condiciones a climatizar en las regiones.

Otra problemática que se nos presentó al simular es que el type de la vivienda requiere de conocimientos de la arquitectura a climatizar por lo que la simulación se encuentra detenida mientras logramos hacer correr el programa y comprobar la factibilidad del sistema.

De igual forma por medio de recursos obtenidos por el programa de apoyo al cuerpo académico en formación del PROMEP se compro un equipo de rueda desecante y un colector solar, siendo el principio para lograr realizar un prototipo en un futuro próximo del sistema que proponemos.



# Capítulo 4



## CONCLUSIONES

El sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de fuentes de energía convencional en forma de energía eléctrica (IEA, 2004, 2006 y 2008). El sector es uno de los mayores contribuidores de gases de efecto invernadero. Las expectativas son que el consumo de energía en el sector de la construcción continúe incrementándose con la urbanización, industrialización, y el incremento los niveles de vida año con año.

El confort térmico ambiental en los interiores es uno de los mayores consumidores de energía en el sector de la construcción, el cual en la actualidad es provisto por los sistemas de aire acondicionado de compresión de vapor y ventilación de aire (IPCC). Los sistemas pasivos de aire acondicionado y ventilación natural son una opción para la reducción de consumo de energía en el edificio sin afectar el estado de confort térmico en el interior. La Fig. 38 presenta el diagrama de métodos naturales y pasivos para la ventilación y el acondicionamiento de aire en interiores.

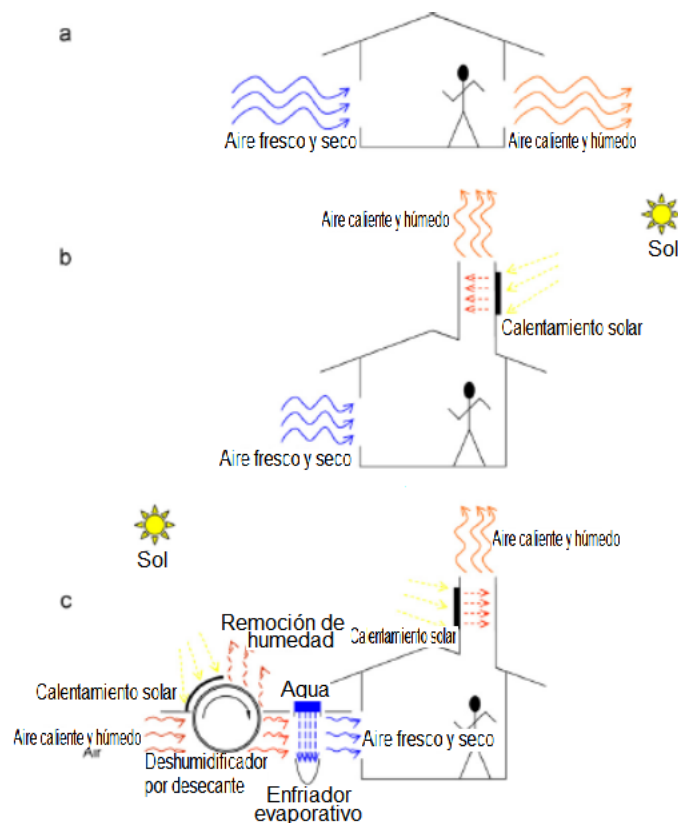


Fig. 38. Sistemas de aire acondicionado pasivo y ventilación natural: (a) viento inducido, (b) Inducción solar y (c) desecante solar.

La aplicación de ventilación natural con viento inducido está basada donde predomina la dirección y velocidad del viento, es una de las muchas opciones sobre la ventilación natural que se han hecho (Khan N, 2008). En el caso de la ventilación solar inducida, es aplicable para aire fresco y seco. Sin embargo, para el caso de aire caliente y húmedo, el uso de aire ambiental directo del exterior al interior provoca un problema de confort térmico. Por lo tanto, la deshumidificación de aire basada en desecante y enfriamiento es una opción para reducir la humedad en el aire y la temperatura con la aplicación de fuentes de energías alternativas como es la energía solar.

El aire acondicionado basado en desecante y el sistema de ventilación utilizan la capacidad de los materiales desecantes para remover la humedad que contiene el aire por un proceso natural – el proceso de sorción. El proceso de sorción (absorción y adsorción) es una interacción entre las moléculas del sorbente y el sorbato a través de interacción intermolecular. Dado que los materiales desecantes contienen baja de concentración de vapor de agua, la humedad de aire es atraída a la superficie de los materiales desecantes, debido a la diferencia de presión de vapor entre el aire y la superficie desecante. A fin de que el material desecante pueda ser usado nuevamente, es necesaria la aplicación de energía térmica para remover la humedad en el material desecante.

Fig. 39 muestra el concepto operacional y el diagrama de la ventilación basada en desecante y sistema de aire acondicionado.

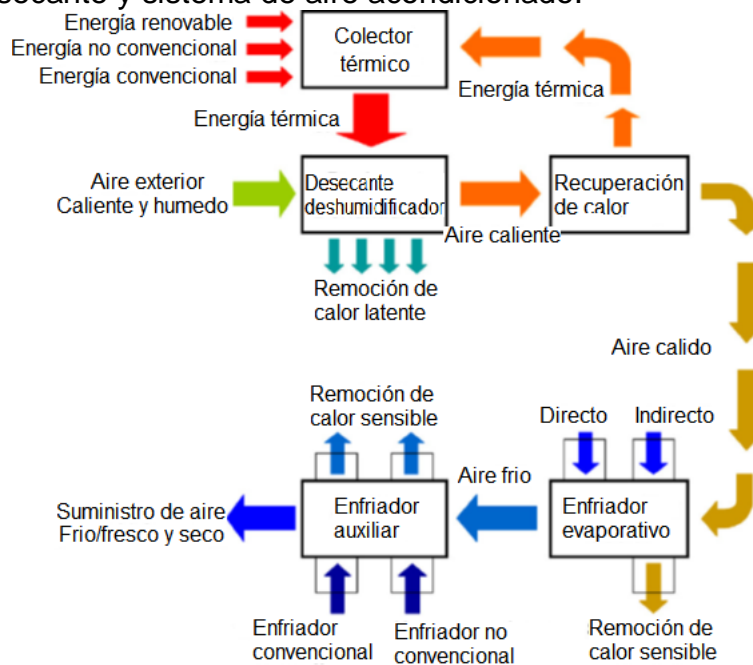


Fig. 39. Concepto general de las tecnologías de enfriamiento con desecante térmicamente activado.

