

Influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento de un deshumidificador desecante. Parte I

T. Carbonell -Morales, M. DePaepe

Recibido el 9 de octubre de 2008; aceptado el 22 de diciembre de 2008

Resumen

Un estudio experimental ha sido llevado a cabo en una rueda desecante con el objetivo de mostrar la influencia de las condiciones ambientales, en el comportamiento de este sistema. Temperatura, humedad relativa fueron medidas y se muestran los perfiles de estos parámetros en el proceso de deshumidificación. La información experimental obtenida fue comprada con los datos reportados por otros autores que estudian este tema.

Palabras claves: rueda desecante, sistemas de deshumidificación, deshumidificador rotatorio.

Influence of the environmental conditions in the behavior of a desiccant dehumidifier. Part I

Abstract

An experimental study was carried out in a desiccant wheel. Temperature and relative humidity were measured to study their influence on the behavior of the desiccant wheel. The temperature and humidity profiles during the dehumidification process were obtained and compared with the information reported by other authors.

Key words: desiccant wheel, dehumidification systems, rotary dehumidifier

1. Introducción.

Con el incremento del precio del petróleo en el mercado internacional, los problemas medioambientales ocasionados por el uso de las sustancias fluorocarbonadas, se impone trabajar por mantener el nivel de confort y calidad de vida alcanzado hasta estos momentos por el hombre, pero usando tecnologías limpias que propicien el ahorro de energía.

En la última década, la tecnología de deshumidificación por rotores desecantes ha surgido como una alternativa o como un suplemento de los sistemas de deshumidificación por enfriamiento o sistemas convencionales como también se les conoce. Siendo significativos los beneficios de los sistemas desecantes rotatorios cuando la fracción de la carga latente es superior al 25% y la energía térmica requerida para la reactivación del desecante esta fácilmente disponible.

En los últimos años, con el desarrollo de esta tecnología, los sistemas desecantes han estado funcionando como procesadores de aire exterior. Recientes cambios en los códigos han incrementado la cantidad de aire exterior que es requerida en edificios públicos.

Las habitaciones y los salones de conferencias de hoteles, moteles o centros de convenciones, tienen grandes variaciones de carga sensible, ya que la gente va y viene y aquella cambia radicalmente. La carga latente, por otra parte, es más estable debido a que constantemente hace ingresar aire fresco al edificio, y trae consigo el vapor de agua. Convencionalmente los sistemas de aire acondicionado controlan tan rápido la temperatura que al parar dan tiempo a la formación de condensados en las paredes y objetos, causando malos olores y daños en los muebles y la estructura del edificio. Ante esta situación, la combinación de estas dos tecnologías, la convencional y la deshumidificación por desecante, se presenta como una variante técnico-económica muy factible. En instalaciones como quirófanos y cuartos limpios esta tecnología se está introduciendo con buenos resultados.

A pesar de que la tecnología de rueda desecante cada vez gana más uso y comienza a hacerse

familiar para los profesionales que trabajan el acondicionamiento del aire, aún presenta algunas limitaciones, como es que tiene un menor COP comparada con los sistemas convencionales de enfriamiento, pero la ventaja de poder controlar de forma independiente la carga latente y sensible, no puede ser ignorada. Por eso se trabaja en la optimización de estos sistemas con vistas a elevar el COP y la economía energética de estos sistemas.

Simonson y Besant [1],[2] presentan un conjunto de correlaciones para predecir la efectividad sensible, latente y total de una rueda desecante cuando las condiciones de operación son conocidas. Zang y Niu [3] muestran un nuevo sistema de enfriamiento con desecante, que utiliza un deshumidificador desecante fabricado por la compañía *Munters*. Para predecir el funcionamiento de este sistema proponen un modelo matemático.

Cejudo y otros autores [4] declaran que la rueda desecante es el corazón de los sistemas de enfriamiento con desecantes. Ellos proponen dos métodos para la modelación del comportamiento de la rueda desecante, el modelo físico basado en los balances de energía y masa de los procesos que tienen lugar y el modelado a través de redes neuronales el que permita calcular las condiciones de entrada y salida de este sistema.

Subramanyan y otros [5] estudian un sistema compuesto por una rueda desecante y un sistema convencional de enfriamiento con el objetivo de demostrar que el sistema propuesto puede ser usado para el acondicionamiento del aire, logrando un COP ligeramente inferior al de los sistemas convencionales.

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre esta tecnología han estado dirigidas a modelar y simular el comportamiento de los deshumidificadores desecantes rotatorios, usando diferentes métodos. Maclaine-Cross y Banks [6] y Banks en [7,8] utilizaron el método de las analogías lineales y no lineales. Zheng y Worek [9] proponen y aplican la técnica de diferencias finitas para la simulación numérica de estos sistemas. Tanthapanichakoon u otros [10] presentan un modelo matemático simple para predecir el

comportamiento de una rueda desecante del tipo *Honeycombe*.

