



Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética

TESIS DOCTORAL

**MODELADO DE SISTEMAS DE DESECANTES
SÓLIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AIRE DE
VENTILACIÓN EN EDIFICIOS.**

Autor: Francisco Fernández Hernández

**Directores: José Manuel Cejudo López
Fernando Domínguez Muñoz**

Málaga, 20 de febrero de 2015



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Francisco Fernández Hernández

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de
Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

Dedicado a

Irene, mi mujer, y Daniel, mi hijo, porque hacen que todo tenga sentido. Su confianza, comprensión, apoyo y cariño también forman parte de este trabajo.

Deseo expresar mi agradecimiento:

A mi familia, que les debo la vida y han hecho que sea la persona que soy.

A mi director, José Manuel Cejudo López, por su confianza, consejo y apoyo durante estos años.

A Antonio Carrillo, Fernando Domínguez y mis compañeros del grupo de investigación, los que están y los que estuvieron, por su inestimable ayuda y compañía.

Al profesor Celestino Ruivo, de la Universidad del Algarve.

A mis amigos, los de aquí y los de allí.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Antecedentes.....	7
1.2. Consideraciones preliminares.....	9
1.3. Estado del arte.....	12
2. RESUMEN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	24
2.1. The optimization of the operation of a solar desiccant air handling unit coupled with a radiant floor.....	24
2.2. Influence of the desiccant wheel effectiveness method approaches, with fix and variable effectiveness parameters, on the performance results of an airport air-conditioning system.....	28
2.3. A new desiccant channel to be integrated in building façades.....	35
3. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	39
4. REFERENCIAS.....	46
5. COPIA DE LOS ARTÍCULOS QUE AVALAN LA TESIS.....	52

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

La tesis doctoral está realizada en formato de compendio de artículos. El estudio que se presenta se basa en el trabajo de tres artículos publicados en revistas indexadas y que se incluyen en el último capítulo.

La investigación llevada a cabo consiste en un análisis de los sistemas de tratamiento de aire exterior de ventilación en edificios, que utilizan desecantes sólidos para controlar la humedad de la zona. Principalmente con nuevas aportaciones tanto en el modelado de la rueda desecante, como en el diseño de estrategias de control óptimas desde el punto de vista del consumo de energía. Además, otra aportación importante es el diseño de un nuevo sistema de tratamiento de aire de ventilación con desecantes sólidos, que contribuye en el objetivo de la búsqueda de sistemas de climatización más eficientes.

A continuación se expone la organización del presente documento.

Inicialmente se presenta la problemática del alto consumo de energía que existe en los edificios debido a la climatización y a la necesidad de la presencia de sistemas de climatización que garanticen el confort térmico de los ocupantes de la zona. Como solución, se propone el estudio de un sistema de tratamiento de aire con desecantes sólidos.

Se realiza una revisión del estado del conocimiento de esta tecnología: el tipo de material desecante utilizado, el modelado de la rueda desecante, el tipo de ciclo de refrigeración, el acoplamiento con la unidad terminal (en este caso, el suelo radiante), las posibilidades de los sistemas de producción, la importancia del sistema de control, y unos ejemplos de aplicaciones en casos reales. La revisión del estado del arte permite valorar las causas que han llevado a realizar este estudio y determinar los objetivos principales de la tesis.

En el capítulo 2 se expone el resumen de los resultados más importantes de los tres artículos y la discusión de éstos. En el capítulo 3 se enumeran las conclusiones y aportaciones más relevantes a las que se ha llegado tras el estudio. Además, se detalla el

trabajo futuro relacionado con esta tesis. En el capítulo 4 se especifican las referencias utilizadas en este resumen. Aparte de éstas, cada artículo tiene sus referencias propias. Finalmente, en el capítulo 5 se adjuntan los tres artículos que avalan esta tesis. Son los siguientes:

- **Artículo 1.**

The optimization of the operation of a solar desiccant air handling unit coupled with a radiant floor.

José Manuel Cejudo López, Francisco Fernández Hernández, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 62 (2013) 427-435.

- **Artículo 2.**

Influence of the desiccant wheel effectiveness method approaches, with fix and variable effectiveness parameters, on the performance results of an airport air-conditioning system.

Celestino R. Ruivo, Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López.

Energy Conversion and Management 94 (2015) 458-471.

- **Artículo 3.**

A new desiccant channel to be integrated in building façades.

Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 86 (2015) 318-327.

1.2.Consideraciones preliminares.

En la sociedad actual, el mantenimiento de las economías de los países tiene una total dependencia de los combustibles fósiles. La perspectiva futura del agotamiento de los mismos, así como la contaminación atmosférica y el calentamiento global, son algunos de los principales problemas a los que se enfrenta el ser humano en los próximos años.

En particular, uno de los sectores que más ha aumentado su consumo energético es el sector de la edificación (el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios [1]). El aumento de las ganancias térmicas y las exigencias por parte de los ocupantes de los edificios de alcanzar los requisitos de confort, son dos de los factores más importantes que han contribuido al incremento masivo de los equipos de climatización, sobre todo de aire acondicionado en los meses de verano. Este hecho constituye especialmente un problema en zonas que reciben a millones de turistas en la época de verano, lo que provoca un problema de demanda de electricidad.

Las normativas europeas [2] y españolas [3] están estableciendo unos planes para conseguir reducir el consumo de energía en los edificios. Los medios para reducir el consumo de energía en un edificio son:

1. Reducir la demanda de climatización mediante medidas de eficiencia energética, como: la mejora del aislamiento térmico, técnicas de sombreado en fachadas con alta ganancia térmica por radiación solar, control de infiltraciones, etc.
2. Proponer nuevos sistemas de climatización o mejorar los rendimientos de los sistemas existentes.
3. La incorporación de energías renovables que permitan evitar el uso de combustibles fósiles.

Este estudio se centra en los puntos 2 y 3. El objetivo es el análisis de un sistema de climatización eficiente, que sustituya a los sistemas convencionales basados en ciclos de compresión, garantice una disminución del consumo de energía y, además, incorpore el uso de energías renovables, en particular la energía solar.

Asimismo, es muy importante que un sistema de climatización garantice las condiciones de confort de los ocupantes de la zona. Los parámetros de confort más importantes son: la temperatura, la humedad y la calidad del aire interior. Los sistemas convencionales de aire acondicionado son capaces de combatir la carga sensible (variación de la temperatura) y la carga latente (disminución del contenido de agua), aunque en la mayoría de los casos la humedad no está controlada directamente por el sistema. En el proceso de combatir la carga sensible, el aire es enfriado por debajo de su temperatura de rocío y, de forma incontrolada, condensa parte de la humedad contenida en el aire, produciendo la deshumidificación. Por lo tanto, la carga latente combatida por la batería de frío depende directamente de la carga sensible, en particular, del factor sensible de la batería (definido como el cociente entre la carga sensible y la carga total que combate). Los parámetros geométricos y de operación de la batería van a condicionar el factor de calor sensible, cuya variación en carga parcial va a provocar situaciones en la zona de baja humedad (sequedad en las mucosas y discomfort) o de una humedad muy elevada (aumento de la sudoración para compensar la baja tasa de evaporación).

Las causas más comunes de variación de la humedad en la zona son: el aire exterior de ventilación y las ganancias internas. La ventilación de los espacios ocupados es necesaria para garantizar la calidad del aire interior por la dilución de la concentración de contaminantes en la zona. En edificios con altas ganancias internas (estaciones, museos, aeropuertos, salones de actos, etc.), y situados en climas húmedos, como el área del mediterráneo o climas tropicales, se produce un aumento indeseado de la humedad de la zona muy importante. Por un lado, la evaporación del sudor de la piel y la respiración de las personas aumentan la carga latente. Además, la concentración de contaminantes es muy elevada, por lo que se requiere un alto caudal de ventilación que renueve el aire de la zona, que si no se introduce en condiciones neutras, aporta más humedad al ambiente. En esta situación, el control exclusivo de la temperatura no va a permitir que se alcancen las condiciones de confort, y es fundamental el control de la humedad. Además, al encontrarse en climas templados, en muchas horas del día la temperatura exterior suele ser muy cercana o está un poco por debajo de la temperatura de confort (situación de baja carga sensible y alta carga latente). Sin embargo, los sistemas convencionales sin control de humedad suelen

bajar la temperatura de consigna para compensar el aumento de humedad, lo que provoca que el consumo de energía aumente. Por lo tanto, se puede concluir que, en espacios ocupados en los que los niveles de humedad sean importantes, los sistemas convencionales sin control de humedad pueden tener un alto consumo de energía y no garantizar el confort térmico.

Como solución a este problema, el desarrollo de sistemas que puedan controlar la carga sensible y latente de la zona por separado es muy interesante. Especialmente en climas húmedos y con ganancias internas elevadas, y en zonas que requieran niveles estrechos y definidos de humedad como: hospitales, laboratorios, museos, industrias con componentes electrónicos, etc. Una opción para desacoplar el tratamiento de la carga sensible y latente es el uso de materiales desecantes, que son sustancias higroscópicas capaces de atraer la humedad del aire. Los desecantes pueden ser sólidos o líquidos. El presente estudio se centra en los desecantes sólidos, ya que aunque es una línea de investigación madura y existen aplicaciones actualmente en el mercado, no se han extendido en la climatización.

Los desecantes sólidos se pueden incluir en unidades de tratamiento de aire (UTA). La disposición más común que adoptan es confinados en un rotor cilíndrico. A este sistema se le llama sistema de refrigeración desecante en ciclo abierto. El proceso implica que el aire exterior pasa por la rueda desecante y éste se deshumecta y se calienta, debido a que en el proceso de sorción se libera una energía denominada calor de adsorción. Como el objetivo es refrigerar, existen otros dispositivos en la UTA capaces de disminuir la temperatura del aire y llevarlas a las condiciones de impulsión requeridas, como son: un intercambiador sensible rotativo, una batería de frío o los enfriadores evaporativos. En la figura 1 se muestra un esquema del sistema.

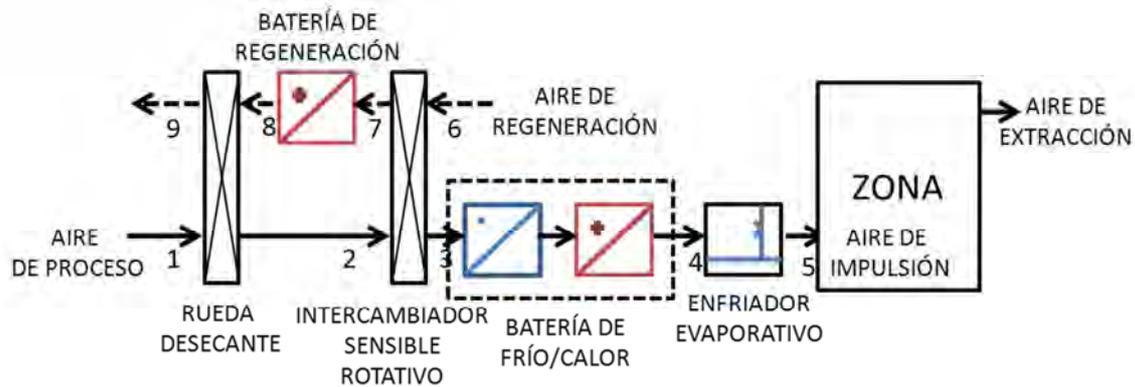


Figura 1. Esquema de la UTA desecante.