El aire procesado a partir del deshumidificador desecante se calienta debido a la liberación del calor de condensación y el calor de sorción. Los dispositivos de recuperación de calor son usados para recuperar esta energía para aplicarla de nuevo en el deshumidificador desecante en conjunto con otras fuentes de energía térmica. La condición del aire después de la recuperación de calor es que regresa cálido y seco. Como en muchas aplicaciones, la condición del aire es todavía superior a las temperaturas de confort térmico, por lo que en el proceso de enfriamiento evaporativo se aplica ya sea, adición directa de aire húmedo o adición indirecta de aire húmedo en la corriente de aire secundaria. La aplicación del proceso de enfriamiento evaporativo reduce la temperatura de aire con un ligero incremento del contenido de humedad del aire o el contenido de humedad constante de aire.

Además, la aplicación de otras técnicas de enfriamiento de aire, tanto convencionales y no convencionales puede usarse también como un enfriador de aire adicional antes de introducir el aire al interior. Los enfriadores de aire convencionales tales como enfriadores de absorción y sistema de compresión de vapor son usadas con un incremento a su rendimiento. Los enfriadores no convencionales usando como fuente la tierra con bomba de calor y agua pueden también utilizarse. Estos enfriadores auxiliares son aplicados cuando la necesidad de temperatura del aire después del enfriador evaporativo no es suficiente para mantener la condición de confort térmico en el interior.

El aire acondicionado con desecante rotatorio es una típica tecnología activada térmicamente, que principalmente consume fuentes de calor de baja calidad como la obtenida en colectores solares planos, calefacción, calor residual, etc., lo que aliviará la demanda pico de electricidad causada por los sistemas tradicionales de aire acondicionado. Especialmente, sobre la base de los recientes avances en materiales desecantes y configuraciones del sistema.

Aplicaciones más y más prácticas se han aplicado en todo el mundo. Materiales desecantes más ampliamente utilizados en el mercado, a saber, gel de sílice y cloruro de litio, están limitados por la capacidad de deshumidificación o problemas por la cristalización y la corrosión. Agentes desecantes compuestos combinan las ventajas de los desecantes existentes y superan estos problemas y han sido reconocidos como una mejor opción. Además, la reducción en la temperatura de regeneración y el incremento en la capacidad de deshumidificación en un amplio intervalo serán de gran beneficio para la utilización de calor de baja temperatura y expansión de la aplicación del aire acondicionado con desecante. La mayoría de los sistemas de aire acondicionado con desecante rotativo existentes se originan a partir de configuraciones típicas básicas, tales como el ciclo de ventilación, el ciclo de recirculación y el ciclo Dunkle. Y estos ciclos son apropiados para diferentes aplicaciones, por ejemplo, el ciclo de ventilación se recomienda para el espacio acondicionado con alto requerimiento de aire, mientras que el ciclo de recirculación es adecuado para espacios que

requiere mucho menos aire fresco. Además, sobre la base de las configuraciones básicas del sistema, algunas tecnologías avanzadas, es decir, regeneración por etapas, deshumidificación isotérmica, aire acondicionado híbrido con desecante, y que el aire acondicionado y desecante produzcan tanto aire seco como agua enfriada, se han desarrollado e investigado para reducir el requisito de reactivación, garantizar la estabilidad de funcionamiento, mejorar la tasa de utilización térmica y potencial de ahorro energético.

El sistema híbrido de aire acondicionado con desecante es el más investigado debido a que integra las ventajas de sistema de deshumidificación desecante y el aire acondicionado frente a otros sistemas, menor tamaño del sistema y mejora el rendimiento del sistema significativamente; El aire acondicionado con desecante que produce tanto aire seco como agua fría es una tecnología novedosa. Más y más sistemas de aire acondicionado con rueda desecante y que aprovechan la energía solar se han instalado recientemente. Los nichos de mercado tradicionales se han ampliado en gran medida de áreas especiales como la electrónica, la alimentación, el almacenamiento y la farmacéutica, los supermercados, restaurantes, escuelas, hospitales, edificios de oficinas, etc. (Wurm J, 2002).

La calefacción urbana y sistemas basados en calor residual son cada vez más maduros, particularmente la integración en el caso de los sistemas de cogeneración. Las fuentes renovables de energía como la bioenergía también han sido investigadas y se sugiere que sea utilizable. Aunque la energía solar y refrigeración desecante se encuentra todavía en la etapa de demostración, ha sido mucho más interesante porque eso funciona con cualquier otra fuente de calor debido a las ventajas de la renovabilidad y buena correspondencia con los cotos de enfriamiento de la demanda de energía solar. Por otra parte, cuando la calefacción y sistemas de agua caliente se combinan, el desempeño económico se haría considerable.

#### **4.1. Beneficios del enfriamiento con desecante**

Los materiales desecantes se utilizan para aplicar el aire acondicionado con las siguientes ventajas cuando (ASHRAE, 1989):

- (1) La carga latente es mayor en comparación con la carga sensible.
- (2) El costo de la energía para regenerar el desecante es menor cuando se compara con el costo de energía para deshumidificar el aire por enfriamiento cuando está por debajo del punto de rocío.

