

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL PARA LA EXPERIMENTACIÓN DE RUEDAS DESECANTES

COMINO MONTILLA, Francisco ⁽¹⁾; **RUIZ DE ADANA SANTIAGO, Manuel** ⁽¹⁾

CEREZUELA PARISH, Adoración ⁽²⁾; **ZAMORA GARCÍA, Miguel** ⁽²⁾; **PECI LÓPEZ, Fernando** ⁽¹⁾

p72comof@uco.es

⁽¹⁾Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada

⁽²⁾CIAT, Departamento de I+D+i. Pol. Llanos de Jarata s/n. 14550 Montilla, Córdoba, España.

RESUMEN

La información comercial disponible de ruedas desecantes es limitada en muchos casos. Sin embargo, el diseño de algunos sistemas de tratamiento de aire requiere un conocimiento detallado del comportamiento de las ruedas desecantes bajo distintas condiciones operativas.

En este trabajo, se presenta el diseño y construcción de una planta experimental para el ensayo de ruedas desecantes. La planta experimental se compone de unidades de tratamiento de aire así como equipos humidificadores. Un sistema de monitorización permite hacer un seguimiento de los parámetros relevantes de funcionamiento, como caudal de aire, temperatura y humedad.

El trabajo recoge resultados de las pruebas de servicio realizadas para la puesta en funcionamiento de todos los equipos que componen la planta experimental. Estas pruebas analizan los consumos eléctricos, los caudales de aire para diferentes situaciones de trabajo, la capacidad térmica de los equipos o el sistema de control de temperatura y humedad del aire.

La planta experimental permite ensayar ruedas desecantes en distintas condiciones de funcionamiento. Los resultados experimentales permiten obtener información relevante a partir de la cual se realiza la caracterización de ruedas desecantes.

Palabras clave: deshumidificación, rueda desecante, planta experimental.

1. Introducción

El objetivo principal de un sistema climatización es proporcionar unas condiciones ambientales adecuadas para obtener el confort térmico. En regiones cálidas y húmedas del sur de Europa, como ciudades próximas al mar Mediterráneo, el consumo eléctrico en verano es muy elevado, debido a las condiciones climáticas exteriores y a la enorme población turística, siendo muy importante los costos de operación de los sistemas de aire acondicionado, por lo que, es necesario realizar una buena elección del sistema de climatización. En el ámbito de la climatización de edificios, las aportaciones latentes procedentes del aire exterior o del propio local producen un incremento en el contenido de vapor de agua del aire, por lo que es necesario emplear sistemas para reducir y controlar la humedad absoluta del aire.

Nomenclatura

HR	Humedad relativa [%]
P	Presión [mbar]
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
T	Tiempo [s]
T	Temperatura [°C]
T_r	Temperatura de rocío [°C]
V	Tensión eléctrica [V]
W	Potencia eléctrica [kW]
ZN	Zona neutra
Símbolos griegos	
Δ	Diferencial
ω	Humedad absoluta [g/kg]

Los sistemas de deshumidificación basados en sistemas desecantes, atraen la humedad del aire creando un área de baja presión de vapor de agua en la superficie del desecante. Debido a la diferencia entre la presión parcial de vapor de agua en el aire y la existente en la superficie del desecante, las moléculas de agua se mueven desde el aire al desecante, de forma que el aire se deshumidifica. La corriente de aire que se desea deshumidificar se denomina aire de proceso. Los sistemas desecantes requieren emplear una energía para regenerar el desecante, eliminando la humedad del desecante. Esta energía de reactivación o regeneración permite extraer la humedad del desecante para poder iniciar un nuevo ciclo desecante.

La rueda desecante es un equipo de deshumidificación de aire, el cual consta de una rueda giratoria que contiene una estructura semi-cerámica, similar a cartón corrugado, que se integra en la forma de la rueda, figura 1. La rueda gira lentamente, típicamente entre 10 y 40 rph, intercambiando humedad entre las corrientes de aire de proceso y aire de regeneración.