En contraste existe muy poca información experimental acerca del comportamiento de estos sistemas. Este artículo tiene como intención mostrar los resultados obtenidos del estudio experimental llevado a cabo, fundamentalmente la influencia de los factores ambientales, temperatura y humedad relativa en el comportamiento de una rueda desecante, que usa como desecante la silica gel.

2. Tecnología de deshumidificación por rueda desecante e instalación experimental.

Los desecantes son sustancias que tienen una gran afinidad por el agua, propiedad que les permite atrapar la humedad del aire circundante. Existen desecantes sólidos y líquidos, lo que los diferencia desde el punto de vista funcional y los clasifica en absorbentes (líquidos) y adsorbentes (sólidos). Comercialmente los más utilizados en estos momentos son la zeolita, la silica gel y el cloruro de litio.

La mayoría de las ruedas desecantes son hechas de sílica gel o zeolita (tamiz molecular), unido a un sustrato de fibras de vidrio, papel o algunas veces aluminio. Cuando se mira desde el aire la rueda asume la apariencia de un fino y enredado material de panal de abejas (*HoneyCombe*) con muchos canales pequeños; esta estructura se caracteriza por ser ligera, durable y garantiza gran superficie de contacto entre el desecante y el aire. En la figura 1 se muestran las configuraciones más usadas.

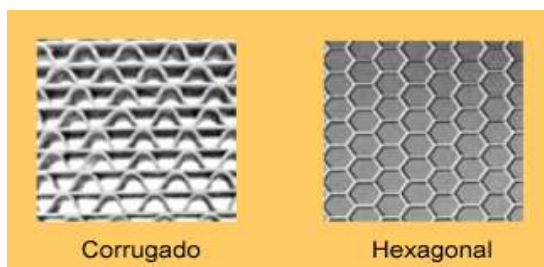


Figura 1. Configuraciones típicas.

Los canales, como las aletas de una espiral, fuerzan la trayectoria del aire a lo largo del desecante concentrado. El desecante produce una atracción de las moléculas del aire a través de las microporosidades, basada esencialmente en el tamaño de los poros. De esta manera, el silica gel y el tamiz molecular atraen mecánicamente el agua como una esponja.

La rueda gira lentamente entre los flujos de proceso y reactivación. El aire de proceso fluye entre los canales formados y el desecante impregnado en la estructura va adsorbiendo la humedad del aire hasta que se satura, lo que aumenta la presión de vapor de su superficie. Cuando la rueda entra en el sector de reactivación, el desecante es calentado por el flujo de aire de reactivación, y se elimina la humedad en este. Una vez terminada la etapa de reactivación, el desecante caliente vuelve a la zona de proceso, donde se enfría al ponerse en contacto con una pequeña porción de aire de proceso; así queda listo para volver a adsorber humedad.

Este principio de funcionamiento se ilustra en el esquema de la figura 2.

En una aplicación general, 75% de la rueda hace contacto con el aire, mientras el otro 25 % forma parte de la cámara de regeneración (3:1), aunque esta relación varía cuando existen ruedas de 50/50 o media luna como también se les conoce.

Las ruedas desecantes, por naturaleza, eliminan humedad (calor latente) del aire exterior o carga interna. Estas no reducen, por sí solas, la carga de energía. Simplemente reemplazan la carga latente (humedad) con un incremento de carga sensible (temperatura) y eliminan la humedad del aire. Estos equipos están teniendo un impacto muy positivo en la mayoría de los procesos donde se aplican, siempre que se desee reducir cargas de humedad interna, mantener o bajar la humedad relativa específica o el punto de rocío y procesar altas cargas latentes del aire exterior, esta tecnología será muy factible, ya que muchas veces más de uno de estos propósitos pueden ser realizados por la misma rueda.

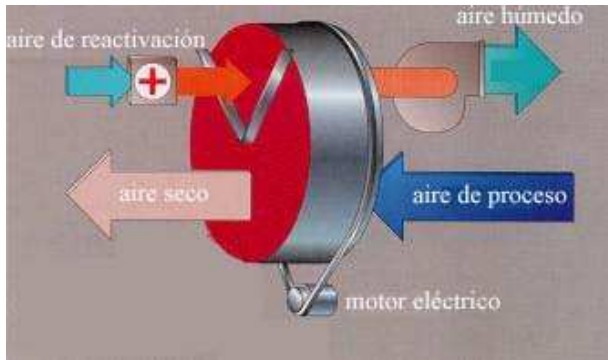


Figura 2. Principio de funcionamiento de un deshumidificador desecante

La figura 3 muestra la foto de la rueda desecante usada en este estudio experimental.

Esta rueda desecante fue construida por la compañía *Desiccant Internacional Rotor (DRI)*, la misma tiene un diámetro de 370mm y 200mm de profundidad, su configuración es 3:1, lo que quiere decir que el 75% de su área será usada para deshumidificar y el 25% se usará para la reactivación del desecante que en este caso es la silica gel, este deshumidificador puede procesar flujos de aire hasta 350 m³/h.