(3) El control de nivel de humedad requerido en el espacio puede requerir enfriar el aire a temperaturas de punto de rocío bajo cero si la refrigeración por compresión fuera usada para deshumidificar el aire.

(4) El control de nivel de temperatura requerido para el espacio o procesos requiere suministro continuo de aire a temperaturas bajo cero.

Por lo tanto, el funcionamiento del sistema de enfriamiento con desecante será más barato que el sistema de enfriamiento de compresión de vapor y el costo inicial es menor cuando las condiciones anteriores se cumplen. Además, los materiales desecantes tales como dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) absorben otros tipos de contaminantes presentes en el aire tales como bacterias y virus a través del proceso fotocatalítico. Con esto, el sistema de enfriamiento con desecante aumenta la calidad del aire sin un costo adicional de purificadores de aire en el sistema de compresión de vapor.

La mayor parte del consumo de energía para la operación del sistema de enfriamiento por desecante es en la reactivación del material desecante utilizado. Para cada temperatura de operación del sistema de enfriamiento por desecante, la energía de regeneración es para (ASHRAE, 1989):

(1) El calor requerido para incrementar la temperatura de la superficie del desecante lo suficientemente alta para hacer que la presión vapor sea más alta que la del aire circulante.

(2) El calor necesario para vaporizar la humedad en la superficie desecante.

(3) El calor de desorción de agua de la superficie del desecante.

Parte de la energía consumida en la operación del sistema de enfriamiento por desecante es para los ventiladores; para el movimiento a la vez del aire exterior de la deshumidificación y de la reactivación/regeneración del material desecante. La otra parte de la energía es para la operación del proceso de enfriamiento de aire antes de introducirlo al ambiente interior. Por lo tanto, la aplicación del sistema de energía solar térmica/fotovoltaica puede complementar al consumo de energía del sistema.

Varios estudios son orientados al sistema de enfriamiento con desecante desde la invención de la rueda de panal por Carl Munter de Suecia entre ellos los de Yu et al. (Yu BF, 2009), Grossman y Johannsen (Grossman G, 1981), Kim e Infante Ferreira (Kim DS, 2008), Afonso (CFA., 2006), Grossman (Grossman, 2002), Mazzei et al. (Mazzei P, 2005), Waugaman et al. (Waugaman DG, 1993), Daou et al. (Daou K, 2006), Wang et al. (Wang RZ, 2009), Desideri et al. (Desideri U, 2009) y Balaras et al. (Balaras CA & al., 2007). Y la revisión del documento de la conferencia de Saman et al. (Saman W, 2007).

Estudios de factibilidad orientados a la aplicación del sistema de enfriamiento basado en desecante que usan energía renovable como lo es la solar como fuente de energía primaria; entre ellos los estudios de Halliday et al (Halliday SP, 2003) muestran que el sistema desecante es aplicable en clima templado como el de Reino Unido. Además, los estudios de Mavroudaki et al (Mavroudaki P, 2002) muestran que el sistema de enfriamiento basado en desecante no es viable cuando la humedad relativa es alta como en ciertas áreas del Mediterráneo debido a que es mayor la temperatura de regeneración requerida. Henning et al (H. Henning, Pagano T, Mola S, Wiemken E., 2007) estudiaron el diseño del sistema de enfriamiento con desecante para climas húmedos en ciertas áreas del Mediterráneo en la que si es viable.

Numerosas variaciones del sistema de enfriamiento con desecante son orientadas para la aplicación económica en climas calientes y húmedos. Los estudios realizados por Ando et al (Ando K, 2005) muestran que el proceso de doble deshumidificación en el que dos ruedas desecantes son utilizadas con baja temperatura de regeneración. La propuesta es para incrementar el rango de deshumidificación usando fuentes de energía térmica de baja temperatura. Enteria et al (Y. H. Enteria N, Mochida A, Takaki R, Satake A, Yoshie R, et al., 2009) y Enteria et al (Y. H. Enteria N, Satake A, Mochida A, Takaki R, Yonekura H, et al., 2011) muestran que el diseño diferente del sistema de enfriamiento basado en desecante en el que el enfriamiento del aire deshumidificado es hecho a través del proceso a humedad constante (la deshumidificación del desecante y el enfriamiento evaporativo indirecto). Los procesos evitan el paso de deshumidificación en el caso del sistema típico que emplea enfriamiento evaporativo directo en el suministro de aire.

El sistema de enfriamiento basado en desecante controla la calidad del aire al interior como lo menciona Zhang et al. (Zhang H, 1999). Basado en los estudios conducidos por Fang et al. (Fang L, 2008), La rueda desecante remueve los VOC's (compuestos orgánicos volátiles) del aire, y más particularmente los VOC's más comunes como, el tolueno y n-hexano. De esta información, el sistema de enfriamiento basado en desecante no solo resuelve problemas de salud relacionados con humedad en los edificios, sino que también resuelve el problema de la calidad del aire en el interior. Con esto, este sistema puede ser agregado para el manejo del ambiente interior como en edificios de oficinas que es revisado por Shaw et al (Shaw C, 2005) del Consejo de investigación nacional de Canadá, lo más importante, el sistema de enfriamiento basado en desecante puede ser aplicado para resolver los problemas de energía, confort, ambientales y aire al interior más particularmente en la sensibilidad de los ocupantes como es el cuidado de la salud. Sin embargo, se ha demostrado por Goswami et al (Goswami D, 1997) que el dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) es un material desecante que puede ser usado para el control de microorganismos en el aire a través de proceso fotocatalítico.

## 4.2. Desarrollo y aplicación del enfriamiento con desecante

Las tecnologías de enfriamiento con desecante térmicamente activado son alternativas promisorias al sistema de compresión de vapor en el manejo de la energía sensible y latente contenida en el aire. Esto es debido a que la operación del sistema puede hacerse con otros recursos de energía – energía solar, calor residual y otros.