Diversos trabajos de investigación experimentales y numéricos han sido realizados para la caracterización de los parámetros de funcionamiento que influyen en el comportamiento global de las ruedas desecantes [1][2][3]. Sin embargo, los enfoques adoptados en la mayoría de los trabajos no son muy prácticos.

En otros trabajos de investigación se han desarrollado modelos matemáticos empíricos [4][5][6], los cuales estiman el comportamiento de la ruedas desecantes. Sin embargo los modelos matemáticos hay que interpretarlos como una aproximación a los resultados reales de funcionamiento de la rueda desecante, siendo válidos para los rangos de las variables que fueron validados.

Dada la falta de datos experimentales para el estudio de comportamiento de la rueda desecante, resulta adecuada la construcción de una planta experimental, con la cual estudiar empíricamente los procesos de transferencia de calor y masa entre la superficie de la rueda desecante y las corrientes de aire que pasan por la rueda.

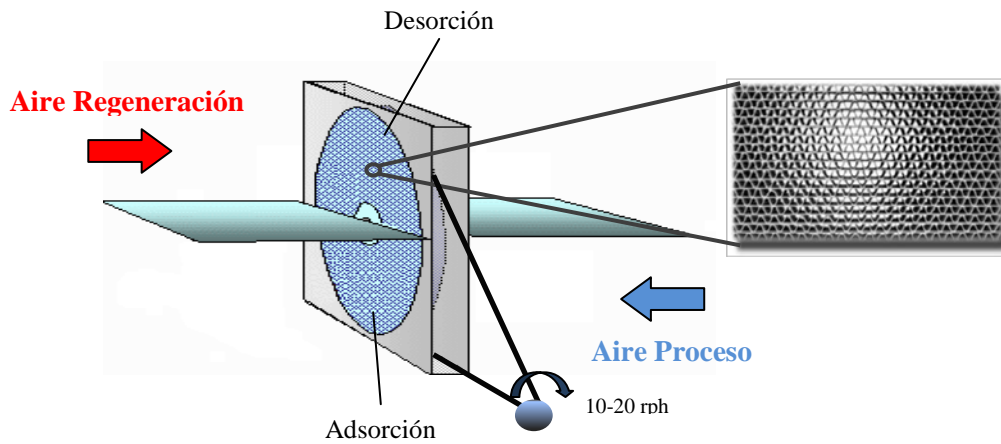


Figura 1: Esquema de una rueda desecante.

2. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es el montaje, instalación, puesta a punto y control de la planta experimental, la cual permita una caracterización de la rueda desecante, determinando su comportamiento.

3. Configuración general experimental

En la figura 2 se muestra un esquema del diagrama de la planta experimental. Se aplicó un diseño de contraflujo entre dos corrientes de aire a través de una rueda desecante. Dos circuitos de aire fueron contruidos con chapa galvanizada, aislados térmicamente con una manta termo acústica de fibra de vidrio y revestido de un velo negro, para simular las condiciones de aire de proceso y aire de regeneración.

Para simular las ganancias sensibles y latentes del aire de proceso y aire de regeneración, en la planta experimental se ha instalado componentes que realizan el tratamiento del aire para adecuarlo a las condiciones requeridas, en temperatura, humedad y caudal del aire. Los elementos que forman ambos sistemas de aire proceso y aire de regeneración son una unidad de tratamiento de aire, UTA, y un humidificador isotérmico. La UTA, consta de ventilador de impulsión y retorno, baterías de agua fría y/o caliente, además, se compone de una resistencia eléctrica de postcalentamiento. Los humidificadores instalados en la planta experimental son equipos que producen vapor no presurizado por medio de elementos resistivos inmersos en agua contenida en un calderín, hasta alcanzarse la temperatura de ebullición. El vapor producido es distribuido en el aire que circula por los conductos de la instalación mediante una lanza de distribución de vapor.