La figura 4 muestra un esquema de la instalación experimental, fundamentalmente esta compuesta por un humidificador, que permitirá estudiar el comportamiento de la rueda desecante cuando variemos el contenido de humedad del aire que queremos deshumidificar, dos calentadores

eléctricos, uno utilizado para variar la temperatura del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante y el otro es quien calienta el aire usado en la etapa de regeneración, dos ventiladores que mueven las corrientes de aire de proceso y regeneración, la rueda desecante y los sensores usados para medir los parámetros objetos de estudio.



Figura 3. DRI 370x200mm

En el punto 0 se encuentra ubicado un sensor de temperatura el cual es usado para medir la temperatura de la corriente de aire de regeneración antes de entrar a la rueda desecante. En los puntos del 1 al 9 están ubicados sensores de temperatura y humedad que permitirán obtener el perfil de temperatura y humedad de las corrientes de aire de proceso y de regeneración.

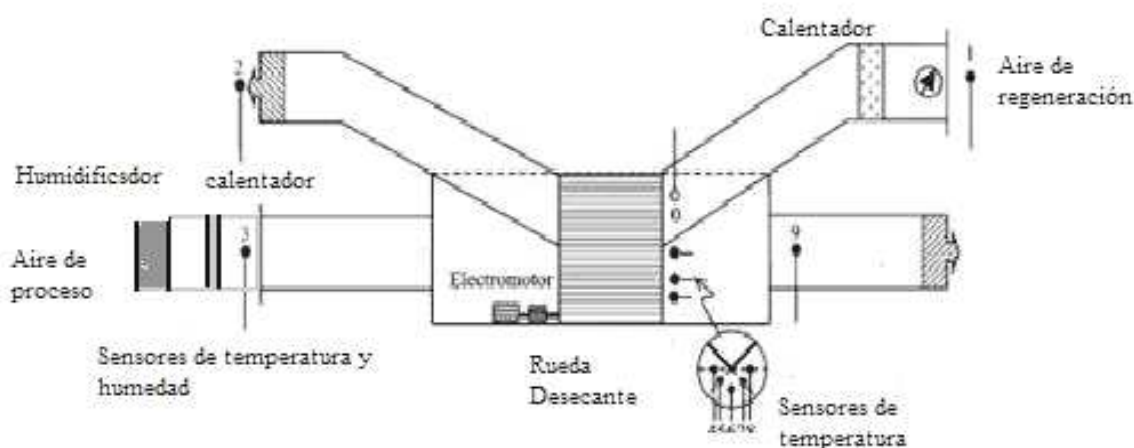


Figura 4. Esquema de la instalación experimental

Los sensores ubicados en los puntos desde el 4-8 son usados para medir la temperatura del aire de proceso a la salida de la rueda desecante en diferentes direcciones radiales.

En el experimento la temperatura y humedad relativa fueron medidas mediante el uso de un sistema de termopares acoplados al software Scanim. La velocidad del aire de proceso fue medida usando un instrumento digital multi - función Testo. En el caso de los sensores 4-8 la información fue recopilada mediante el software Hoboware Pro versión 2.3.0.

Como se ha dicho anteriormente, el estudio experimental tiene como objetivo obtener el perfil de temperatura y humedad en el tiempo mientras ocurre el proceso de deshumidificación. Además de conocer la influencia en el comportamiento del sistema de variables como, temperatura y humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante cuando esta gira a 5 y 30 rph respectivamente. Fueron fijados los siguientes parámetros:

- Temperatura del aire de proceso a la entrada del deshumidificador entre 24-37 °C
- Humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante entre 70-90%
- Temperatura del aire de regeneración a la entrada, 70°C
- Velocidad de rotación de la rueda desecante, 5 y 30 rph
- Flujo del aire de proceso: 0.4222 kg/s
- Flujo del aire de regeneración : 0.1407 kg/s

El comportamiento de la rueda desecante será evaluado basado en tres diferentes criterios: Capacidad de remoción de humedad (ΔW), Coeficiente de rendimiento de la deshumidificación (DCOP) y la efectividad de la rueda desecante [12].

La capacidad de remoción de humedad puede ser expresada como:

$$\Delta W = W_{pi} - W_{po} \quad (1)$$

La humedad absoluta del aire húmedo es definida por:

$$W = 0.62198 \frac{\phi p_{vs}}{B - \phi p_{vs}} \quad (2)$$

El coeficiente de rendimiento de deshumidificación DCOP puede ser expresado como:

$$DCOP = \frac{M_p h_v (W_{pi} - W_{po})}{M_R (h_{Ri} - h_{Ro})} \quad (3)$$

Donde h_{Ri} y h_{Ro} son las entalpías de entrada y salida de la corriente del aire de regeneración respectivamente.

La efectividad sensible y latente de la rueda desecante puede ser calculada por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\varepsilon_{DW1} = \frac{M_p (T_{po} - T_{pi})}{M_R (T_{ri} - T_{ro})} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{DW2} = \frac{M_p (W_{pi} - W_{po})}{M_R (W_{pi} - W_{po,ideal})} \quad (5)$$

En esta última ecuación $W_{po,ideal}$ es la humedad absoluta ideal de la corriente de aire a la salida de la rueda desecante. Asumiendo que el aire es completamente deshumidificado en ese punto, el valor de este parámetro puede ser tomado cero.