La investigación sobre ventilación y sistemas de aire acondicionado con desecante solar es muy importante debido al hecho de que la cantidad de energía térmica contenida en el aire esta casi en fase con la cantidad de radiación solar. En clima cálido y húmedo, como es en el este de Asia en verano y sudeste de Asia durante todo el año, la temperatura del aire y la humedad son altas. Además, la deshumidificación a lo largo del día es necesaria en comparación con otras condiciones climáticas, la energía eléctrica más barata y disponible es en la noche (sin picos de energía) que puede se almacenada para la operación del sistema en el día. Enteria et al (Y. H. Enteria N, Satake A, Mochida A, Takaki R, Yonekura H, et al., 2011) muestran la aplicabilidad del almacenamiento de energía eléctrica durante la noche para la utilización en el día. La energía solar combinada para la deshumidificación de aire con agua subterránea para el enfriamiento de aire hace que el sistema utilice recursos naturales de energía como se hizo en Londres.

El sistema de compresión de vapor funciona para eliminar el contenido de humedad del aire para el enfriamiento de aire por debajo de su temperatura de rocío. Sin embargo, como el aire después de enfriarlo abajo de su punto de rocío es muy frio, el recalentar el aire es necesario antes de ser introducido al ambiente interior. Como la región Asia-Pacífico es muy caliente y húmeda durante todo el año en el sudeste de Asia y durante el verano en el este de Asia, el sistema de compresión de vapor opera adecuadamente para reducir el alto contenido de humedad de aire externo. La aplicación del material desecante junto con el sistema de compresión de vapor minimiza la condición de operación del sistema de compresión de vapor debido a que el material desecante maneja la energía latente contenida en el aire, mientras que el sistema de compresión de vapor la carga sensible del aire (desecante híbrido). En la aplicación orientada al sistema líquido, este puede tener altos rendimientos de hasta 44.5% aplicado a edificios verdes. La ventaja del sistema híbrido de enfriamiento con desecante es su operación a carga parcial.

Se recomiendan las siguientes pautas para la investigación y el desarrollo:

1. Desarrollo de la capacidad de adsorción alta temperatura de regeneración baja y materiales de bajo costo desecantes. Compuestos como desecantes de gel de sílice-cloruro de litio puede satisfacer los requisitos de la deshumidificación y regeneración y será una buena opción. Sin embargo, su tecnología de procesamiento se complica en cierta medida, lo que conduce a alto costo relativo
2. Desarrollo de sistemas de deshumidificación por etapas de regeneración o de etapas múltiples para reducir los requerimientos de reactivación de temperatura y aumentar la tasa de utilización térmica. Especialmente, en climas cálidos y húmedos, para aplicaciones de regeneración a baja temperatura, las demandas de deshumidificación apenas pueden satisfacerse sin la adopción de regeneración gradual o de deshumidificación multi-etapa. Además, cuando el sistema térmico solar se incorpora, las ventajas de la regeneración por etapas y la deshumidificación multi-etapa se incrementa. Además, por el colector solar de bajo costo (por ejemplo: colector solar de placa plana y el colector solar de tubos de vacío) y la integración hermosa con el edificio.
3. Determinación de las estrategias óptimas de operación para mejorar la aplicabilidad del sistema. Debido a la variación de los estados del aire ambiente y la cubierta con el tiempo, el clima, estación y la ubicación, el rendimiento térmico y eléctrico del sistema de acondicionamiento de aire desecante giratorio será determinado realmente por la estrategia de control del modo de funcionamiento.
4. Diseño de sistemas pequeños y compactos, con el fin de que sistema de acondicionamiento con desecante rotatorio se pueda ampliar a los edificios residenciales, reduciendo así el consumo energético del edificio.
5. Normalización del proceso de producción. Diseño estandarizado del aire acondicionado y las herramientas de análisis no sólo para disminuir el costo inicial, sino también para ser beneficioso para el desarrollo del mercado.
6. La transferencia de conocimientos en la tecnología de acondicionamiento de aire con desecante. Como una nueva tecnología, el aire acondicionado con desecante giratorio aún no ha obtenido el reconocimiento de los profesionales de HVAC y mucho menos por el público.

En conclusión, la mejora en la tasa de utilización de la energía, la reducción en el costo y el tamaño, y la normalización en el diseño y la producción son los



temas clave que enfrenta la tecnología de acondicionamiento de aire desecante giratorio para lograr una aplicación más amplia.

La Tabla 4 muestra el desarrollo y la aplicación de los sistemas de enfriamiento basados en deshumidificación de aire con desecante. El desarrollo y aplicación de la ventilación y el sistema de aire acondicionado basadas en desecante se está expandiendo globalmente. Sin embargo, en el clima caliente y húmedo de la región Asia-Pacífico, Sudamérica y África, todavía no es completamente utilizado. De esta información, el hacer investigaciones de sistemas para la aplicación en estas regiones es expandir el potencial del sistema para una aplicación más amplia. Por lo tanto, el sistema tiene potencial como tecnología de ventilación y acondicionamiento de aire para climas calientes y húmedos en edificios saludables y eficientes energéticamente. El mayor efecto está en la reducción en el consumo de energía convencional y menor liberación de gases de efecto invernadero, aportado por el sector de la construcción al proporcionando condiciones de confort térmico saludable.