A su vez, el desecante debe ser regenerado, calentarlo para que parte de la humedad que contiene se evapore y se vuelva a iniciar el proceso de adsorción. La regeneración se lleva a cabo con aire caliente a partir de 50-60°C, lo suficientemente bajo para que el calor lo proporcione un colector solar plano, por lo que el uso de energía solar es una opción muy interesante en este tipo de sistemas. En este caso, el sistema se denomina sistema de refrigeración solar en ciclo abierto.

1.3.Estado del arte.

Hasta la fecha existen diversas líneas de investigación sobre los sistemas de refrigeración con desecantes sólidos. Las más importantes son:

- El tipo de desecante sólido.
- El modelado de la rueda desecante.
- El tipo de ciclo de refrigeración.
- El acoplamiento con una unidad terminal que actúe como sistema de climatización.
- La regeneración de la rueda desecante.
- La estrategia de control en la UTA.
- Las aplicaciones de una UTA desecante en climatización de edificios.

A continuación se describe el estado del arte en cada una de estas líneas de investigación.

El tipo de desecante.

Inicialmente la primera cuestión que surge es la elección del material desecante. Un buen material desecante debe tener una gran capacidad de adsorción y una gran habilidad para regenerarse. Los desecantes sólidos más comunes son: la sílica gel, la zeolita, las sales de cloruro de litio, el tamiz molecular, el carbón y la alúmina activada. Los dos primeros son los desecantes sólidos más comunes utilizados en las ruedas desecantes. En especial la sílica gel, debido a su bajo coste y su baja temperatura de regeneración [4], ha sido estudiada en gran cantidad de trabajos a lo largo de décadas, lo que permite disponer de una documentación exhaustiva de sus propiedades. Pesaran [5] fue un precursor en estas investigaciones mediante un estudio teórico y experimental de la sílica-gel que analiza su respuesta dinámica frente a diferentes condiciones de entrada. También es muy importante analizar la influencia de las propiedades de adsorción del desecante en la capacidad de refrigeración y el COP del ciclo refrigerante, tal y como lo refleja Collier [6], que agrupa a los desecantes en cinco grupos caracterizándolos por sus curvas isotermas de adsorción, a partir de un análisis paramétrico. Entre los más recientes, Zhang [7] compara el COP de una rueda desecante con diez materiales desecantes diferentes sometidos a diferentes condiciones de temperatura y humedad del aire de entrada y de regeneración, en el que la sílica gel RD (el desecante utilizado en esta tesis) obtiene los mejores resultados.

El modelado de la rueda desecante.

Para el análisis y evaluación de la rueda desecante, los modelos matemáticos utilizados se basan en modelar el proceso físico mediante las ecuaciones de transferencia de calor y masa que tienen lugar entre el aire y el material desecante. Es importante saber que el modelado físico de la rueda desecante es un problema transitorio y en tres dimensiones, en el que están acoplados los mecanismos de transferencia de calor y de masa, por lo que su resolución es muy compleja, ya que las ecuaciones diferenciales se tienen que resolver por métodos numéricos. Ruivo [8] plantea un modelo detallado para modelar el comportamiento del paso del aire a través de un canal en la rueda desecante, en el que las ecuaciones diferenciales se resuelven mediante volúmenes finitos. Cejudo [9], sin embargo, aplica el método de las diferencias finitas para resolverlas y lo compara con un modelo basado en redes neuronales, que utiliza un modelo de caja negra que simula exactamente el

funcionamiento de una rueda real a partir de datos experimentales del aire de salida para diferentes condiciones de entrada.

Desde el punto de vista práctico, es necesario que la rueda desecante se pueda modelar integrada en la unidad de tratamiento de aire, y que ésta se simule con una unidad terminal determinada y con el sistema de producción térmico, para que, finalmente, pueda interactuar con el edificio. Los modelos detallados de rueda desecante conllevan un alto coste computacional, por lo que no es viable su integración en programas de simulación de sistemas termoenergéticos en edificios. Para ello, se recurre a los modelos simplificados, que se obtienen a partir de simplificaciones en las ecuaciones diferenciales, despreciando términos que puedan tener poca influencia en el proceso físico. Ge [10] realiza una revisión de los modelos de ruedas desecantes. Propone una clasificación de modelos simplificados en función de si se desprecia la difusión de masa y la transferencia de calor en el desecante sólido en dirección axial (modelo GSR) o si se tienen en cuenta ambos procesos (modelo GSSR). De Antonellis [11] usa un modelo GSR y estudia la configuración de diferentes unidades de tratamiento de aire y el consumo de energía primaria con respecto a un sistema convencional. Por su parte, Tu [12] estima el comportamiento de la rueda mediante un modelo GSSR y lo compara con unos resultados experimentales para analizar el rendimiento de un sistema desecante multietapa. Otros autores plantean modelos simplificados que se obtienen mediante el desarrollo de relaciones empíricas, a partir de resultados experimentales. Ghazal [13] plantea un modelo de caja negra con coeficientes de transferencia térmica en ruedas desecantes, obtenidos a partir de experimentación. De igual manera, Sheng [14] propone un método basado en una regresión lineal simple con valores de datos experimentales para simular el rendimiento de una rueda desecante. Del mismo modo, los modelos empíricos se pueden desarrollar a través de la simulación de modelos detallados, o a partir del software que proporciona el fabricante de la rueda desecante. En esta línea, El-Agouz [15] analiza el rendimiento de un sistema desecante, cuya fuente térmica es la energía geotérmica, en diferentes situaciones climáticas, a partir de correlaciones obtenidas por un modelo detallado desarrollado por Heidarinejad [16] que aplica el método de volúmenes finitos y lo valida a partir de los experimentos realizados por Kodama [17]. Análogamente, Ruivo [18] realiza un análisis del rendimiento de la rueda

en función de la velocidad de rotación, a partir de relaciones empíricas basadas en datos experimentales y los datos obtenidos mediante el software de un fabricante de ruedas. Afirma que el software tiene limitaciones porque proporciona resultados de temperatura del aire de salida más bajos y de humedad de salida más altos que los obtenidos en el ensayo experimental.

De modo similar a los modelos simplificados obtenidos mediante relaciones empíricas, existen otros modelos muy utilizados en la literatura, que se basan en el método de la analogía. Se modela el proceso de deshumidificación que tiene lugar en la rueda desecante (combinación de transferencia de masa y calor) en analogía con un simple proceso de transferencia de calor que tendría lugar en un intercambiador de calor. Esta analogía se expresa en función de dos variables, denominados potenciales, que representan la transferencia de calor y de masa entre el aire que circula por el canal y el desecante de la rueda. A partir de éstos se obtienen valores de efectividad. Uno de los modelos simplificados basados en efectividad constante que más se usa para modelar ruedas desecantes es el modelo de Jurinak [19], que utiliza los valores potenciales F_1 y F_2 para la sílica gel, y que son modificados por las no idealidades en el sistema mediante el uso de valores de efectividad constante Ef_1 y Ef_2 , como propone Maclaine-Cross y Banks [20]. Este modelo es el que se encuentra en la librería de Trnsys [21], el programa de simulación que se utiliza en esta tesis para la simulación de los sistemas, además de ser usado por numerosos autores en estudios relevantes, como el de Panaras [22], Zhang [23] o Angrisani [24]. El par de efectividades Ef_1 y Ef_2 son valores que se fijan en función del rendimiento de la rueda. Panaras [25] establece valores de Ef_1 y Ef_2 en función de que la rueda sea de alto, moderado o bajo rendimiento. Este modelo es el que se ha utilizado en el primer artículo que avala esta tesis.

Sin embargo, estudios recientes (y posteriores al primer artículo de esta tesis) de Ruivo [26] han cuestionado el uso de modelos de ruedas desecantes de efectividad constante, ya que se ha demostrado que el rendimiento de la rueda desecante varía en función de las condiciones de operación: temperatura, humedad y velocidad del aire de proceso. Aunque en Panaras [22] o Angrisani [24] aporten resultados experimentales que validen el modelo de rueda con parámetros de efectividad constante, los rangos de los parámetros de operación que han

utilizado (condiciones de entrada y velocidad del aire) no se pueden considerar lo suficientemente amplios para cubrir todo el rango de operación que se da en la práctica. Por este motivo, en el segundo artículo que avala esta tesis se propone una modificación del modelo de rueda de efectividad constante, por un modelo de rueda de efectividad variable. El par de efectividades E_{f1} y E_{f2} se sustituye por otro par que es función de la entalpía y de la humedad relativa del aire, E_{fh} y $E_{f\psi}$, respectivamente. Finalmente, se aplica un método de interpolación (Ruivo [27]) para tener las efectividades en función de la temperatura, humedad y velocidad del aire.

La unidad de tratamiento de aire. El ciclo de refrigeración.

Tal y cómo se ha comentado previamente, es necesario que la rueda desecante se integre en la unidad de tratamiento de aire con los otros dispositivos necesarios para la refrigeración. En función de los dispositivos presentes y del orden en el que se encuentre en la unidad, se consideran diferentes ciclos de refrigeración, que se describen mediante la evolución del aire en el diagrama psicrométrico. El sistema de refrigeración solar desarrollado en esta tesis y la evolución del aire de ventilación en el diagrama psicrométrico se muestra en la figura 2.

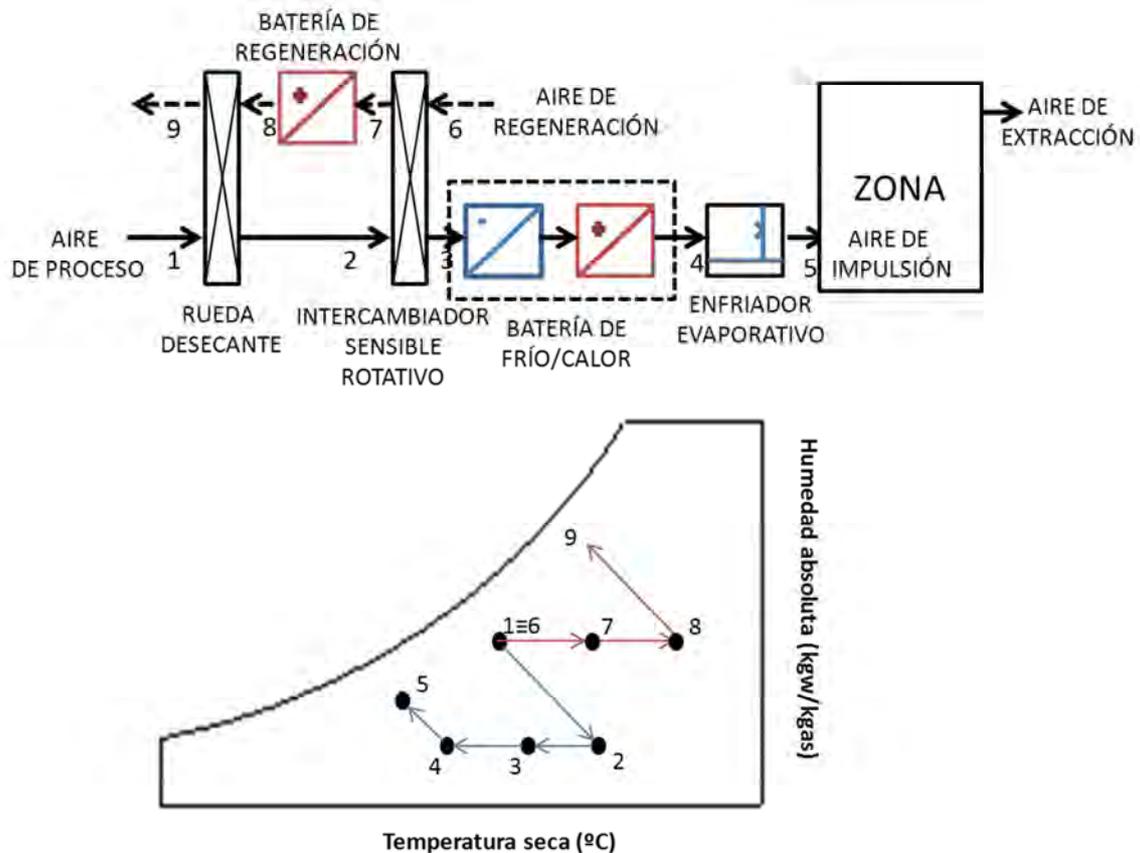


Figura 2. Esquema del sistema de refrigeración solar en ciclo abierto. Representación en el diagrama psicrométrico del aire de proceso de ventilación y regeneración.