La rueda desecante se ubica en una carcasa con juntas de goma entre ambos lados de proceso y regeneración, accionada por un motor de velocidad constante a través de un engranaje. Los canales de la rueda desecante, en forma de panal de abeja, están compuestos de gel sílice y silicatos metálicos unidos químicamente en un tejido de fibras inorgánicas. La rueda desecante se caracteriza con una relación de áreas 50% de flujo de aire de proceso y 50 % de flujo de aire de regeneración. Algunos de los detalles de diseño pertenecientes a la rueda se muestran en la tabla 1.

Cuatro ventiladores centrífugos de velocidad variable fueron instalados, dos aguas abajo y dos aguas arriba, con los cuales se regula la velocidad de flujo de aire. Para variar la velocidad del aire en la instalación, los ventiladores disponen de un potenciómetro, el cual permite variar la tensión eléctrica del ventilador. Además, para lograr mayor estabilidad del flujo de aire, se ha instalado en los conductos cuatro acondicionadores de flujo, un acondicionador antes de cada punto de medida de caudal y otro acondicionador después. Estos elementos reducen las distorsiones de flujo de aire que se produce tras pasar por los diferentes equipos que compone la planta.

La instalación experimental está compuesta de dos cajas de mezcla, las cuales permiten la recirculación de ambas corrientes de aire, o bien, la expulsión del aire tratado y/o la entrada del aire nuevo. Asimismo, las cajas permiten la mezcla del aire exterior con el aire tratado por la planta experimental, en el porcentaje de aire requerido. Las cajas de mezclan están instaladas después de los elementos de tratamiento de aire, tanto en proceso como en regeneración.

Especificaciones de la rueda desecante.

Parámetros	Valores
Diámetro del rotor	550 mm
Anchura	200 mm
Material desecante	Silica-gel
Forma del canal	Panal de abeja
Capacidad desecante nominal	15 kg/h
Caudal nominal	2300 m ³ /h
Velocidad del rotor	42 rph
Peso	57 kg
Potencia	1x230 V – 50/60 Hz

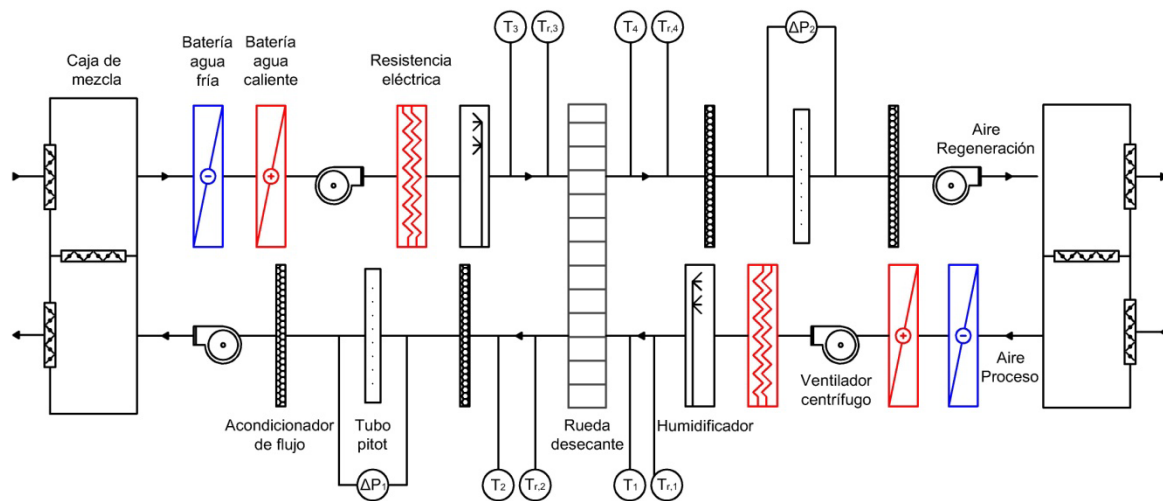


Figura 2: Esquema de la planta experimental y su instrumentación.