**Tabla 4.** Desarrollo global y aplicación de las tecnologías de enfriamiento con desecante térmicamente activado.

Continente	País	Sistema de desecante solido	Sistema de desecante liquido	Sistema desecante hibrido
<b>África</b>	Egipto	X		
	Kenia	X		
<b>Asia</b>	China	X	X	X
	India	X	X	X
	Irán	X		
	Iraq	X		
	Israel	X	X	X
	Japón	X	X	X
	Kuwait		X	
	Líbano	X		
	Pakistán	X		
	Quatar		X	
	Arabia Saudita	X	X	
	Singapur	X		
	Corea del Sur	X		
	Tailandia	X	X	
	Turquía	X		
<b>Europa</b>	Francia	X		
	Alemania	X	X	X

	Italia	X	X	X
	Polonia	X		
	Suecia	X	X	
	Suiza		X	
	Reino Unido	X		
<b>América del norte</b>	Canadá	X	X	
	México	X		
	Estados Unidos de América	X	X	X
<b>Oceanía</b>	Australia	X	X	X
	Nueva Zelanda		X	
<b>América del sur</b>	Cuba	X		
	Brasil	X		

### 4.3. RECOMENDACIONES

Las fuentes renovables de energía como la bioenergía se sugiere que sean utilizables. Aunque el enfriamiento con desecante y energía solar se encuentra todavía en etapa de demostración, ha atraído el interés debido a las ventajas de la renovabilidad y buena correspondencia entre la disponibilidad de energía solar con los períodos de demanda de enfriamiento.

En aras de la salud y la comodidad, llama cada vez más la atención y se aborda en los estándares ASHRAE el tema de la calidad del aire interior, pues el tener el 100% de aire exterior representa aumento de la carga de refrigeración total y carga latente especialmente. Por lo anterior, se deben hacer estudios al respecto.

Se requiere mayor difusión de los conocimientos acerca de esta tecnología novedosa, para que más investigadores participen y sean realizadas mejoras. También el hecho de que las personas en general la conozcan se cree que permitirá una mayor aplicación de la misma y por tanto pudiera haber disminución en los costos y más personas las usarían, de modo que su impacto debería ser cada vez mayor.

## Referencias

- Abrahamsson K, J. A. (1993). Carnot comparison of multi-temperature level absorption heat cycles. *International Journal of Refrigeration*, 16, 240-246.
- AIC, A. I. C. (2000). Desiccant cooling technology resource guide U. A. C. E. R. Laboratory/Science (Ed.) Retrieved from <http://www.cedengineering.com/upload/Desiccant%20Cooling%20Technology.pdf>
- Aldy JE, S. R. (2008). Climate policy architectures for the post-Kyoto world. *Environment* 50, 6-17.
- Alizaldeh, S. W. (2002). An experimental study of a forced flow solar collector/regenerator using liquid desiccant. *Solar Energy* 73, 345–362.
- Ando K, K. A., Hirose T, Goto M, Okano H. (2005). Experimental study on a process design for adsorption desiccant cooling driven with a low-temperature heat. *Adsorption*, 11, 631-636.
- Aristov Yul, T. M., Cacciola G, Restuccia G. (1996). Selective water sorbents for multiple applications. CaCl<sub>2</sub> confined in mesopores of silica gel: sorption properties. . *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 59(2), 325-333.
- ASHRAE. (1989). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers fundamentals. Atlanta, Georgia.
- Badami M, P. A. (2009). Performance analysis of an innovative small-scale trigeneration plant with liquid desiccant cooling system. *Energy and Buildings*, 41, 1195–1204.
- Balaras CA, G. G., Henning HM, Infante Ferreira A, Podesser E, Wang L, & al., e. (2007). Solar air conditioning in Europe—an overview. *renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 299-314.
- Baptiste PJ, D. R. (2003). Energy policy and climate change. *Energy Policy*, 31, 155.
- Bard, E. F. M. (2006). Climate change and solar variability: what's new under the sun? *EPSL Frontiers* 248, 480–493.
- Barrios S, B. L., Strobl E. (2006). Climatic change and rural-urban migration: the case of Sub-Saharan Africa. *Journal of Urban Economics*, 60, 357.
- Beery KE, L. M. (2001). Chemistry and properties of starch based desiccants. *Enzyme and Microbial Technology*, 28(7–8), 573–581.
- Bernhoff H, S. E., Leijon M. (2006). Wave energy resources in sheltered sea areas: a case study of the Baltic Sea. *Renewable Energy*, 31, 2164-2170.
- Bourdoukan P, W. E., Joubert P, Sperandio M. (2008). Potential of solar heat pipe vacuum collectors in the desiccant cooling process: modeling and experimental results. *Solar Energy* 82, 1209–1219.
- Burns PR, M. J., Beckman WA. . (1985). Hybrid desiccant cooling systems in supermarket applications. . *ASHRAE Transactions* 91(Part 1B), 457–468.
- Camargo JR, G. E., Ebinuma CD. (2005). An evaporative and desiccant cooling system for air conditioning in humid climates. *Journal of the Brazil Society of Mechanical Science and Engineering* XXVII, 243–247.
- Capozzoli A, M. P., Minichiello F, Palma D. (2006). Hybrid HVAC systems with chemical dehumidification for supermarket applications. . *Applied Thermal Engineering* 26(8–9), 795–805.