El sistema de ventilación consta de dos ramas de tratamiento de aire: la rama de proceso y la rama de regeneración. En la rama de proceso se toma aire del exterior (1) y entra en contacto con la rueda desecante, que mediante un proceso de sorción provoca la disminución de humedad y el aumento de la temperatura del aire. El aire caliente y seco (2) es enfriado en el intercambiador sensible de tipo rotativo, saliendo en las condiciones dadas en (3), donde se introduce en la batería de frío (o batería de calor), cuyo objetivo es el de disminuir (o aumentar) la temperatura del aire. Posteriormente (4), se utiliza un sistema de enfriamiento evaporativo que disminuye la temperatura del aire a costa de ganar humedad, hasta llevarlo a unas condiciones dadas en el punto (5), donde se impulsa al edificio.

En la rama de regeneración se toma el aire del exterior (6) y se usa como foco frío en el intercambiador rotativo sensible para enfriar el aire de proceso a la salida de la rueda desecante. A la salida (7), el aire es necesario que se caliente y alcance la temperatura de regeneración requerida para evaporar el agua adsorbida por la rueda desecante. Para ello se pasa por una batería de calor (batería de regeneración), donde el agua que circula por los tubos puede ser calentada mediante energía solar, combustible o una combinación de éstos. El aire a la entrada de la rueda (8) se encuentra a la temperatura de regeneración y pasa a través del rotor desecante siendo descargado a la atmósfera (9) con una temperatura menor y una humedad mayor que en (8).

Este sistema se basa en el ciclo de Pennington [28] o de ventilación, con la diferencia de que el aire de la rama de regeneración se toma del exterior y no del aire de extracción de la zona. El ciclo de Pennington es el que está más presente en la mayoría de los estudios de investigación de sistemas de refrigeración solar en ciclo abierto, como el de Heidarinejad [16] que desarrolló un modelo para evaluar el comportamiento de un ciclo de Pennington con cuatro modos de operación diferentes, en función de la proporción de aire exterior o de retorno de la zona en las ramas de proceso y regeneración. D. La [29] realiza una revisión de diferentes tipos de ciclos de refrigeración. Además del ciclo de Pennington, destacan el ciclo de recirculación (modificación del ciclo de Pennington) y el ciclo de Dunkle [30], en el que el aire de proceso se toma del interior de la zona y, debido a que su temperatura y humedad es más baja que el exterior, el rendimiento del ciclo va a ser más elevado. Sin embargo, estos ciclos se han descartado para el presente estudio debido a que uno de los requisitos principales de confort es la eliminación de contaminantes de la zona mediante el aire exterior, además de requerir una red de retorno hasta la UTA.

El acoplamiento con el suelo radiante.

En general, los sistemas de tratamiento de aire exterior suelen ir combinados con unidades terminales que se encargan de la climatización de la zona. Un sistema interesante es la climatización por suelo radiante. Es el sistema que se ha propuesto en este estudio.

La calefacción por suelo radiante es un sistema muy extendido en climas fríos. Sin embargo, en las últimas décadas, se está empezando a utilizar también como sistema de refrigeración. Las ventajas de este sistemas en términos de confort y consumo de energía han sido demostrados por ASHRAE [31], y Feustel [32], que afirma que un suelo radiante frío puede suponer un ahorro de energía eléctrica del 40% frente a un sistema convencional de aire, basado en su investigación en edificios industriales. Un suelo radiante es una red de tuberías embebidas en la superficie por donde circula agua caliente (el suelo emite calor) o fría (el suelo es un sumidero de energía), según se utilice el sistema para calefacción o refrigeración, respectivamente. En la figura 3 se muestra un esquema de un suelo radiante (F.J. Rey [33]).

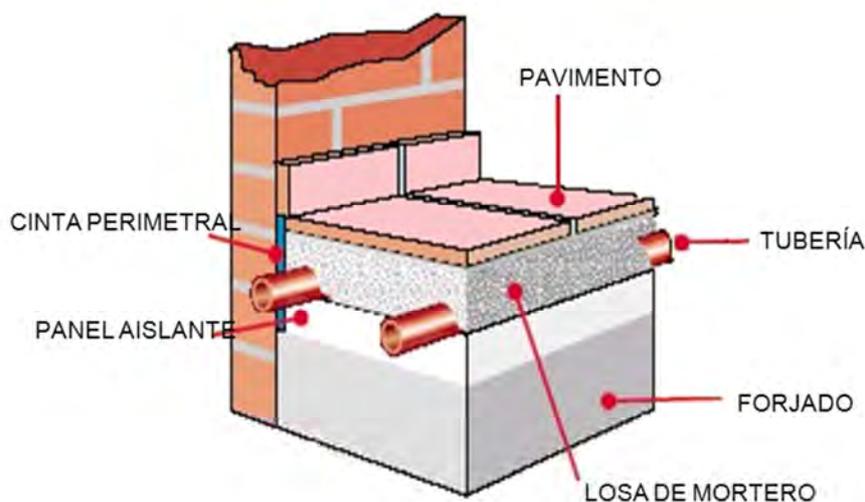


Figura 3. Esquema de un suelo radiante.

Es un sistema que se basa en la radiación como mecanismo de transferencia de calor, es decir, no emplea el aire como elemento transmisor. Requiere un sistema de ventilación que suministre el aire exterior requerido por la normativa [34-35] y que, además, combata la carga latente de la zona. Debido al riesgo de condensación en la superficie, la temperatura de la superficie del suelo siempre debe estar por encima de la temperatura de rocío (en condiciones normales no suele ser inferior a 19-20°C), por lo que la capacidad de refrigeración del suelo suele estar limitada a 40-50 W/m². Otro gran inconveniente de este sistema es que los materiales constructivos tienen una elevada inercia térmica, lo que hace

que el sistema sea lento frente a picos de demanda de refrigeración y obliga a que las horas de funcionamiento sean elevadas. Una UTA desecante en combinación con un suelo radiante soluciona estos problemas. En los meses de verano con cargas térmicas elevadas, en los que el suelo no sea capaz de satisfacer toda la carga de refrigeración, la UTA va a combatir no sólo la carga de ventilación, sino también la carga latente y la parte de carga sensible de la zona que no es capaz de combatir el suelo. De esta manera el sistema es capaz de responder de forma rápida a las necesidades de refrigeración de la zona. La impulsión de aire seco tratado por la rueda desecante aumenta la temperatura de rocío y disminuye el riesgo de condensación en el suelo, lo que permite a éste tener mayor capacidad de refrigeración y combatir una mayor carga sensible. Zhao [36] demuestra el aumento de la capacidad del suelo frío cuando una alta radiación solar directa incide directamente sobre él. La capacidad pasa de 35-40 W/m² en edificaciones comunes hasta 60-120 W/m². Estos resultados hacen muy interesante la aplicación de este sistema en grandes edificios con superficies acristaladas, donde la ganancia radiante debida a la radiación solar sea importante.

Los sistemas de suelo frío combinados con una UTA desecante han sido estudiados previamente. Kessler [37] describe la aplicación de este tipo de sistema en el nuevo aeropuerto internacional de Bangkok, cuyo clima se caracteriza por ser muy húmedo, por lo que el control de la humedad del aire es un objetivo importante. Koschenz [38] propone un modelo de suelo radiante, acoplado con un sistema de ventilación con desecantes para simular un caso real; el nuevo hall de un edificio de exposición en la feria de Zurich. No obstante, el estudio de Fong [39] es de los más importantes para justificar la combinación de una UTA desecante con un suelo radiante frío. En recintos como aeropuertos, salones de actos, estaciones, etc., de grandes alturas (volúmenes de aire tratado muy elevados) y ganancias internas importantes, la ventilación por desplazamiento supone una importante ventaja frente a la ventilación por mezcla en términos de consumo de energía. La ventilación por desplazamiento sólo climatiza la zona de ocupación (en lugar de tener que climatizar todo el aire del recinto) mediante el suministro del aire a nivel de suelo o muy cerca del mismo, a baja velocidad y a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de confort de la zona. Este aire frío impulsado desplaza al aire caliente del recinto, alcanza

a las personas, que son fuentes de calor, y se crean corrientes de convección ascendentes que arrastran el aire caliente y los contaminantes al nivel del techo, de donde son extraídos. El resultado es una estratificación favorable de temperaturas, con una zona de confort en el nivel de ocupación, y a partir de una determinada altura, una zona de aire caliente y con alta concentración de contaminantes. Estudios recientes realizados por el Grupo de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga (A. Fernández [40]) confirman la influencia positiva del suelo frío en el desplazamiento del aire de ventilación, lo que permite al aire tener un mayor alcance en la zona.

Regeneración de la rueda desecante.

Para la regeneración de la rueda es necesaria una fuente térmica que sea capaz de aportar el calor necesario para calentar el aire de regeneración hasta un mínimo de 50-60°C. Hay diferentes tipos de sistemas utilizados en muchos estudios. Lee [41] estudia la aplicación de un sistema desecante en supermercados de Hong Kong donde la energía para regenerar la rueda es mediante gas o electricidad. Mavroudaki [42] realiza la simulación del sistema desecante en edificios de oficinas en el sur de Europa y demuestra el interés de la energía solar en la regeneración de la rueda si la humedad del aire exterior no es muy elevada.

En la figura 4 se muestra el esquema completo de la instalación. Se propone un sistema de energía solar que proporciona agua caliente a la batería de regeneración para calentar el aire que se encarga de regenerar la rueda desecante, en combinación con una batería de calor para calentar el aire de proceso en la época de invierno. Dispone de un depósito de agua para que amortigüe las oscilaciones de la producción solar. Si la demanda de regeneración es mayor que la energía solar disponible, la batería incorpora una resistencia eléctrica para que cubra el aporte de calor adicional. Las necesidades de agua fría en la batería de frío y en el suelo radiante las aporta la bomba de calor.