3. Discusión de los efectos de los parámetros objeto de estudio en el comportamiento de la rueda desecante

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se puede apreciar la influencia de la temperatura del aire que se quiere procesar, a la entrada de la rueda desecante sobre el comportamiento de este sistema, en este caso el comportamiento del sistema estará vinculado a los perfiles de temperatura y humedad absoluta del aire a la salida de la rueda desecante cuando la misma rota a velocidades de 5 y 30 rph y la humedad relativa del aire de proceso y la temperatura del aire de regeneración han sido fijadas en 70% y 70 °C respectivamente.

Es evidente que a medida que aumenta la temperatura del aire que se quiere procesar, ocurre un incremento en el valor de la temperatura del aire a la salida de la rueda, lo cual se explica por el carácter exotérmico del proceso de adsorción de humedad, obteniéndose perfiles de temperaturas similares en ambas velocidades de rotación, siendo 50°C el valor más alto de temperatura obtenido.

En el caso del proceso de deshumidificación se observa que a medida que aumenta la temperatura del aire a procesar se obtiene un aire más seco, obteniéndose los menores valores en el caso de que la rueda desecante gira a 30rph, este resultado coincide con el reportado en la literatura consultada donde muchos autores refieren la existencia de una velocidad óptima de rotación o lo que es lo mismo, existe una notable

influencia de este parámetro en el comportamiento y rendimiento de la rueda desecante, además de que no se recomienda trabajar a valores muy pequeños de rph. Este aspecto se abordará en la segunda parte de este artículo.

La figura 9 muestra la influencia de los factores ambientales temperatura y humedad relativa (T_{pi} y W_{pi}) en la capacidad de remoción de humedad o deshumidificación (ΔW) para velocidades de rotación de 5 y 30 rph, TR igual a 70°C. Se puede observar que para ambas velocidades de rotación e iguales valores de temperatura del aire se obtuvo que la capacidad de deshumidificación de la rueda está entre 6 y 7 g/kg de aire seco cuando los valores de humedad absoluta del aire a la entrada de la rueda oscilan entre 13.93-15.28 g/kg de aire seco.