- Casa W, S. G. (2005). Experiences with a gas driven, desiccant assisted air conditioning system with geothermal energy for an office building. *Energy and Buildings* 37, 493–501.
- CFA., A. (2006). Recent advances in building air conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1961–1971.
- Cler, G. (1992). Desiccant-based dehumidification for army facilities (Vol. USA/TR FE-93/10). Champaign, IL: US Army Construction Engineering Research Laboratories (USACERL).
- Collier RK, C. T., Lavan Z. . (1986). Advanced desiccant materials assessment, Final report: Gas Research Institute Report
- CONABIO (Cartographer). (2010). Tipos de climas en México. Retrieved from <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/climas/climas.cfm>
- Chen XY, L. Z., Jiang Y, Qu KY. (2005). Field study on independent dehumidification air-conditioning system-II: performance of the whole system. *ASHRAE Transactions*, 111, 277–284.
- Dai YJ, W. R., Xu YX. (2002). Study of a solar powered solid adsorption-desiccant cooling system used for grain storage. *Renewable Energy*, 25(3), 417–430.
- Daou K, W. R., Xia Z. . (2006). Desiccant cooling air conditioning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10, 55–77.
- Day AR, O. P., Jones PG, Dunsdon A. (2009). The use of the planning system to encourage low carbon energy technologies in buildings. *Renewable Energy*, 34, 2016–2021.
- Desideri U, P. S., Sdringola P. . (2009). Solar-powered cooling systems: technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications. *Applied Energy* 86, 1376–1386.
- Dhar PL, S. S. (2001). Studies on solid desiccant based hybrid air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering* 21(2), 119–134.
- Dunkle, R. (1965). A method of solar air conditioning. *Mechanical and Chemical Engineering Transactions of the Institute of Engineers*, 73, 73–78.
- Dupont M, C. B., Beghin B. . (1994). Desiccant solar air conditioning in tropical climates: field testing in Guadalupe. *Solar Energy* 52, 519–524.
- Elsayed SS, H. Y., Akisawa A, Kashiwagi T. (2006). Analysis of an air cycle refrigerator driving air conditioning system integrated desiccant system. *International Journal of Refrigeration* 29(2), 219–228.
- Enteria N, Y. H., Mochida A, Takaki R, Satake A, Yoshie R, et al. (2009). *Synergization of clean energy utilization, clean technology development and controlled clean environment through thermally activated desiccant cooling system*. Paper presented at the Proceedings of ASME Energy Sustainability.
- Enteria N, Y. H., Satake A, Mochida A, Takaki R, Yonekura H, et al. (2011). Initial operation and performance evaluation of the developed solar thermal and electric desiccant cooling system. *Experimental Heat Transfer*, 24, 59–87.
- Fang L, Z. A., Wisthaler A. (2008). Desiccant wheels as a gas-phase absorption (GPA) air cleaners: evaluation by PTR-MS and sensory assessment. *Indoor Air*, 18, 375–385.
- Fischer J, S. J. (2004). Desiccant-based combined systems: integrated active desiccant rooftop hybrid system development and testing, final report: phase 4: Oak Ridge National Laboratory.
- Fong KF, C. T., Lee CK, Lin Z, Chan LS. . (2010). Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Solar Energy*, 84, 227–244.
- Fumo N, G. D. (2002). Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration. *Solar Energy*, 72, 351–361.

- Gandhidasan, P. (2004). A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant. *Solar Energy* 76, 409–416.
- Gasparella A, L. G., Marra R. . (2005). Combination of ground source heat pump with chemical dehumidification air. *Applied Thermal Engineering*, 25, 295-308.
- GCEP. (2011). Global climate and energy project Retrieved 12 de Junio, 2012, from <http://gcep.stanford.edu>
- Ge TS, L. Y., Wang RZ, Dai YJ. (2008). A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1485–1528.
- Ge TS, L. Y., Wang RZ, Dai YJ. . (2009). Experimental study on a two-stage rotary desiccant cooling system. . *International Journal of Refrigeration* 32, 498–508.
- Ghaddar N, G. K., Najm A. . (2003). Use of desiccant dehumidification to improve energy utilization in air-conditioning systems in Beirut. *International Journal of Energy Research* 27, 1317–1338.
- Ghali, K. (2008). Energy savings potential of a hybrid desiccant dehumidification air conditioning system in Beirut. *Energy Conversion and Management*, 49(11), 3387–3390.
- Glav, B. (1966). USA Patent No.
- Gommed K, G. G. (2004). A liquid desiccant system solar cooling and dehumidification. *Transactions of ASME: Journal of Solar Energy Engineering*, 126, 879–885.
- Gonzalez JC, M.-S. M., Rodriguez-Reinoso F. (2001). Sepiolite-based adsorbents as humidity controller. *Applied Clay Science* 20(3), 111-118.
- Goswami D, T. D., Blocks S. (1997). Photocatalytic disinfection of indoor air. *Transactions of ASME: Journal of Solar Energy Engineering* 119, 92–96.
- Grossman, G. (2002). Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air conditioning. *Solar Energy*, 72, 53-62.
- Grossman G, J. A. (1981). Solar cooling and air conditioning. *Progress in Energy and Combustion Science*, 7, 185–228.
- Halliday SP, B. C., Sleigh PA. . (2003). The use of solar desiccant cooling in the UK: a feasibility study. . *Applied Thermal Engineering*, 22, 1327–1338.
- Hamed, A. (2003). Desorption characteristics of desiccant bed for solar dehumidification/humidification air conditioning systems. *Renewable Energy*, 28, 2099–2111.
- Hao X, Z. G., Chen Y, Zou S, Moschandreas J. . (2007). A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification. *Building and Environment* 42, 3298-3308.
- Henning, H. (2007). Solar assisted air conditioning of building—an overview. *Applied Thermal Engineering* 27, 1734–1749.
- Henning, H., Pagano T, Mola S, Wiemken E. (2007). Micro tri-generation system for indoor air conditioning in the Mediterranean climate. *Applied Thermal Engineering* 27, 2188–2194.
- Henning HM, E. T., Hindenburg C, Santamaria IS. (2001). The potential of solar energy use in desiccant cooling cycles. *International Journal of refrigeration*, 24, 220–229.
- Hirunlabh J, C. R., Khedari J, Teekasap S. (2007). Feasibility study of desiccant air-conditioning system in Thailand. *Building and Environment*, 42, 572–577.
- IEA. (2004, 2006 y 2008). World energy outlook. Paris, France: International Energy Agency.
- IPCC. Special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2008, January 20-25). *Scoping meeting on renewable energy resources*, Lubeck, Germany.