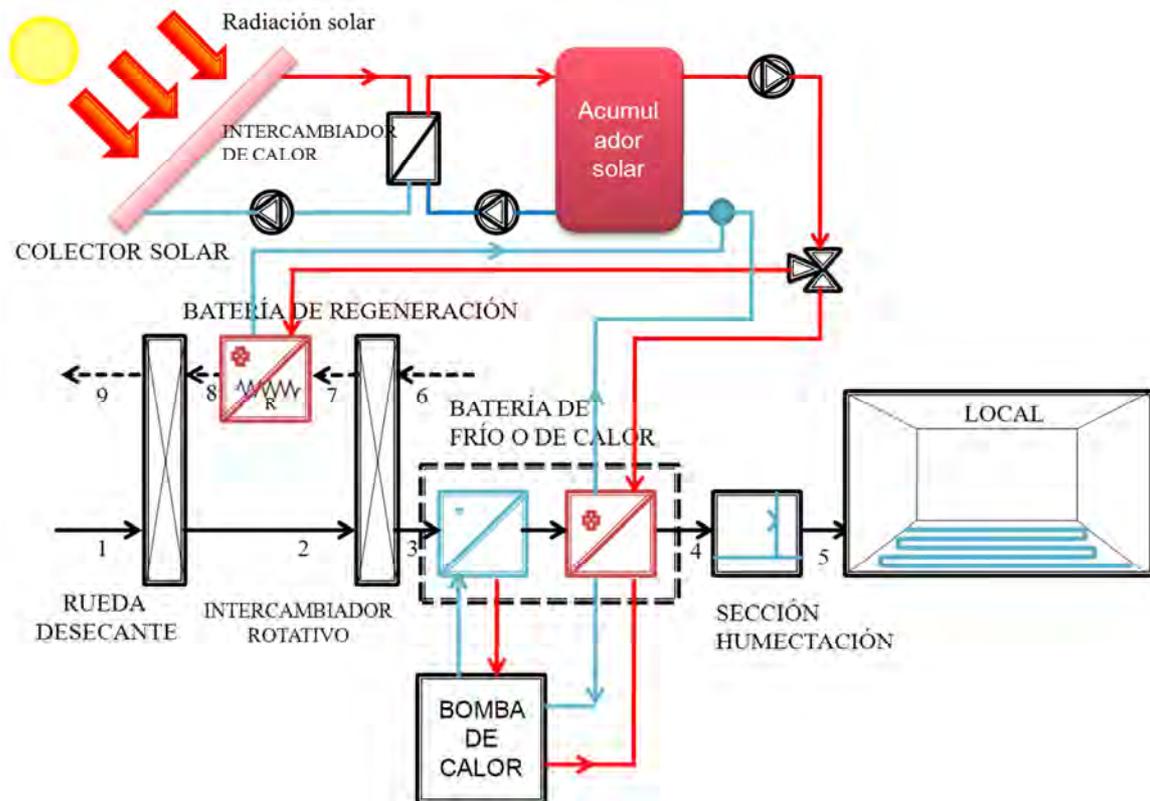


Figura 4. Esquema del sistema de ventilación con desecantes, el suelo radiante y las unidades de producción de agua fría y caliente.

Estrategia de control en la UTA.

El diseño y operación de un ciclo de enfriamiento desecante no suele ser una tarea sencilla, más aún si se combina con un sistema de suelo radiante de refrigeración y el acoplamiento con los sistemas de producción. Es muy importante, una vez que estén los dispositivos de la unidad de tratamiento de aire integrados, el diseño de un sistema de control que tenga como objetivo minimizar el consumo de energía, potenciando el uso de la energía solar, y manteniendo en todo instante las condiciones de confort de temperatura y humedad en la zona. Song [43] propone un algoritmo de control de un suelo radiante frío combinado con una ventilación con deshumidificación. A través de la experimentación y la simulación, demuestra que el aire impulsado a la zona, tras la deshumidificación, soluciona el problema de condensación en la superficie del suelo frío, mejora la respuesta del sistema frente a cambios de las ganancias internas, y se alcanzan las condiciones de confort. Ginestet [44] y

Nobrega [45] proponen una herramienta gráfica para la operación de un sistema desecante con refrigeración. Sin embargo, ninguno de los trabajos citados son capaces de demostrar la optimización de la estrategia de control en términos de consumo de energía, ni de aportar datos en el mismo instante de la contribución solar en la regeneración del desecante y la aportación de la batería de calor convencional. Por este motivo, el principal objetivo del primer artículo que avala esta tesis, es el diseño de la operación de una compleja UTA desecante combinada con un suelo radiante para calefacción y refrigeración, que solucione estas deficiencias.

Aplicaciones de sistemas de refrigeración solar con desecantes sólidos.

En esta línea se demuestra el interés de estudio de esta tecnología con una serie de ejemplos de aplicaciones prácticas en edificios en todo el mundo. Recientemente, Ge [46] ha realizado una revisión los estudios más significativos de sistemas de refrigeración solar en ciclo abierto. Los clasifica en función de si el sistema de producción es exclusivamente por energía solar o es híbrido, en el que intervienen la energía solar y una máquina de compresión de vapor. Estos son algunos de ellos: Halliday [47] estudia la viabilidad de una UTA desecante en la zona sureste y este de Inglaterra y en el centro de Escocia. Para ello utiliza un modelo simplificado de rueda desecante que se valida mediante un ensayo experimental. El objetivo es cuantificar el ahorro de energía si la fuente térmica es la energía solar. Baniyounes [48] realiza una comparativa de una UTA desecante con una convencional para un edificio institucional situado en una zona subtropical de Australia. La simulación se lleva a cabo en Trnsys, con el modelo de rueda de Jurinak de efectividad constante. Niu [49] también usa este modelo de rueda para simular una UTA desecante combinada con un sistema de techo radiante frío en un edificio de oficinas de Hong Kong. Como conclusión a los más de 40 estudios analizados destaca el hecho de que no existen apenas estudios de un sistema desecante acoplado con un suelo radiante para refrigeración. Además, en muchas de estas simulaciones el control de la operación del sistema desecante es un control simple. El autor acentúa la necesidad de que se establezcan sistemas de control más complejos y exhaustivos que integren los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de todo el sistema.

2. RESUMEN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Se presenta un resumen y la discusión de los resultados globales para cada artículo que avala esta tesis.

2.1.The optimization of the operation of a solar desiccant air handling unit coupled with a radiant floor.

José Manuel Cejudo López, Francisco Fernández Hernández, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 62 (2013) 427-435.

El artículo analiza un sistema de tratamiento de aire exterior complementado con un suelo radiante para el acondicionamiento de recintos de grandes volúmenes. Para ello se emplea un sistema de refrigeración solar en ciclo abierto, donde el desecante va a permitir controlar la carga sensible y latente por separado.

El edificio, la unidad de tratamiento de aire, el suelo radiante y los sistemas de producción de agua caliente y fría se modelan mediante Trnsys 16. La integración de todos los subsistemas y su interacción con el edificio permiten realizar la simulación en conjunto y obtener los resultados deseados.

Las aportaciones de este artículo son:

- El modelado de la UTA desecante que incluye el modelado de los diferentes equipos que la componen: la rueda desecante, el intercambiador sensible rotativo, la batería de frío o calor, el enfriador evaporativo y la batería de regeneración.
- El diseño de la estrategia de control óptima para obtener el modo de operación que menor consumo de energía tenga lugar en el sistema, satisfaciendo las condiciones de confort de los ocupantes de la zona.

El caso de estudio propuesto es la simulación en la terminal T3 del aeropuerto de Málaga, para la que se imponen condiciones exteriores correspondientes a un clima húmedo (Málaga) y un clima seco (Madrid). Los resultados obtenidos son:

- Operación de la UTA desecante para un día característico de verano en función de las condiciones climáticas.
- Operación anual de la UTA desecante en función de las condiciones climáticas.
- Regeneración de la rueda desecante. Aportación de energía solar.
- Rendimiento de la UTA desecante y un sistema convencional.
- Capacidad de calefacción y refrigeración de la UTA desecante y el sistema convencional.

A continuación se muestra un resumen de estos resultados:

- 1) Análisis de la operación de la UTA desecante de caudal de aire variable, para un día característico de verano.

Se elige un día de agosto y se representa, para cada hora, en Málaga y Madrid, las condiciones de temperatura y humedad del aire exterior, del aire de impulsión y del aire de la zona, además del modo de operación.

En Málaga el modo de operación que predomina en las horas más calurosas del día es aquel en el que están activas la rueda desecante y la batería de frío. El aire exterior se deshumecta en la rueda y se calienta y, posteriormente, el intercambiador sensible y la batería de frío reducen su temperatura de forma sensible hasta alcanzar el punto de impulsión requerido a la zona. La batería de frío entra en funcionamiento porque es necesario un enfriamiento adicional tras enfriarse en el intercambiador sensible rotativo.

Durante la noche, la temperatura exterior está por debajo de la temperatura de la zona. Además, la carga sensible es baja, por lo que se activa el modo de enfriamiento gratuito. A partir de las 6 de la mañana, en el que empiezan los primeros vuelos, se siguen dando las condiciones para el enfriamiento gratuito, sin embargo, la humedad resultante de la zona

estaría fuera de los límites de confort, por lo que se activa el modo en el que la batería de frío, en el modo convencional de operación, es capaz de disminuir 1°C la temperatura exterior y deshumectar por debajo de 1 gw/kgas.

Los resultados en Madrid son diferentes a los obtenidos en Málaga. La principal diferencia es la humedad del aire exterior, que es aproximadamente 5 gw/kgas más seco. Por este motivo, el potencial de uso de la rueda desecante se reduce. Durante la noche, la temperatura exterior en Madrid es inferior a 21°C, lo que permite activar el modo de enfriamiento gratuito. En las horas del día, la temperatura aumenta hasta los 33°C, y los modos de operación predominantes son los que usan la batería de frío y el enfriador evaporativo. En este último se utiliza la efectividad del enfriador evaporativo para alcanzar las condiciones de impulsión de la zona. Sólo al final de la noche es necesario el uso de la rueda desecante.

Tanto en Málaga como en Madrid existe continuidad en la operación de las diferentes secciones de la UTA, evitando ciclos cortos de encendido-apagado, tan perjudiciales en los sistemas de control.

2) Resumen de los modos de operación anuales de la UTA en Málaga y Madrid.

En la época de invierno, el modo de operación más usado es aquel en el que la batería de calor calienta el aire exterior hasta la impulsión requerida, con un 50% del total de las horas del año en Madrid y un 28.7% en Málaga. La humedad del aire exterior en invierno (de ambos climas) es lo suficientemente baja como para que, prácticamente, no se use la rueda desecante.

En verano el modo predominante es el enfriamiento gratuito, con un aproximadamente 35% de las horas en ambas ciudades. En Madrid el uso de la rueda está muy limitada, con sólo un 4.3% de las horas del año. Por lo tanto, la implementación de este sistema en un clima con las características de Madrid no es muy recomendable. Sin embargo, en clima húmedo como Málaga, la rueda desecante está activa un 22.5% de las horas del año, principalmente en el modo de operación en la que va seguida por el intercambiador sensible y el enfriador

evaporativo, evitando el uso de la batería de frío, lo que permite reducir el consumo de energía.

3) Consumo de energía en la regeneración de la rueda desecante en la época de verano.

Para minimizar el consumo de energía se le da prioridad a la aportación de la energía solar para la regeneración de la rueda. La temperatura de regeneración necesaria la impone el modelo de rueda desecante en función del grado de deshumidificación que se haya llevado a cabo con el aire de proceso.