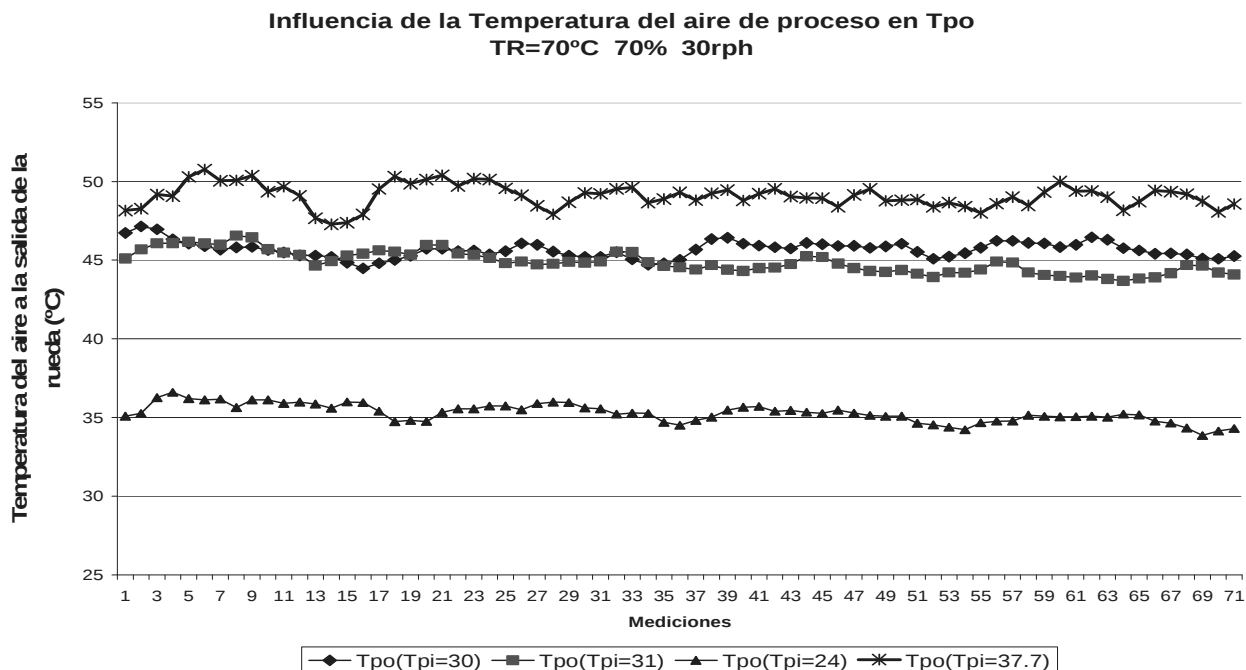


Figura 5. Influencia de la temperatura del aire de proceso en Tpo para 30 rph

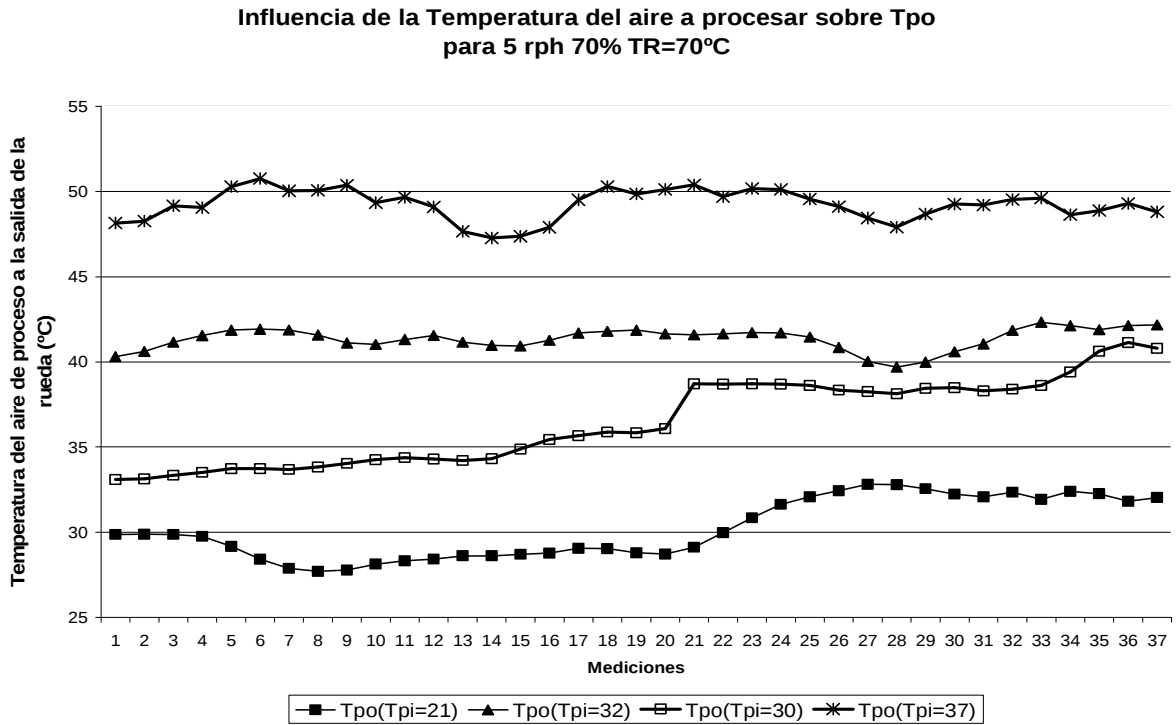


Figura 6. Impacto de la Temperatura del aire de proceso sobre Tpo para 5 rph

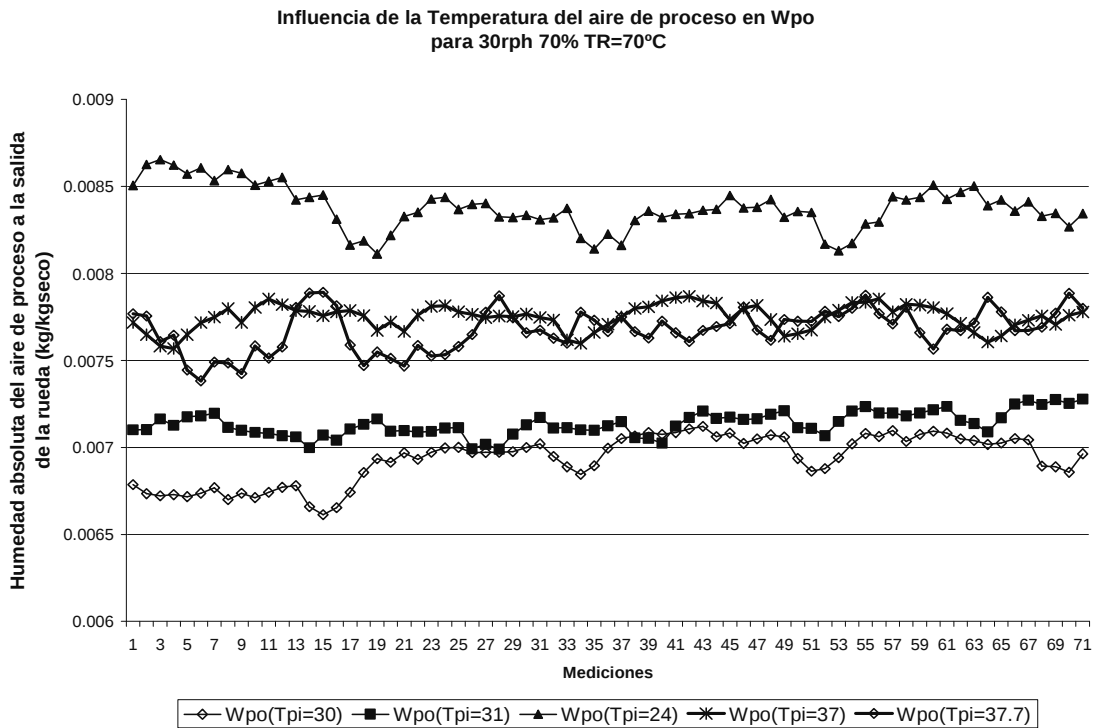


Figura 7. Influencia de la temperatura del aire de proceso en la deshumidificación para 30rph