- Jain S, D. P., Kaushik SC. . (1994). Evaluation of liquid desiccant based evaporative cooling cycles for typical hot and humid climates. *Heat and Recovery Systems & CHP*. 14, 621.
- Jia CX, D. Y., Wu JY, Wang RZ. (2006). Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material. *Energy Conversion and Management* 47(15-16):, 2523–2534.
- Joudi KA, M. S. (1987). An experimental investigation into a solar assisted desiccant-evaporative air-conditioning system. *Solar Energy*, 39, 97–107.
- Kabeel, A. (2007). Solar powered air conditioning system using rotary honeycomb desiccant wheel. *Renewable Energy* 32, 1842–1857.
- Kahn JR, F. D. (2006). Beyond Kyoto: a tax-based system for the global reduction of greenhouse gas emissions. *Ecological Economics*, 58, 778.
- Kanoglu M, B. A., Altuntop N. (2007). Effect of ambient conditions on the first and second law performance of an open desiccant cooling process. *Renewable Energy* 32(6), 931–946.
- Katejanekarn T, C. S., Kumar S. . (2009). An experimental study of the solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system. *Solar Energy* 83, 920–933.
- Kessling W, L. E., Kapfhammer C. . (1998). Energy storage for desiccant cooling systems components development. *Solar Energy*, 4–6, 209–221.
- Khalid A, M. M., Asif M, Muneer T. . (2009). Solar assisted, pre-cooled hybrid desiccant cooling system for Pakistan. *Renewable Energy*, 34(1), 151–157.
- Khan AY, M. J. (1998). Modelling and parametric analysis of heat and mass transfer performance of a hybrid liquid desiccant absorber. *Energy Conversion and Management*, 39, 1095–1112.
- Khan N, S. Y., Riffat S. . (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings* 40, 1586–1604.
- Kim DS, I. F. C. (2008). Solar refrigeration options—a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*, 31, 3-15.
- Kinsara AA, A.-R. O., Elyased MM. (1997). Parametric study of an energy efficient air conditioning system using liquid desiccant. *Applied Thermal Engineering* 18, 327–335.
- Kodama A, W. N., Hirose T, Goto M, Okano H. . (2005). Performance of a multipass honeycomb adsorber regenerated by a direct hot water heating. *Adsorption*, 11, 603–608.
- Kribus A, K. D., Mittelman G, Hirshfeld A, Flitsanov Y, Dayan A. (2006). A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, 47, 3582–3590.
- Kuma T, O. H. (1989). USA Patent No.
- Lazzatin RM, G. A., Longo GA. (1999). Chemical dehumidification by liquid desiccants: theory and experiment. *International Journal of Refrigeration*, 22, 334–347.
- Le Treut H, S. R., Cubasch U, Ding Y, Mauritzen C, Mokssit A, et al. (2007). Historical overview of climate change. In Q. D. Solomon S, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Ed.), *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Li Y, S. K., Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ. (2006). Experimental study on a hybrid desiccant dehumidification and air conditioning system. *Journal of Solar Energy Engineering* 128(1), 77–82.

- Li Y, Y. H. (2008). Investigation on solar desiccant dehumidification process for energy conservation of central air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1118-1126.
- Li Z, L. X., Jiang Y, Chen X. (2005). New type of fresh air processor with liquid desiccant total heat recovery. *Energy and Buildings*, 37, 587–593.
- Liu X, L. Z., Jiang Y, Lin B. (2006). Annual performance of liquid desiccant based independent humidity control HVAC system. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1198–1207.
- Liu YF, F. H., Wang RZ. . (2003). Performances comparison of a new composite adsorbent  $\text{SiO}_2\text{---}x\text{H}_2\text{O}\text{---}y\text{CaCl}_2$  and other common adsorbents to extract water from air *Acta Energy Solaris* (Vol. 24(2), pp. 141-144).
- Lowenstein, A. (2008). Review of liquid desiccant technology for HVAC applications. *HVAC and R Research* 14, 819–839.
- Luken R, G. T. (2006). The Montreal protocol’s multilateral fund and sustainable development. *Ecological Economics*, 56, 241.
- Lund, H. (2006). The Kyoto mechanisms and technological innovation. *Energy*, 31, 1989.
- Maclaine-cross, I. (1974). *A theory of combined heat and mass transfer in regenerations*. (PhD), Monash University, Australia.
- Mathiowitz E, J. J., Jong YS, Hekal TM, Spano W, Guemonprez R, et al. (2001). Novel desiccants based on designed polymeric blends. *Journal of Applied Polymer Science* 80(3), 317–327.
- Mavroudaki P, B. C., Sleigh PA, Halliday SP. (2002). The potential for solar powered single-stage desiccant cooling in southern Europe. *Applied Thermal Engineering* 22, 1129–1140.
- Mazzei P, M. F., Palma D. (2005). HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review. *Applied Thermal Engineering*, 25, 677-707.
- Meckler, G. (1989). Two-stage desiccant dehumidification in commercial building HVAC systems. *ASHRAE Transactions* 95(2), 1116–1123.
- Mittelman G, K. A., Dayan A. (2007). Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Energy Conversion and Management*, 48, 2481–2490.
- Nagaya K, S. T., Li Y, Zheng J, Murakami I. . (2006). High energy efficiency desiccant assisted automobile air-conditioner and its temperature and humidity control system. *Applied Thermal Engineering* 26, 1545–1551.
- Nandwani, S. (2006). Uses of solar energy in Costa Rica. *Renewable Energy*, 31, 689–701.
- Niu JL, Z. L., Zuo HG. . (2002). Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 34, 487–495.
- Oliviera AC, A. C., Riffat SB, Doherty PS. (2000). Thermal performance of a novel air conditioning system using a liquid desiccant. *Applied Thermal Engineering*, 20, 1213–1223.
- Pennington, N. (1955). USA, Patent No.
- Pesaran AA, P. T., Czanderna AW. (1992). Desiccant cooling: state of the art assessment. *National Renewable Energy Laboratory*, October, 254-4147.
- Pietruschka D, E. U., Huber M, Schumacher J. (2006). Experimental performance analysis and modeling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings. *International Journal of Refrigeration*, 29, 110–124.
- Russ, C. (2003). Solar energy for hospitals. *Hospital-Workshop*. Retrieved from <http://www.taed.unifi.it/abitaweb/hospital/C.Russ.pdf>