Se muestran los resultados medios para los meses de mayo a septiembre. El porcentaje de aportación solar para Málaga es del 93.5%. La razón principal es que la temperatura de regeneración en muchos de los casos es baja (está por debajo de los 64°C, durante el 70% de las horas) y sólo el 10% requiere una temperatura superior a 80°C, lo que permite que la demanda térmica sea lo suficientemente baja como para sea combatida por la energía solar disponible.

4) Comparación de la UTA desecante con un sistema convencional.

Se comparan los resultados de los consumos térmicos y eléctricos durante los meses de verano entre la UTA desecante y una UTA convencional de aire exterior, con una batería de frío o calor y con un sistema de retorno que recircula el aire de la zona y lo mezcla con el aire exterior antes de ser introducido en la batería.

El sistema desecante, debido a la alta aportación de la energía solar, tiene un 35% menos de consumo de energía eléctrica que el convencional, además de garantizar las condiciones de confort en la zona por el tratamiento de la humedad.

5) Comparación de las potencias de refrigeración y calefacción entre la UTA desecante y el sistema convencional.

Se representan las potencias de refrigeración y calefacción, en función de la temperatura exterior para ambos sistemas. El objetivo es obtener la carga pico para el dimensionamiento del sistema de calefacción y refrigeración.

Desde el punto de vista de la potencia instalada, en refrigeración, la carga máxima es aproximadamente la misma en ambos sistemas. Sin embargo, debido a la regeneración, la potencia instalada requerida en la UTA desecante es mayor. Además, en un sistema desecante son necesarios otros elementos como la rueda desecante, el enfriador evaporativo, y un sistema de control muy preciso. Esto hace que el coste inicial de un sistema desecante sea más elevado que un sistema convencional.

2.2. Influence of the desiccant wheel effectiveness method approaches, with fix and variable effectiveness parameters, on the performance results of an airport air-conditioning system.

Celestino R. Ruivo, Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López.
Energy Conversion and Management 94 (2015) 458-471.

Estudios recientes demuestran que los modelos de rueda desecante basados en efectividades constantes proporcionan resultados cuestionables. Por lo tanto, la principal aportación de este artículo es la integración de un modelo de rueda, cuya efectividad varía en función de las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire de entrada, en la UTA desecante del artículo anterior y analizar la influencia del modelo de rueda de efectividad variable en el rendimiento del sistema.

El modelo numérico de rueda desecante que se va a utilizar en este artículo, como modelo de referencia, es el presentado por Ruivo [8]. Se trata de un modelo GSSR, en el que la transferencia de calor, la difusión superficial y la difusión de Knudsen son consideradas en el medio poroso, en dirección axial y perpendicular. En el canal de aire, se considera flujo laminar y la transferencia de calor y masa entre el aire y la superficie desecante se modela mediante coeficientes convectivos, obtenidos a partir del número de Nusselt y Sherwood (analogía de Chilton-Colburn). El modelo está calibrado con 27 ensayos experimentales en diferentes condiciones de operación, con indicadores de error en la transferencia de masa y

calor del 5% de máximo. El modelo se utiliza para generar el par de efectividades necesario en función de las condiciones de operación de la rueda desecante. Para ello se proponen diez aproximaciones diferentes con parámetros de efectividad constante y variable (tabla 1). Cinco de ellas utilizan el par de efectividades E_{fh} y $E_{f\psi}$ (aproximaciones A) y las otras cinco usan el par E_{f1} y E_{f2} (aproximaciones B).

Tabla 1. Resumen de las aproximaciones consideradas de la rueda desecante.

Aproximación	A1/B1	A2/B2	A3L/B3L	A3M/B3M	A3H/B3H
Dependencia	Interpola según temperatura, humedad y velocidad másica	Interpola según velocidad másica	Valores de efectividad constante para $F_m=1$ kg/sm^2	Valores de efectividad constante para $F_m=2$ kg/sm^2	Valores de efectividad constante para $F_m=3$ kg/sm^2

El nuevo modelo de rueda integrado en la UTA desecante del artículo anterior (que sustituye al modelo de Jurinak [19]) es un modelo de interpolación adaptado del método EIPIS10, utilizado en Ruivo [27]. Incluye un fichero de datos con los valores de efectividad generados por el modelo numérico. Según la aproximación considerada, el modelo determina el par de efectividades en función de la temperatura, humedad y velocidad másica del aire.

El caso de estudio en la simulación es el mismo que en el artículo anterior. Las condiciones climáticas corresponden a Málaga. Se realiza la simulación del sistema y se analizan los resultados en dos partes:

1) Análisis comparativo de las aproximaciones del modelo de rueda.

Se analiza el comportamiento de la rueda desecante y su influencia en el rendimiento del sistema, en función de las aproximaciones propuestas. Los resultados obtenidos son:

- Comparación de las condiciones del aire a la salida de la rueda para cada aproximación de modelo de rueda, con el modelo numérico de referencia.

- Potencia máxima de los equipos que integran la UTA desecante.
- Consumos eléctricos y el COP eléctrico del sistema.
- Comprobación de que se cumplen las condiciones de confort en la zona.

A continuación se muestra una discusión de estos resultados:

- i. Comparación de las aproximaciones del modelo de rueda con el modelo numérico detallado.

Se analizan los resultados obtenidos en un día de verano característico, el 22 de julio. Las variables de referencia usadas para la comparación son: la transferencia de calor sensible y de masa de agua por unidad de área en la rueda. Se calculan los errores frente al modelo numérico. Los mejores resultados los aportan las aproximaciones A1 y B1, con errores inferiores a 4.2%. El resto de aproximaciones no dan resultados precisos, lo que demuestra la necesidad del uso de modelos de ruedas desecantes en los que se tenga en cuenta las condiciones de entrada del aire.

También se comparan la temperatura y humedad del aire de salida de la rueda desecante obtenidas en las aproximaciones A1 y B1 para todo el año. Se comprueba que las diferencias son despreciables entre ambas. Esto demuestra que el tipo de efectividad utilizado no es relevante en el rendimiento de la rueda desecante.

- ii. Comparación de la capacidad máxima de los equipos que integran la UTA desecante en función de la aproximación adoptada.

Los equipos cuya capacidad máxima es más dependiente de la aproximación usada son la batería de frío y el intercambiador sensible rotativo. En las aproximaciones con efectividades constantes (A3 o B3), la capacidad máxima de la batería de frío es más baja, por lo que puede dar lugar a que en la fase de diseño de la UTA se diseñe una batería de frío con una potencia insuficiente para satisfacer la demanda requerida.

Sin embargo, la batería de calor y el enfriador evaporativo prácticamente permanecen invariables, debido a que el valor máximo lo alcanzan cuando la rueda desecante no está operando.

Entre A1 y B1, las diferencias de las potencias máximas son despreciables.

- iii. Comparación de los consumos eléctricos y el COP eléctrico del sistema, en función de la aproximación adoptada.

El consumo eléctrico en la bomba de calor y en la resistencia eléctrica de la batería de regeneración es más alto en las aproximaciones A1 y B1 que en el resto. Por ejemplo, el COP varía de 1.22 en A1, a 3.2 en A3H. Esto es debido a que en A3H, al suponer valores de efectividad constantes y correspondientes a velocidades másicas altas, que favorecen la transferencia de masa y calor en la rueda, el rendimiento de la rueda va a ser mejor que en A1, donde el rendimiento depende en cada paso de tiempo de la velocidad másica y de las condiciones de temperatura y humedad.

También se comprueban que los resultados entre A1 y B1 son muy similares.

- iv. Comprobación del confort térmico de la zona.

Los resultados anteriores confirman que las aproximaciones A1 y B1 son las más precisas. Se evalúa el confort térmico de la zona para estas aproximaciones. Las condiciones requeridas de confort son de 26°C de temperatura y de 45-60% de humedad relativa. La temperatura de confort siempre se alcanza para todas las horas del año. Sin embargo en algunas horas la humedad relativa supera el 60%, es decir, la rueda desecante no es capaz de deshumectar el aire exterior lo suficiente para combatir la carga latente de la zona. Esto sucede con mayor frecuencia en julio, en el que un 4.16% de las horas se supera el límite del 60%.

- 2) Evaluación del rendimiento del sistema en función de la temperatura de regeneración y el caudal de aire.

Se realiza un estudio paramétrico en el que se investiga la influencia de diferentes rangos de valores de temperatura de regeneración y velocidad másica en el rendimiento del sistema. Los casos planteados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Casos en función de la temperatura de regeneración y la velocidad másica del aire.

Temperatura de regeneración	RT2	RT3	RT4
	50 a 70°C	50 a 60°C	50°C
Velocidad másica	RF1	RF2	RF3
	0.5 a 3 kg/sm ²	1 a 3 kg/sm ²	3 kg/sm ²

Se utiliza el modelo de rueda correspondiente a la aproximación A1, es decir, con el par de efectividades E_{fh} y $E_{f\psi}$, que se obtienen en función de las condiciones de temperatura, humedad y velocidad másica del aire de proceso. Los resultados son:

- Potencia máxima de los equipos que integran la UTA desecante.
 - Consumos eléctricos y el COP eléctrico del sistema.
 - Comprobación de que se cumplen las condiciones de confort en la zona.
- En un primer caso se obtienen los resultados en función de la temperatura de regeneración:
- i. Cálculo de la potencia máxima de los equipos de la UTA desecante en función de la temperatura de regeneración.

Los resultados muestran que la potencia máxima de los equipos apenas varía si se modifica la temperatura de regeneración. Por lo tanto, desde el punto de vista de la potencia instalada la temperatura de regeneración no tiene influencia en el sistema.

- ii. Cálculo del consumo eléctrico y el COP del sistema en función de la temperatura de regeneración.

En relación a los consumos eléctricos, la disminución de la temperatura de regeneración máxima de 70°C (RT2) a 50°C (RT4) provoca un aumento del COP del sistema de 1.28 a 2.3. Esto se debe a que al ser la temperatura de regeneración más baja la energía solar es capaz de combatir un mayor porcentaje del consumo térmico de la batería.

- iii. Comprobación de la fracción de la humedad relativa en la zona, en función de la temperatura de regeneración.

Se analiza la influencia de la temperatura de regeneración en el confort térmico de las personas mediante la evolución de la humedad relativa de la zona.

Cuando se limita la temperatura de regeneración a 50°C (se pasa de RT2 a RT4), se llega a porcentajes del 17 y 27% de horas insatisfechas mensuales en los meses de julio y agosto, respectivamente. Esto ocurre porque, al disminuir la temperatura de regeneración, el aire tiene menos capacidad para eliminar el agua adsorbida en el desecante. Por lo tanto, en el proceso de adsorción, el desecante tiene menos capacidad de adsorber la humedad del aire, y no consigue el grado de deshumidificación necesario para alcanzar la humedad de impulsión requerida.

En resumen, la temperatura de regeneración es un parámetro dominante en la operación del sistema. A pesar de conseguir rendimientos eléctricos globales más favorables si se trabaja con temperatura de regeneración más bajas, el grado de disconfort térmico en la zona va a ser mayor.

- En un segundo caso se varía la temperatura de regeneración y la velocidad másica del aire.

- iv. Cálculo de la potencia máxima de los equipos de la UTA desecante en función de la temperatura de regeneración y la velocidad másica del aire.