4. Sistema de control

El sistema de control empleado en la planta experimental controla las variables temperatura y humedad del aire a la salida en los sistemas de aire proceso y regeneración, estados 1 y 3, respectivamente, ver figura 2. En la figura 3, se muestra mediante un diagrama de bloques la estrategia del sistema de control para obtener las condiciones deseadas del aire de salida, siendo la posición de las electroválvulas instaladas en las baterías de calefacción y refrigeración, la potencia eléctrica de las resistencias eléctricas y la potencia eléctrica de los humidificadores, las variables de control.

El controlador empleado permite la gestión de las unidades de tratamiento de aire, mediante la conexión de sondas de temperatura y humedad.

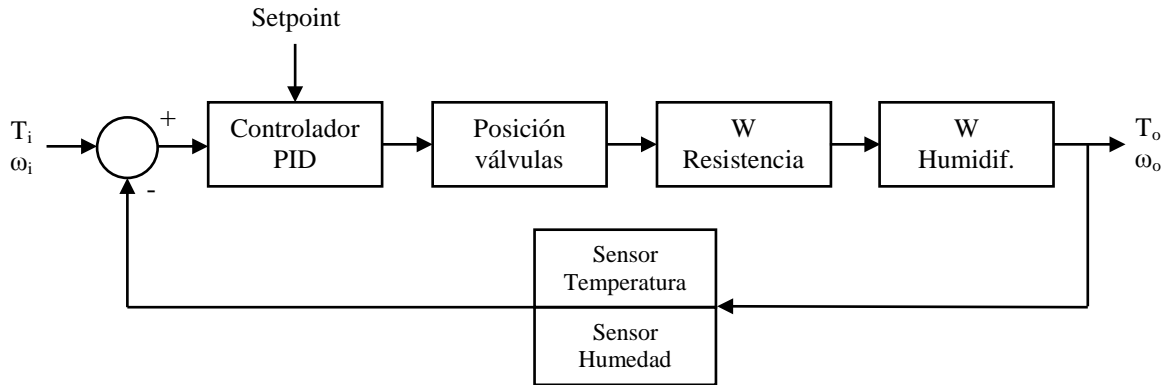


Figura 3: Diagrama de la estrategia del sistema de control.

5. Instrumentación y monitorización de datos

La planta experimental dispone de un sistema de monitorización, el cual permite hacer un seguimiento de los valores recopilados por todos los sensores y realizar un posterior análisis. En la tabla 3 se recoge la instrumentación de medida que se emplea en la instalación experimental, indicándose el tipo de sonda y su incertidumbre de medida. La instrumentación empleada son sondas de temperatura PT100, sondas de temperatura de rocío de espejo frío y capacitivo, y un transmisor de presión diferencial, con el cual se mide el caudal que circula en el sistema experimental a su paso por los tubos de Pitot.

Especificaciones de los sensores.

Sondas	Tipo	Incertidumbre de medida
T	PT 100	$\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$
T _{r1}	Espejo frío	$\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$
T _{r2}	Capacitivas	$\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$
HR	0-100%	$\pm 3 \%$
ΔP	Trans. presión diferencia	$\pm 0,3 \%$ (0 a 1 mbar)

Para el sistema de monitorización se dispone de una interfaz para visualizar los datos capturados en la pantalla del ordenador. Este nos permite obtener estadísticas, gráficas o realizar consultas de un historial de datos.

Debido a las dimensiones de la planta experimental, los tramos de conductos de aire que conectan elementos de tratamiento de aire corresponden a tramos de conductos de longitud reducida. Estos tramos de conductos de poca longitud, pueden condicionar la homogeneización de las condiciones del aire después de su paso por los elementos de tratamiento de temperatura, baterías, y tratamiento de humedad, humidificadores. Por este motivo, se han instalado soportes metálicos en las estaciones de medida, que permiten desplazar las sondas en sentido horizontal. Este sistema permite realizar la medición de las condiciones del aire a diferentes distancias del eje horizontal.