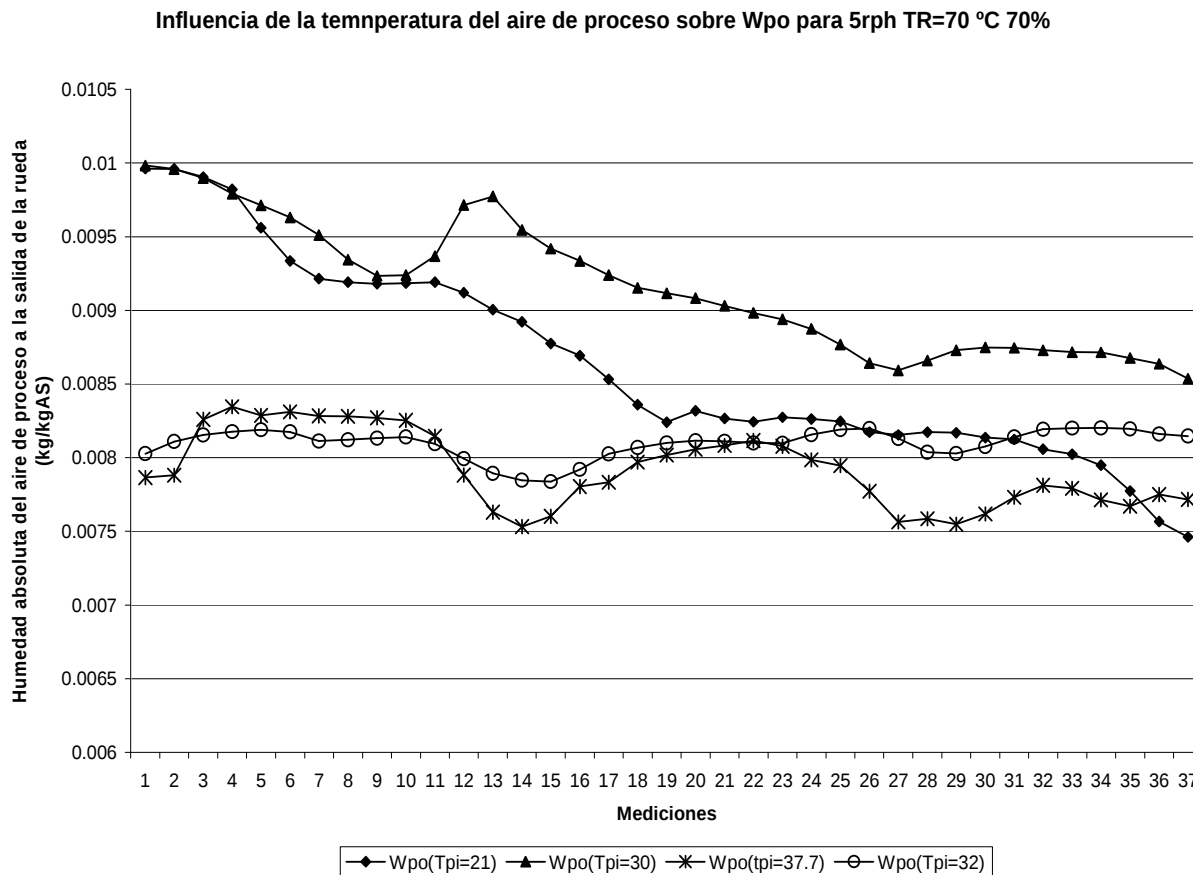


Figura 8. Influencia de la temperatura del aire de proceso en la deshumidificación para 5rph

La influencia de la temperatura del aire de proceso a la entrada de la rueda en las efectividades sensible y latente de la misma puede ser observada en la figura 10, donde ϵ_{DW1} y ϵ_{DW2} fueron obtenidas por las ecuaciones 4 y 5 respectivamente. Para ambas velocidades de rotación de la rueda desecante las efectividades, latente y sensible muestran un incremento con la temperatura hasta valores cercanos a 24 °C, a partir de este punto se observa la tendencia a descender. Para 5 rph el valor promedio de ϵ_{DW1} y ϵ_{DW2} fue 0.9644 y 0.4629 respectivamente. En el caso de 30 rph fue obtenida ϵ_{DW1} igual 0.9186 y ϵ_{DW2} 0.5092.