Los resultados muestran que la influencia de la temperatura de regeneración y la velocidad másica en la potencia máxima de la batería de calor, el intercambiador sensible, el enfriador evaporativo y la batería de regeneración es despreciable. Tan sólo la capacidad de la

batería de frío disminuye si la velocidad másica es mayor, ya que al aumentar ésta de 0.5 a 3 kg/sm² (de RF1 a RF3), se pasa de 153.7 a 108.4 kW, respectivamente. La razón es que, a velocidades más altas, el rendimiento de la rueda es más favorable, lo que provoca que se adsorba igual o más humedad, pero con un incremento de temperatura más bajo. El aire de salida de la rueda tiene una temperatura menor que con velocidades másicas más bajas, por lo que requiere, si se da el caso, un enfriamiento menor en la batería de frío.

- v. Cálculo del consumo eléctrico y el COP del sistema en función de la temperatura de regeneración y la velocidad másica del aire.

Los resultados muestran, que de forma general, el aumento de la velocidad másica del aire hace que los consumos eléctricos disminuyan y, por lo tanto, el COP del sistema aumente. El COP global evoluciona de 1.84 en el caso RT2-RF1 (50-70°C, 1 a 3 kg/sm²), a 4.07 en el caso de RT4-RF3 (50°C, 3 kg/sm²). Se ha producido una disminución de la temperatura de regeneración de 20°C, lo que aumenta la contribución solar y reduce el consumo en la resistencia eléctrica en un 62%. También se ha aumentado la velocidad másica hasta un valor fijo de 3 kg/sm², lo que mejora el rendimiento de la rueda desecante, y provoca una reducción en el consumo de la batería de frío, con la consiguiente reducción del consumo eléctrico en la bomba de calor, en este caso en un 52%.

- vi. Comprobación del confort térmico de la zona en función de la temperatura de regeneración y la velocidad másica del aire.

Si se mantiene una temperatura de regeneración de 70°C y una velocidad másica a partir de 1 kg/sm², siempre se cumple que la humedad relativa de la zona no supera el límite de 60%. Si se mantiene la velocidad másica superior a 1 kg/sm² y se reduce la temperatura de regeneración, el porcentaje de horas insatisfechas (mensual) máxima ocurre en agosto con un 2.7% de media. Sin embargo, para valores inferiores a 1 kg/sm², el porcentaje puede aumentar hasta 9.5%, con un valor máximo de humedad relativa en la zona de 79%. Por lo tanto, es más importante desde el punto de vista del confort térmico, que los caudales de aire no sean muy bajos, ya que penaliza el rendimiento de la rueda en mayor medida que disponer de temperaturas de regeneración bajas.

2.3.A new desiccant channel to be integrated in building façades.

Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 86 (2015) 318-327.

Con el objetivo de contribuir en la búsqueda de sistemas de climatización más eficientes, se presenta el diseño de un nuevo sistema de tratamiento de aire exterior de ventilación con desecantes sólidos, denominado sistema de fachada desecante. La directiva NZEB [1] pretende que los edificios consuman la energía que sean capaces de generar. Esta normativa promueve en Europa la incorporación de los sistemas en la fachada del edificio, de manera que la envolvente de éste deje de ser un elemento pasivo y se convierta en un elemento activo del sistema. El nuevo sistema propuesto consiste en incorporar el desecante sólido a la fachada del edificio. El material desecante es introducido dentro de una fachada ventilada, formando dos capas de material desecante. El aire de ventilación circula a través de la cámara de aire de la fachada, poniéndose en contacto con el material desecante, con el que transfiere masa y energía y, a la salida del canal, se introduce en una climatizadora convencional (batería de frío, enfriamiento evaporativo...) donde se somete a un tratamiento de enfriamiento para ser impulsado a la zona. Cuando el desecante se satura y no puede adsorber más humedad, la fachada incorpora un captador solar que calienta el aire exterior hasta la temperatura necesaria para su regeneración. El diseño de dos columnas de fachada desecante permite alternar los modos de adsorción y desorción sin que se interrumpa el caudal de aire de ventilación. En la figura 5 se muestra un esquema del sistema.

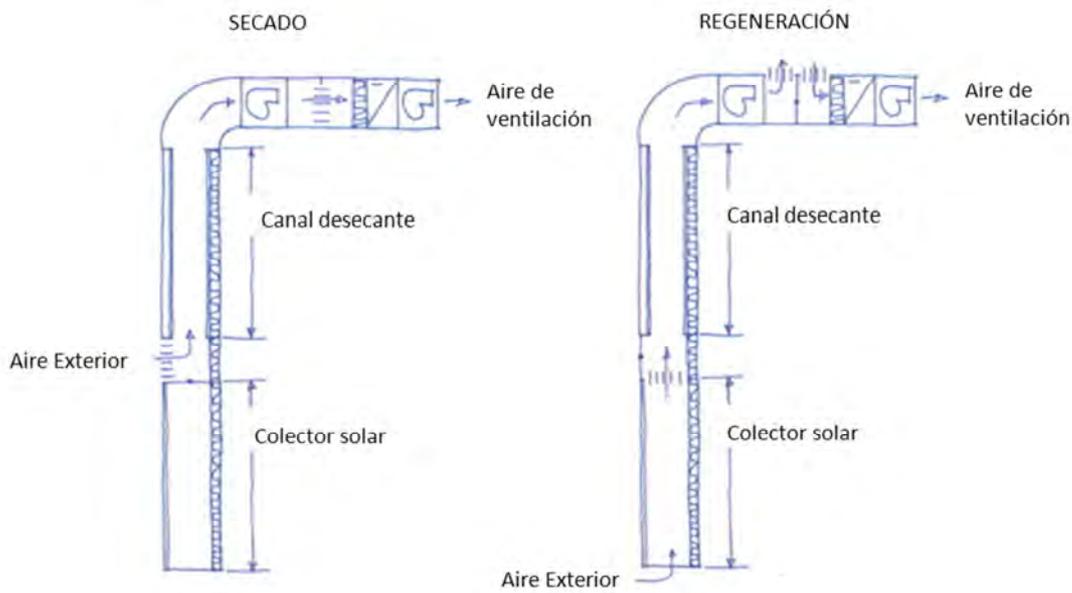


Figura 5. Esquema de la fachada desecante con los modos de operación: secado y regeneración.

La aportación del artículo es un modelo matemático del paso de aire a través del canal delimitado por dos capas de material desecante. Se basa en las mismas ecuaciones que utilizan los modelos detallados de ruedas desecantes, pero adaptado e integrado en el sistema de fachada desecante. Se trata de un modelo simplificado con el objetivo de que se pueda integrar en un programa de simulación térmica en edificios. Se resuelve el balance de masa y energía en la interfaz aire-desecante y del aire en el canal y se obtienen las condiciones de salida del aire del canal y la interacción con el desecante. Además, se detalla el diseño del funcionamiento del sistema, la integración arquitectónica con el edificio, el modelado del colector solar y su acoplamiento con el módulo desecante y la estrategia de control para determinar los modos de operación del sistema.

Los resultados analizan el comportamiento de la fachada para un día de verano a partir del cálculo de la carga latente que combate. También se valoran otros parámetros como el tiempo de operación de los ciclos, la capacidad de deshumectación del desecante, la temperatura de salida del aire o la temperatura de regeneración necesaria para eliminar la humedad contenida en el desecante.

Se define un parámetro de eficiencia del sistema que se evalúa en cada ciclo de adsorción-desorción y se calcula en un periodo estacional, en función de las condiciones exteriores.

Los resultados más importantes son los siguientes:

1) Funcionamiento del sistema para un día típico de verano.

El día elegido es el 25 de agosto en Málaga. El sistema está situado en una fachada vertical con orientación sur.

Se representa la capacidad del sistema para combatir la carga latente frente a la radiación solar incidente sobre la fachada. Ambas curvas tienen la misma forma, lo que indica la fuerte relación que existe entre la carga combatida y la radiación solar incidente. Se alcanza un máximo de 30W por metro lineal de fachada, que es, aproximadamente, la ganancia latente de una persona con actividad de trabajo moderado. En las horas del día en las que la radiación solar es baja, la carga combatida es inferior a los 10 W, por lo que no es interesante la operación del sistema.

También se muestra la operación del canal desecante para una hora central del día. Se representa la evolución de la humedad y la temperatura del aire a la salida del canal, y la temperatura del aire de regeneración, procedente del módulo del captador solar. Se observa que, en ciclos de secado de 2 minutos y de regeneración de 1 minuto, las condiciones de salida del aire se mantienen aproximadamente constantes. El aire de ventilación se deshumecta aproximadamente 3.4 gw/kgas. Además, el aire entra a 30°C y sufre un incremento de 20°C de temperatura. La temperatura de regeneración permanece constante en torno a 62°C.

2) Rendimiento estacional del sistema.

Para calcular el rendimiento estacional del sistema se asume que, a causa de la inercia térmica del edificio y la corta duración de los ciclos, los ocupantes no perciben el carácter oscilatorio del sistema. Por lo tanto, la eficiencia del sistema se basa en un ciclo completo: adsorción más regeneración.

Se define un parámetro de eficiencia del sistema como la relación entre la carga latente que combate y la carga latente máxima es capaz de combatir, en cada ciclo. En el proceso de regeneración del desecante, llega un momento en el que se produce el equilibrio entre la presión parcial de vapor del agua en el desecante y en el aire del canal, por lo que el aire no puede eliminar más humedad. El nivel de humedad en el desecante alcanza su valor mínimo y se inicia el proceso de adsorción. Se introduce el aire del exterior y el contenido de agua en el desecante aumenta desde su valor mínimo hasta el equilibrio con la nueva temperatura del aire exterior. Si se supone que la humedad del desecante permanece constante en su valor mínimo, se obtendría la humedad relativa ideal mínima del aire a la salida de la fachada desecante, lo que daría lugar a que el sistema esté combatiendo la carga latente máxima.

Se calcula la carga latente que combate el sistema y la eficiencia, en los meses de junio a septiembre, en función de la humedad exterior, la temperatura exterior y la radiación solar. El sistema alcanza valores de eficiencia máximos de 0.13 que coincide con valores de radiación solar más altos y la humedad exterior más baja.

Los resultados demuestran que se podría evaluar el rendimiento del sistema estacional usando, para cada hora, una eficiencia que dependa sólo de la radiación solar. Para demostrarlo, se realiza un análisis de regresión lineal simple, y se calcula el error cometido entre la eficiencia calculada por el modelo y la obtenida mediante la regresión. Para la localidad de Málaga el error es de un 10%. Se realiza el mismo análisis en otras ciudades con climas húmedos, para que se puedan confirmar estos resultados con otras condiciones. En Nueva York, con una humedad más alta que Málaga, también se demuestra que la eficiencia sólo depende de la radiación solar y el error es de un 21.5%. Sin embargo, el clima de Bangkok se caracteriza por tener humedades muy altas con niveles de radiación solar muy bajas. En este caso, el sistema sólo es capaz de combatir una carga máxima de 23 W, con una eficiencia límite de 0.07.

3. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.