Para garantizar y verificar el buen funcionamiento de los equipos de medida es necesario su calibración. El procedimiento de calibración permite determinar el estado operacional de los sensores durante el periodo de funcionamiento. En el presente trabajo solo se han calibrado las sondas de temperatura de aire seco, dado que, para el resto de instrumentación el fabricante ha facilitado un certificado de calibración de sondas.

6. Metodología

Con el propósito de obtener las capacidades operativas y asegurar la obtención de resultados experimentales fiables, se ha seguido la metodología mostrada en la tabla 4 para la puesta en marcha de la planta piloto.

En primer lugar se han calibrado las sondas empleadas, y se han instalado y probado. Todas las sondas de medida están conectadas externamente a un equipo de registro de datos, que permite registrar la

información de todas las sondas en un equipo informático para su posterior corrección, análisis y postprocesado. A continuación, se ha realizado las pruebas correspondientes al análisis de capacidad y control de los equipos que componen la planta experimental. Para ello, los equipos se prueban en diferentes condiciones de funcionamiento, variando la temperatura, humedad y caudal del aire. Con estas pruebas, la planta experimental está en condiciones de realizar la caracterización de la rueda desecante.

Metodología para la puesta en marcha de la planta experimental.

Pasos		Ensayos	
Calibración e instalación de las sondas			
Sondas	1	Temperatura (PT100)	
	2	Humedad (Punto de rocío)	
	3	Humedad (Espejo frío)	
	4	Caudal (Transmisor de Presión Diferencial)	
Capacidad y control de los equipos			
Equipos	5	Baterías agua fría UTA	
	6	Baterías agua caliente UTA	
	7	Resistencias UTA	
	8	Humidificadores	
Estudio completo			
Climatización	9	Rueda desecante	

7. Pruebas de servicio

7.1. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico de los elementos que componen la planta experimental se registra mediante un analizador de redes. Este instrumento permite una medida programable y un registro de los parámetros eléctricos en una red monofásica y trifásica. La aplicación principal del analizador de redes en esta planta experimental es un estudio de las potencias eléctricas consumidas en los equipos que la componen, mediante la medición de la intensidad y tensión de corriente.

7.2. Caudal de aire

La instalación está compuesta de 4 ventiladores centrífugos de caudal variable. El ajuste de la velocidad de cada ventilador permite disponer en la planta experimental de un determinado caudal de aire. Se han determinado los caudales de aire que circulan por la planta experimental en dos condiciones de funcionamiento. En primer lugar, cuando la instalación trabaja con todo aire exterior, expulsando e impulsando todo el aire atmosférico. Para este caso el acoplamiento se produce con 2 ventiladores en el lado de proceso y 2 ventiladores en el lado de regeneración. El segundo caso, cuando la instalación trabaja con aire en recirculación, circulando todo el tiempo el mismo aire en la planta. De esta manera se acoplan los 4 ventiladores. En la tabla 5 se muestra los caudales de aire obtenidos para ambas pruebas, así como sus respectivos RMSE.

Rangos de los caudales de aire en la planta experimental.

	Tensión [V]	Aire de proceso		Aire de regeneración	
		Caudal [m ³ /h]	RMSE [m ³ /h]	Caudal [m ³ /h]	RMSE [m ³ /h]
Todo aire exterior	Máxima	2088,21	± 31,23	1670,88	± 34,81
	Mínima	1216,49	± 15,38	1040,99	± 20,01
Aire en recirculación	Máxima	2142,11	± 35,63	2142,11	± 38,59
	Mínima	1096,28	± 9,71	1096,28	± 16,79

7.3. Capacidad de los equipos de climatización

En la tabla 5 se muestra los rangos de temperatura y humedad absoluta del aire que pueden mantenerse de forma continua y estable en la planta experimental, para la corriente de aire de proceso y aire de regeneración. Estos rangos han sido obtenidos para el caudal máximo de aire que circula en la planta experimental, expuesto en la tabla 4. Los valores máximos alcanzados para aire de proceso son 35°C y 31 g/kg, y los valores mínimos 15°C y 8,5 g/kg. En el caso del aire de regeneración, los valores máximos alcanzados son 45 °C y 31 g/kg, y los valores mínimos 29 °C y 9 g/kg, ver figura 4.