En la figura 11 se puede apreciar la influencia de la temperatura del aire en el DCOP para las dos velocidades de rotación que han sido estudiadas, cuando la temperatura de regeneración y la humedad del aire de proceso han sido fijadas. Se

aprecia igual tendencia a la observada con las efectividades, el DCOP descende a partir de valores de 30°C, incrementándose después ligeramente. Para 5 rph el valor promedio obtenido es 0.8724 y para 30 rph de 0.8772, ligeramente superior.

4. Comparación de los resultados experimentales.

Los resultados experimentales obtenidos en este estudio han sido comparados con información presentada por otros investigadores sobre este tema y se puede concluir que en todos los casos los valores se encuentran en los rangos reportados. Por ejemplo Jia C.X y Dai J.Y [12] en su estudio comparativo de dos ruedas desecantes reporta valores en el rango de 0.006-0.008 kg/kg.aire seco para el parámetros, capacidad de remoción de humedad. En el caso del DCOP resultados muy similares fueron obtenidos.

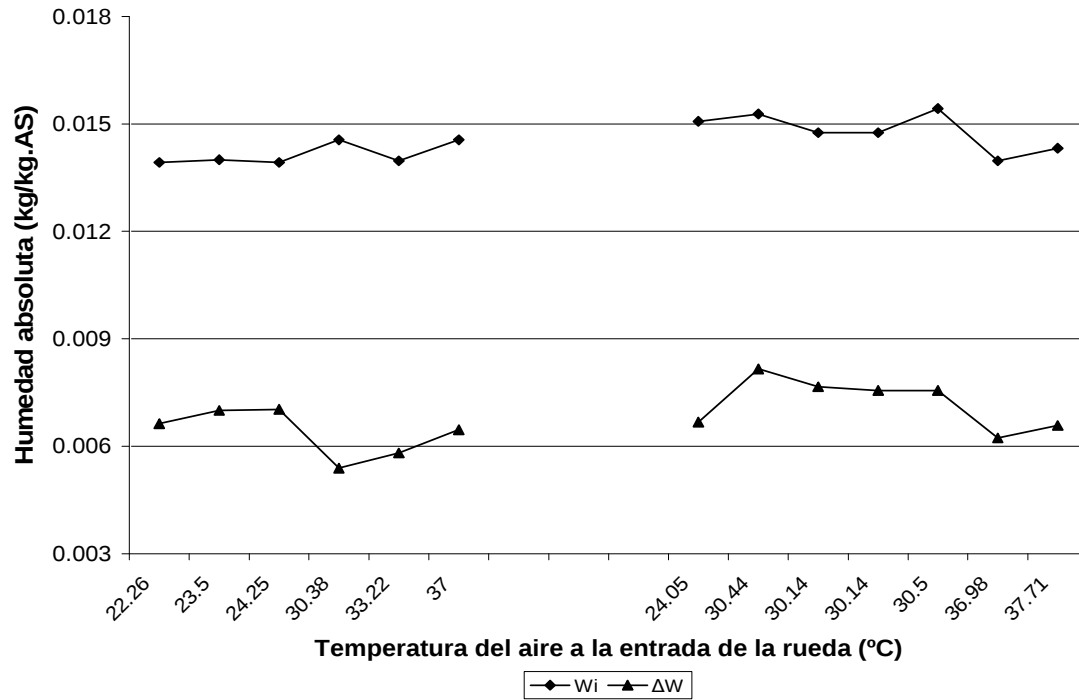


Figura 9. Influencia de la temperatura y la humedad del aire de proceso en ΔW

Impacto de la temperatura de entrada del aire de proceso en las efectividades de la rueda desecante para 5rph and 30 rph $\phi_{pi}=70\%$ TR=70°C