El presente trabajo realiza un análisis de los sistemas de tratamiento de aire exterior de ventilación en edificios con desecantes sólidos. La motivación principal que da lugar a la investigación llevada a cabo es que, en edificios con elevadas ganancias internas y situados en ciudades con climas húmedos, los sistemas convencionales sin control de humedad garantizan la temperatura de consigna pero generalmente no son capaces de combatir la carga latente, por lo que no existe confort térmico en la zona. Como solución a este problema los sistemas de tratamiento de aire con desecantes sólidos tratan la temperatura y la humedad por separado. La presencia del material desecante en la UTA permite tener control en la humedad del aire de impulsión en la zona, garantizando las condiciones de confort. En el análisis de las líneas de investigación más relevantes relacionadas con el sistema de UTA desecante surgen las motivaciones principales para profundizar en la investigación de este sistema. Son las siguientes:

- El control de la operación del sistema desecante se basa en un control simple, no incluyen una inteligencia de control que permita optimizar el funcionamiento de la UTA desecante, desde el punto de vista del consumo de energía, en función de las condiciones de operación.
- La mayoría de los modelos de rueda desecante utilizados en la simulación son de efectividad constante, es decir, el rendimiento de la rueda no depende de las condiciones de operación, como son la temperatura, humedad y velocidad del aire.

Por otro lado, las normativas europeas relativas a eficiencia energética fomentan que los edificios consuman la energía que sean capaces de generar. Se propone que la fachada forme parte de un elemento activo del sistema de climatización.

Para resolver estos problemas, se ha realizado una investigación que se divide según cada uno de los tres artículos que conforman esta tesis.

1. The optimization of the operation of a solar desiccant air handling unit coupled with a radiant floor. José Manuel Cejudo López, Francisco Fernández Hernández,

Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés. *Energy and Buildings* 62 (2013) 427-435.

Para resolver el problema del control simple en las UTAs desecantes, el artículo propone la definición de una estrategia de control que optimice el rendimiento energético del sistema en conjunto.

Las actividades planteadas para conseguirlo son las que se exponen a continuación:

1. Se desarrolla un modelo específico de la UTA desecante que integra cada uno de los componentes que la forma: la rueda desecante, el intercambiador sensible rotativo, la batería de frío o calor, el enfriador evaporativo y la batería de regeneración.
2. El modelo incorpora también la estrategia de control óptima, en la que a partir de las condiciones exteriores y de la temperatura y humedad requerida de impulsión para combatir la carga sensible y latente de la zona, el sistema evalúa los posibles modos de operación y elige el que menos consumo de energía tiene.
3. El modelo se integra en Trnsys 16, lo que permite su interacción con los sistemas de producción (un sistema de energía solar y una bomba de calor), el suelo radiante que actúa como unidad terminal de climatización, y el edificio. Se realiza la simulación para un caso real, la terminal T3 del aeropuerto de Málaga, para dos ciudades diferentes, ambas con climas cálidos pero con un contenido de humedad del aire exterior diferentes (húmedo y seco).

Como conclusión principal se puede afirmar que:

- 1) En términos energéticos, con un área de captación de 500 m² de colectores solares para acondicionar 4080 m², la contribución solar a las baterías de calor y regeneración es superior al 90%. Esto da lugar a que la AHU desecante consuma un 35% de electricidad menor que un sistema convencional.

Otras conclusiones particulares son las que se muestran a continuación:

- 2) La estrategia de control requiere dos procesos: una preselección de los posibles modos de operación, y la evaluación de estos modos y selección del que minimice el consumo de energía. En condiciones reales en un edificio, este tipo de control requiere un conocimiento previo de las cargas térmicas de la zona y la fracción de carga que el suelo radiante es capaz de combatir. Se comprueba que existe una continuidad en la operación de las diferentes secciones de la UTA, evitando ciclos cortos de encendido-apagado, tan perjudiciales en los sistemas de control.
- 3) En climas secos como el de Madrid no se recomienda la instalación de este sistema, ya que la rueda desecante sólo actúa un 4% del porcentaje anual.
- 4) Por la noche, con un 35% del total de las horas anuales en ambos climas, es imprescindible desde el punto de vista del ahorro de energía que este tipo de sistemas permitan el enfriamiento gratuito, siempre que tras la impulsión de aire directamente del exterior se mantengan las condiciones de confort de la zona.
- 5) Es importante valorar que el coste inicial del sistema desecante es más elevado que uno convencional, no sólo porque la potencia instalada es más alta debido a la energía eléctrica para regenerar la rueda, sino por la rueda desecante y el intercambiador de calor. Por lo tanto, es importante estimar un equilibrio entre este coste y el ahorro que supone, el periodo de amortización de la instalación y la ventaja que supone frente a un sistema convencional al garantizar las condiciones de confort de la zona.

2. Influence of the desiccant wheel effectiveness method approaches, with fix and variable effectiveness parameters, on the performance results of an airport air-conditioning system. Celestino R. Ruivo, Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López. Energy Conversion and Management 94 (2015) 458-471.

En una fase posterior al primer artículo, se descubren nuevas investigaciones que demuestran que las condiciones de velocidad, temperatura y humedad del aire, condicionan el rendimiento de la rueda desecante. Esta afirmación pone en duda los resultados obtenidos con UTAs desecantes en los que el modelo de rueda es de efectividad constante.

Para resolver este problema, el segundo artículo propone analizar la influencia de un modelo de rueda de efectividad variable en el rendimiento del sistema de UTA desecante. Para ello se plantean una serie de acciones:

1. Se proponen diferentes modelos de rueda, con parámetros de efectividad fijos y variables. Los valores de efectividad se obtienen a partir del modelo de Ruivo [8] calibrado mediante ensayos experimentales. Un método de interpolación determina la efectividad de la rueda en función de la temperatura, humedad y velocidad másica del aire de proceso (aproximación llamada A1 y B1). Otras aproximaciones sólo tienen en cuenta el caudal de aire (A2 y B2), y en las más simples se establecen unos valores fijos de efectividad en función de un caudal determinado (A3 y B3).

2. El modelo de rueda de efectividad variable que considera todas estas aproximaciones se implementa en el modelo de UTA desecante del artículo anterior, sustituyendo al modelo de Jurinak [19].

3. Se realiza la simulación del sistema en el mismo caso que en artículo 1, para el clima de Málaga. La simulación está dividida en dos partes:

- Se realiza una comparación de todas las aproximaciones de rueda propuestas con el modelo detallado. Se simula un día típico de verano y se compara la transferencia de calor y de masa de agua por unidad de área en la rueda.
- Se analiza la influencia del modelo de rueda de efectividad variable en el rendimiento del sistema en función de la temperatura de regeneración y el caudal de aire.

La conclusión principal del artículo es la siguiente:

- 1) La comparación de las diferentes aproximaciones con el modelo detallado permite afirmar que las aproximaciones con efectividad variable son las que menor error tienen. Se demuestra la necesidad de que en un modelo simplificado de rueda desecante basado en parámetros de efectividad, el par de efectividades que define el rendimiento de la rueda en cada paso de tiempo, sea variable, y se obtenga en

función de las condiciones de temperatura, humedad y caudal del aire. Otros modelos en los que no se tenga esto en cuenta van a dar resultados cuestionables, como un rendimiento del sistema más elevados o un dimensionamiento más bajo de los equipos.

Además, se describen otras conclusiones importantes:

- 2) Los resultados demuestran que con una temperatura de regeneración máxima de 70°C y una velocidad másica mínima de 1 kg/sm² es suficiente para que la humedad relativa de la zona no supere el límite de 60%.
- 3) Asimismo, desde el punto de vista del confort térmico, se observa que no es favorable que los caudales de aire sean muy bajos, ya que penaliza el rendimiento de la rueda en mayor medida que disponer de temperaturas de regeneración bajas. El caso más favorable es el que, con una temperatura de regeneración de 70°C y una velocidad másica de 3 kg/sm², obtiene un COP de 3.2 y es capaz de satisfacer la humedad de la zona en todo momento.

3. A new desiccant channel to be integrated in building façades. Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés. *Energy and Buildings* 86 (2015) 318-327.

Con el objetivo de incorporar el desecante al propio edificio, se propone un nuevo sistema de tratamiento de aire exterior de ventilación con desecantes sólidos, denominado sistema de fachada desecante.

Las tareas principales realizadas en el artículo son las siguientes:

1. El diseño del funcionamiento del sistema, la integración arquitectónica con el edificio, el modelado del colector solar y su acoplamiento con el módulo desecante y la estrategia de control para determinar los modos de operación del sistema.
2. Se ha creado un modelo simplificado que desarrolla las ecuaciones de balance de masa y de calor del paso del aire a través de un canal en contacto con dos capas desecantes.

3. Se realiza la simulación del sistema bajo diferentes condiciones climáticas.

La aportación principal del artículo es la siguiente:

- 1) La eficiencia del sistema depende fundamentalmente de la radiación solar incidente sobre la fachada. A partir de un modelo de regresión simple, se puede obtener la eficiencia del sistema si se conoce la radiación solar que incide sobre la fachada. El rango de eficiencias conseguido varía entre 0.02 y 0.12, en función del nivel de radiación.

Otras conclusiones importantes se muestran a continuación:

- 2) En climas de alto nivel de radiación solar y humedad exterior, como el clima de Málaga, cada metro lineal de fachada es capaz de combatir la carga latente correspondiente a una persona que realiza un trabajo moderado, alrededor de 30 W.
- 3) La carga latente combatida por una fachada desecante es menor que una UTA con rueda desecante, y por lo tanto, su aplicación puede ser diferente. La rehabilitación de edificios de oficinas, viviendas, hoteles, etc., puede ser una oportunidad para la implementación de este tipo de sistemas.

Líneas futuras de investigación.

Actualmente, la investigación presentada en esta tesis sigue su curso. Los trabajos futuros se muestran a continuación:

- El estudio de una nueva unidad terminal que integra el suelo radiante y los conductos de ventilación. Una unidad de este tipo tendría ventajas significativas respecto a los sistemas por separado: mejora la integración del sistema de ventilación, mejora la convección entre el aire y el suelo, potenciando el mecanismo convectivo de transferencia de calor, y minimiza el riesgo de condensación, porque el aire en contacto con el suelo sería el exterior, una vez se haya tratado con desecantes sólidos, en lugar del aire del local.

- Mejora de la interacción entre el sistema de ventilación, el suelo radiante y las condiciones de la zona. El objetivo es el modelado de una zona, con un número de nodos de aire suficientes para tener en cuenta la estratificación de temperatura propia de un sistema de ventilación por desplazamiento, y que, en tiempo real, calcule las condiciones de la zona en función del suelo radiante y el aire de ventilación.
- Modelado de los dispositivos que integran la UTA desecante, a excepción de la rueda, con modelos de efectividad variable. Analizar su influencia en el rendimiento del sistema.
- Validación experimental de modelo de fachada desecante con nuevas disposiciones de los desecantes. Esto podría confirmar las hipótesis del modelo matemático y la validez de los resultados.