- Saman W, H. E., Krause M. (2007). *Residential application of solar liquid desiccant cooling system in tropical countries of South East Asia*. Paper presented at the International Conference of Solar Air-Conditioning System, Terragona.
- Saman YM, A. S. (2002). An experimental study of a cross-flow type plate heat exchanger for dehumidification cooling. *Solar Energy* 73, 59–71.
- Schinner EN, R. R. (1999). Performance analysis of a combined desiccant/absorption air-conditioning system. *HVAC&R Research* 5(1), 77–84.
- Shaw C, W. D., Reardon J. (2005). Managing volatile organic compounds and indoor air quality in office buildings-an engineering approach. Retrieved from National Research Council of Canada website: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/rr/rr205/rr205.pdf>
- Sheridan JC, M. J. (1985). A hybrid solar desiccant cooling system. *Solar Energy* 34(2), 187–193.
- Silveira JJ, E. A., Penna TJP. (2006). Agent-based model to rural-urban migration analysis. *Physica A*, 364, 445.
- Smith RR, H. C., Dougall RS. . (1994). Modeling of a solar-assisted desiccant air conditioner for a residential building. *Energy* 19, 679–691.
- SMN. (2010). Normales Climáticas de Estaciones Meteorológicas. Retrieved 25 junio 2012, from Sistema Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL14116.TXT>
- Strum M, C. R., Thurman J, Ensley D, Pope A, Palma T, et al. (2006). Projection of hazardous air pollutant emissions to future years. *Science of the Total Environment*, 366, 590–601.
- Subramanyam N, M. M., Murthy SS. (2004). Application of desiccant wheel to control humidity in air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 24(17-18), 2777–2788.
- Sultan GI, H. A., Sultan AA. . (2002). The effect of inlet parameters on the performance of packed tower-regenerator. *Renewable energy* 26, 271–283.
- Thoruwa TFN, J. C., Grant AD, Smith JE. (2000). Novel, low cost CaCl<sub>2</sub> based desiccants for solar crop drying applications. . *Renewable Energy*, 19(4), 513–520.
- Tokarev M, G. L., Romannikov V, Glanzev I, Aristov Yul. (2002). New composite sorbent CaCl<sub>2</sub> in mesopores for sorption cooling/heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 41, 470-474.
- TRNSYS. (2005). TRNSYS Simulation Studio (Version 16.00.0037).
- Tu M, R. C., Zhang LA, Shao JW. . (2009). Simulation and analysis of a novel liquid desiccant air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2417–2425.
- Turner RH, K. J., Chen RF, Chen F. (1988). Evaluation of desiccant assisted thermally activated heat pumps in the U.S. climates. *American Society of Mechanical Engineers Advanced Energy Systems Division (Publication) AES*, 8, 65–71.
- Wang RZ, G. T., Chen CJ, Ma Q, Xiong ZQ. (2009). Solar sorption cooling systems for residential applications: options and guidelines. *International Journal of Refrigeration* 32, 638–660.
- Waugaman DG, K. A., Kettleborough CF. (1993). A review of desiccant cooling systems. *Journal of Energy Resources Technology*, 115(1), 1–8.
- White SD, K. P., Bongs C. . (2009). Indoor temperature variations resulting from solar desiccant cooling in a building without thermal backup. *International Journal of Refrigeration* 32, 695–704.
- Worek WM, Z. W., Belding WA, Novosel D, Holeman WD. (1991). Simulation of advanced gas-fired desiccant systems. *ASHRAE Transactions* 97(2), 609–614.
- Wurm J, K. D., Clemens T. (2002). Solid desiccant technology review. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration*, 82(3), 2–31.



- Xiong ZQ, D. Y., Wang RZ. . (2009). Investigation on a two-stage solar liquid-desiccant (LiBr) dehumidification system assisted by CaCl<sub>2</sub> solution. . *Applied Thermal Engineering* 29, 1209–1215.
- Yin Y, Z. X., Wang G, Luo L. . (2008). Experimental study on a new internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant system. *International Journal of Refrigeration* 31, 857–866.
- Yong L, S. K., Dai YJ, Zhong JH, Wang RZ. (2006). Experimental study on a hybrid desiccant dehumidification and air conditioning system. *Journal of Solar Energy Engineering* 128, 77-82.
- York, R. (2007). Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960–2025. *Social Science Research*, 36, 885.
- Yu BF, H. Z., Liu M, Yang HL, Kong QX, Liu YH. (2009). Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. *International Journal of Refrigeration* 32, 3–20.
- Yuan W, Z. Y., Liu X, Yuan X. (2008). Study of a new modified crosscooled compact solid desiccant dehumidifier. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2257–2266.
- Zain ZM, T., MN, Baki, SMS. (2007). Hot and humid climate: prospect for thermal comfort in residential building. *Desalination* 209:261–208.
- Zhang H, N. J. (1999). Two-stage desiccant cooling system using low-temperature heat. *Building Services Engineering Research and Technology* 20(2), 51–55.
- Zimmermann M, A. H., Hass A. (2005). Benchmarks for sustainable construction a contribution to develop a standard. *Energy and Buildings*, 37, 1147-1157.
- Zurigat YH, A.-A. M., Abdul-Wahab SA. . (2004). Air dehumidification by triethylene glycol desiccant in a packed column. *Energy Conversion and Management*, 45, 141–155.