Rangos de trabajo de temperatura y humedad absoluta del aire en la planta experimental.

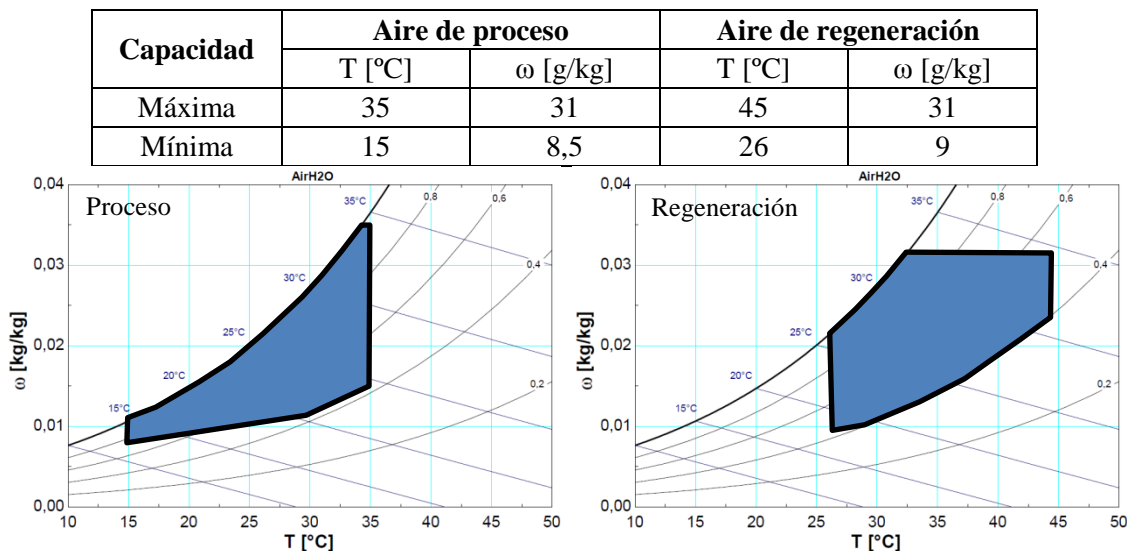


Figura 4: Rangos de trabajo para a) sistema de proceso; b) sistema de regeneración.

7.4. Control de temperatura y humedad del aire

Debido a la dependencia de la humedad relativa del aire con la temperatura, en primer lugar, se realiza la regulación de la temperatura del aire, y a continuación, el control de la humedad del aire.

El equipo de control permite la programación de diferentes tipos de regulación. Para el control de la temperatura y humedad, se ha empleado un control PID. En la tabla 6 se muestra la configuración de la regulación para ambos parámetros con el objetivo de conseguir la máxima estabilidad en temperatura y humedad relativa. El procedimiento seguido para obtener dicha configuración fue la realización de múltiples ensayos variando los parámetros de control, como el diferencial de calor y frío, la zona neutra de calor y frío o el tiempo integral y derivativo.

Configuración de control de temperatura y humedad absoluta del aire.

Variable	ZN calor	ZN frío	Δ calor	Δ frío	t_{integral} [s]	$t_{\text{derivativo}}$ [s]	
T [°C]	0	0	6	5	1000	30	
AI	HR [%]	0	0	10	10	1000	40

analizar las tres acciones de la regulación, proporcional, integral y derivativo, se observa que el tiempo de la acción integral seleccionado es muy alto, dado que el tiempo de actuación de los elementos de regulación es muy elevado (hasta 80 s las electroválvulas de las baterías).