4. REFERENCIAS.

- [1] Comisión Europea. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>.
- [2] Comisión Europea. Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de las Comunidades Europeas (2012), L 315/1.
- [3] Código Técnico de la Edificación (CTE). DB HE: Documento Básico de Ahorro de Energía. BOE 12/09/2013 con corrección de errores del BOE del 08/11/2013.
- [4] X. Zheng, T.S. Ge, R.Z. Wang. Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems. *Energy* 74 (2014) 280-294.
- [5] A.A. Pesaran, A.Mills. Moisture transport in silica gel packed beds II. Experimental study. *Int. J. Heat Mass Transfer* 30 (1987) 1051-1060.
- [6] RK Collier. Desiccant properties and their affect on cooling system performance. *ASHRAE Transactions* 1989; 95(1):823-827.
- [7] L.Z. Zhang, H.X. Fu, Q.R. Yang, J.C. Xu. Performance comparisons of honeycomb-type adsorbent beds (wheels) for air dehumidification with various desiccant wall materials. *Energy* 65 (2014) 430-440.
- [8] C.R. Ruivo, J.J. Costa, A.R. Figueiredo. On the behaviour of hygroscopic wheels: Part I – channel modelling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 4812-4822.
- [9] J.M. Cejudo, R. Moreno, A. Carrillo. Physical and neural network models of a silica-gel desiccant Wheel. *Energy and Buildings* 34 (2002) 837-844.

- [10] T.S. Ge, Y. Li, R.Z. Wang, Y.J. Dai. A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 1485-1528.
- [11] S. De Antonellis, C.M. Joppolo, L. Molinaroli, A. Pasini. Simulation and energy efficiency analysis of desiccant wheel systems for drying. *Energy* 37 (2012) 336–345.
- [12] R. Tu, X.H. Liu, Y. Jiang. Performance analysis of a two-stage desiccant cooling system. *Applied Energy* 113 (2014) 1562–1574.
- [13] R. Ghazal, C. Ghiaus. Gray-box identification of thermal transfer coefficients of desiccant wheels. *Energy and Buildings* 70 (2014) 384-397.
- [14] Y. Sheng, Y. Zhang, Y. Sun, L. Fang, J. Nie, L. Ma. Experimental analysis and regression prediction of desiccant wheel behavior in high temperature heat pump and desiccant wheel air-conditioning system. *Energy and Buildings* 80 (2014) 358-365.
- [15] S.A. El-Agouz, A.E. Kabeel, Performance of desiccant air conditioning system with geothermal energy under different climatic conditions. *Energy Conversion and Management* 88 (2014) 464–475.
- [16] G. Heidarinejad, H. Pasharshahi. The effects of operational conditions of the desiccant wheel on the performance of desiccant cooling cycles. *Energy and Buildings* 42 (2010) 2416-2423.
- [17] A. Kodama, T. Hirayama, M. Goto, T. Hirose, R.E. Critoph. The use of a psychrometric charts for the optimisation of a thermal swing desiccant wheel. *Applied Thermal Engineering* 21 (2001) 1657-1674.
- [18] C. R. Ruivo, A. Carrillo-Andrés, J.J. Costa, F. Domínguez Muñoz. Exponential correlations to predict the dependence of effectiveness parameters of a desiccant wheel on

the airflow rates and on the rotation speed. *Applied Thermal Engineering* 51 (2013) 442–450.

[19] J.J. Jurinak, Open cycle solid desiccant cooling-component models and system simulations. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 1982.

[20] I.L. Maclaine-Cross, P. Banks. Coupled heat and mass transfer in regenerators-prediction using an analogy with heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15 (1972) 1225-1242.

[21] TRNSYS <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. (Accessed 25.09.14).

[22] G. Panaras, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, N. Kyriakis. Theoretical and experimental investigation of the performance of a desiccant air-conditioning system. *Renewable Energy* 35 (2010) 1368–75.

[23] G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso, Experimental validation of constant efficiency models for the subsystems of an unconventional desiccant-based Air Handling Unit and investigation of its performance, *Appl. Therm. Eng.* 33-34 (2012) 100–108.

[24] L.Z. Zhang, Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures, *Energy* 31 (8–9) (2006) 1228–1242.

[25] G. Panaras, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, N. Kyriakis. Experimental validation of a simplified approach for a desiccant wheel model. *Energy and Buildings* 42 (2010) 1719-1725.

[26] C. R. Ruivo, A. Carrillo-Andrés, J.J. Costa, F. Domínguez Muñoz. A new approach to the effectiveness method for the simulation of desiccant wheels with variable inlet states and airflows rates. *Applied Thermal Engineering* 58 (2013) 670–678.

- [27] C. R. Ruivo, A. Carrillo-Andrés, J.J. Costa, F. Domínguez Muñoz. Interpolation procedures for the effectiveness method to account for the influence of the inlet airflow states on the desiccant wheels performance. *Energy and Buildings* 55 (2012) 380–388.
- [28] N.A. Pennington. Humidity changer for air conditioning. USA, Patent No. 2,700,537; 1955.
- [29] D. La, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 130-147.
- [30] R.V. Dunkle. A method of solar air conditioning. *Mechanical and Chemical Engineering Transactions of the Institute of Engineers* 73 (1965) 73-78.
- [31] ASHRAE Systems and Equipment. Atlanta. 2008.
- [32] H.E. Feustel, C. Stetiu. Hydronic radiant cooling: preliminary assessment. *Energy and Buildings* 22 (1995) 193-205.
- [33] F.J. Rey Martínez, E. Velasco Gómez. DTIE 9.04. Sistema de suelo radiante. ATECYR 2008.
- [34] Código Técnico de la Edificación (CTE). DB SI: Seguridad en caso de incendio. Evacuación de ocupantes. Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo.
- [35] Reglamento de Instalaciones térmicas en los Edificios (RITE). Real Decreto 1027/2007 de 20 de julio.
- [36] K. Zhao, X.H. Liu, Y. Jiang. Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation. *Energy and Buildings* 66 (2013) 246-257.

- [37] W. Kessling, S. Holst, M. Schuler. Innovative design concept for the new Bangkok international airport. NBIA, in: Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates. Richardson, TX, 2004, pp. 269–277.
- [38] M. Koschenz, V. Dorer. Interaction of an air system with concrete core conditioning. *Energy and Buildings* 30 (1999) pp. 139-145.
- [39] Fong, M. L., Z. Lin, K.F. Fong, T. T. Chow, T. Yao. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilation methods. 2011, Vol. 21, págs. 231-239.
- [40] A. Fernández Gutiérrez. Técnicas experimentales y numéricas aplicadas a sistemas de climatización mediante difusión de aire y suelo frío. Universidad de Málaga, España. 2014. (Tesis Doctoral).
- [41] S.H. Lee, W.L. Lee. Site verification and modelling of desiccant-based system as an alternative to conventional air-conditioning systems for wet markets. *Energy* 55 (2013) 1076-1083.
- [42] P. Mavroudaki, C.B. Beggs, P.A. Sleigh, S.P. Halliday. The potential for solar powered single-stage desiccant cooling in Southern Europe. *Applied Thermal Engineering* 22 (2002) 1129–1140.
- [43] D. Song, T. Kim, S. Song, S. Hwang, S.B. Leigh, Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation, *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 1299–1311.
- [44] S. Ginestet, P. Stabat, D. Marchio, Control design of open-cycle desiccant cooling systems using a graphical environment tool, *Building Service Engineering Research and Technology* 24 (2003) 257–269.
- [45] C.E.L. Nóbrega, N.C.L. Brum, A graphical procedure for desiccant cooling cycle design, *Energy* 36 (2011) 1564–1570.

- [46] T.S. Ge, Y.J. Dai, R.Z. Wang. Review on solar powered rotary desiccant wheel cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 476-497.
- [47] S.P. Halliday, C.B. Beggs, P.A. Sleigh. The use of solar desiccant cooling in the UK: a feasibility study. *Applied Thermal Engineering* 22 (2002) 1327-1338.
- [48] A.M. Baniyounes, G. Liu, M.G. Rasul, M.M.K. Khan. Analysis of solar desiccant cooling system for an institutional building in subtropical Queensland, Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 6423-6431.
- [49] J.L. Niu, L.Z. Zhang, H.G. Zuo, Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates, *Energy Build.* 34 (5) (2002) 487–495.

5. COPIA DE LOS ARTÍCULOS QUE AVALAN LA TESIS.

The optimization of the operation of a solar desiccant air handling unit coupled with a radiant floor.

José Manuel Cejudo López, Francisco Fernández Hernández, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 62 (2013) 427-435.

ABSTRACT

Dedicated outdoor air systems complement radiant floor to condition large volume enclosures. The air handling unit copes with ventilation loads and with the latent load of the zone to be conditioned. The floor handles partially or totally the sensible load of the zone. In these systems, the use of a solar desiccant air handling unit can be interesting. The paper proposes a combination of a solar desiccant air handling unit complemented with conventional cooling and heating coils. The objective is to analyse the interest of such an AHU in a real building placed in two different climates in Spain, dry or humid. The control strategy has to be carefully studied because there are many possibilities to reach the required supply conditions to the zone. By means of a physical model implemented in TRNSYS, the interest of the proposed air handling unit is demonstrated in humid climates. Compared with conventional system, the solar desiccant alternative has 35% less of energy consumption. On the contrary, in dry climates the utility of the desiccant wheel is very limited and their use is no justified.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.030>

Influence of the desiccant wheel effectiveness method approaches, with fix and variable effectiveness parameters, on the performance results of an airport air-conditioning system.

Celestino R. Ruivo, Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López.

Energy Conversion and Management 94 (2015) 458-471.

ABSTRACT

This work focuses on the dynamic simulation of an air conditioning system of an airport located in the Mediterranean coast of Andalusia-Spain. It incorporates a desiccant dedicated outdoor air system that operates under variable air volume control strategy. This unit is coupled to a solar source thermal system and to a source heat pump. Several versions of the effectiveness method, applied to the desiccant wheel and based on variable and fix effectiveness parameters, are tested. It is clearly demonstrated that simple approaches based on constant effectiveness parameters, which have been commonly adopted by several authors, provide questionable results.

A parametric study investigating the influence of imposing different ranges for the regeneration temperature (minimum of 50°C and maximum of 80°C) and for the airflow rates (maximum inlet mass velocity of 3 kg s⁻¹ m⁻²) on the performance results of the system is conducted by considering a suitable approach based on variable effectiveness parameters. Depending on the version of the case simulated: i) the electrical coefficient of performance of the system varies from 1.22 to 4.07 and ii) the fraction of time period on August that the system is not able to control the humidity of the zone ranges from 0 to 0.2715.

The best case providing controllability of the humidity of the zone during the whole period is characterized by a regeneration temperature range of 50–70°C and constant airflow rate (inlet mass velocity of 3 kg s⁻¹ m⁻²). The coefficient of performance in this case is 3.2.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.090>

A new desiccant channel to be integrated in building façades.

Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López, Fernando Domínguez Muñoz, Antonio Carrillo Andrés.

Energy and Buildings 86 (2015) 318-327.

ABSTRACT

Desiccant systems are useful to remove latent load from ventilation air in HVAC systems. Sometimes, desiccant wheels complement the treatment in dedicated outdoor units.

This paper proposes a new system that incorporates two layers of solid desiccant inside each side of a ventilated façade. The regeneration of the desiccant is achieved by passing hot air, given by a solar collector module also incorporated into the façade.

A detailed mathematical model, based on the water mass and heat transfer equations, gives the capacity of the system. In a Mediterranean climate, the maximum latent load that can be removed by the system reaches 30 W per linear meter of façade. The main variable that determines the capacity of the system is solar radiation, although the humidity ratio and the dry temperature of the outside air have also to be considered.

Finally, a very simple model based on efficiency is developed. The relative error of the simple model ranges between 10% and 20% depending on climatic conditions.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.009>