La acción integral genera una corrección proporcional a la integral del error y asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente el error de seguimiento se reduce al mínimo. Sin embargo, el tiempo necesario para la estabilidad es muy alto, habitualmente se requieren 40 minutos para alcanzar la estabilidad de la temperatura del aire. Las oscilaciones máximas generadas para la temperatura del aire son de $\pm 0,35^\circ\text{C}$, para el rango de temperatura de impulsión 15-45°C.

Para la configuración de control de humedad seleccionada, las oscilaciones máximas de la humedad absoluta cuando se realiza la deshumectación del aire son muy pequeñas, $\pm 0,75$ g/kg. Sin embargo, las

oscilaciones se incrementan cuando se realiza la humidificación del aire, dado que el tiempo de actuación de los humidificadores es muy alto. Las oscilaciones máximas de la humedad absoluta cuando se realiza la humidificación del aire son de ± 2 g/kg. Para alcanzar dicha estabilidad del aire es necesario emplear 60 minutos.

8. Conclusiones

Del presente trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado y construido una planta experimental con la que se pueden realizar los ensayos necesarios para caracterizar el comportamiento de una rueda desecante.
- Con las pruebas de servicio realizadas se han establecido las condiciones de ensayo en la planta experimental. La planta experimental permite ensayar en rangos de temperatura de entre 15°C a 45°C, rangos de humedad absoluta de entre 8,5 a 31 g/kg y rangos de caudal del aire de entre 1100 a 2300 m³/h, respectivamente.
- Con el sistema de control instalado en la planta, se obtiene una estabilidad de temperatura del aire de $\pm 0,35$ °C, así como, una estabilidad de la humedad absoluta del aire de ± 2 g/kg. El tiempo medio necesario para alcanzar la estabilidad del aire es de 60 minutos.

Por tanto, la planta experimental permite realizar ensayos experimentales de ruedas desecantes en distintas condiciones de funcionamiento dentro de los rangos establecidos y en unas condiciones operativas de temperatura y humedad relativa muy estables. Los resultados experimentales permiten obtener información relevante a partir de la cual se realiza la caracterización de ruedas desecantes.

9. Agradecimientos

El presente trabajo es parte del proyecto DESSECA *Investigación en deshumectación y secado de aire*, promovido por la empresa CIAT y cofinanciado por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía Expte. IDEA 360097 y por la Corporación Tecnológica de Andalucía Expte CTA 12/612. (2012-2014)

10. Referencias

- [1] G. PANARAS, E. MATHIOULAKIS, y V. BELESSIOTIS, «Solid desiccant air-conditioning systems - Design parameters», *ENERGY*, vol. 36, n.º 5, pp. 2399-2406, may 2011.
- [2] G. ANGRISANI, F. MINICHELLO, C. ROSELLI, y M. SASSO, «Experimental analysis on the dehumidification and thermal performance of a desiccant wheel», *Applied Energy*, vol. 92, pp. 563-572, 2012.
- [3] S. YAMAGUCHI y K. SAITO, «Numerical and experimental performance analysis of rotary desiccant wheels», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 60, pp. 51-60, 2013.
- [4] J. Y. SAN y S. C. HSIAU, «Effect of axial solid heta-conduction and mass diffusion in a rotary heat and mass regenerator», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 36, n.º 8, pp. 2051-2059, 1993.
- [5] C. R. RUIVO, J. J. COSTA, y A. R. FIGUEIREDO, «On the behaviour of hygroscopic wheels: Part I - channel modelling», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, n.º 23-24, pp. 4812-4822, 2007.
- [6] F. E. NIA, D. VAN PAASSEN, y M. H. SAIDI, «Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning», *Energy and Buildings*, vol. 38, n.º 10, pp. 1230-1239, 2006.