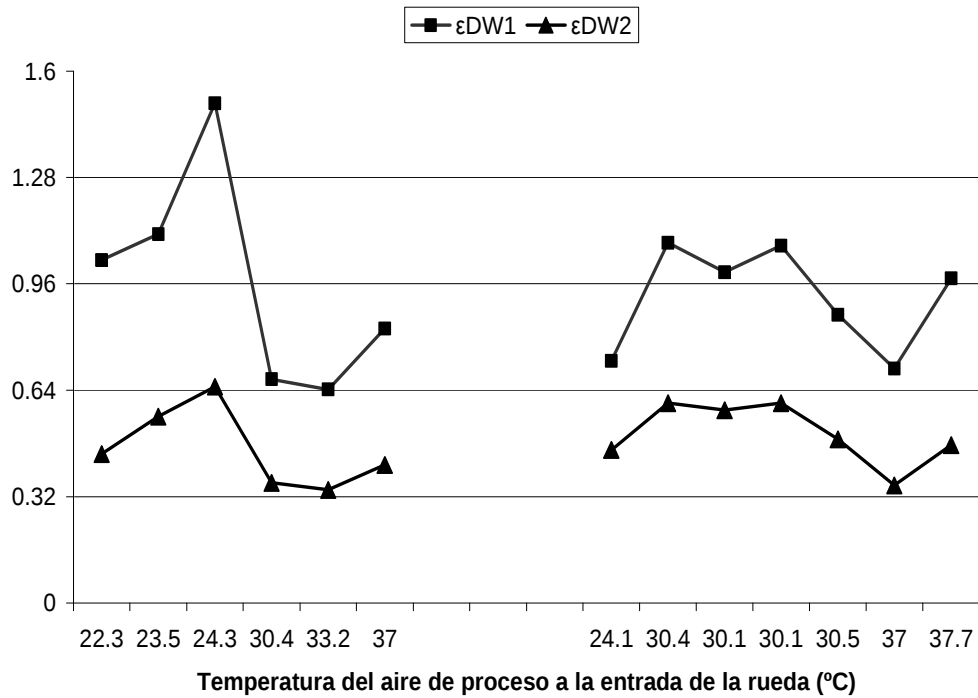


Figura 10. Impacto de T_{pi} en las efectividades latente y sensible de la rueda desecante

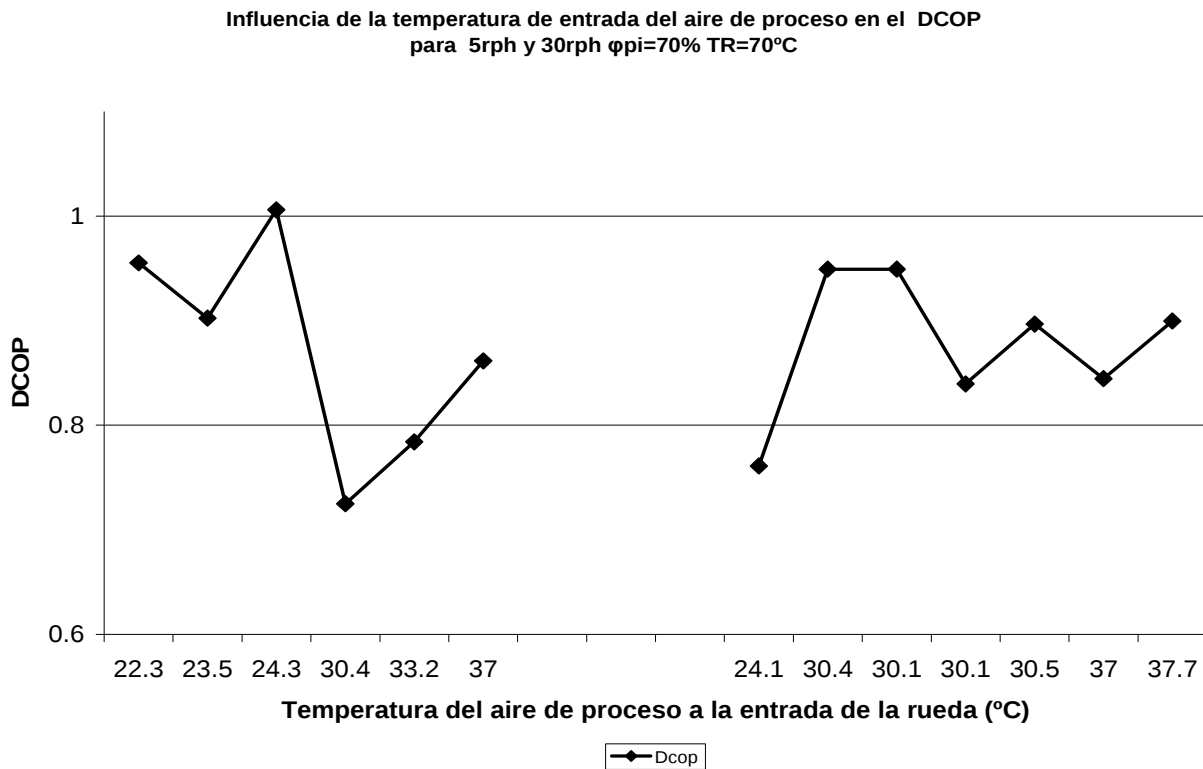


Figura 11. Impacto de la temperatura del aire en el DCOP

5. Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos muestran el impacto de los parámetros Temperatura y Humedad en el comportamiento de la rueda desecante, fundamentalmente se ha estudiado un rango de estos parámetros que equivale a condiciones climáticas tropicales, obteniéndose que los valores de temperatura de la corriente de aire de proceso a la salida de la rueda se encuentran fundamentalmente entre 35 y 42 °C, siendo su valor máximo 50 °C; en el caso de la humedad los valores obtenidos se encuentran en el orden de 7g/kg de aire seco, lo anterior permite pensar que el uso de las ruedas desecantes en sistemas híbridos para el acondicionamiento del aire en edificios es factible.

6. Referencias.

1. **SIMONSON, C. J. y BESANT, R. W.** Energy wheel effectiveness: part I- development of dimensionless group. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, nº 42, p. 2161-2170.
2. **SIMONSON, C. J. y R.W., B.** Energy wheel effectiveness: part II –correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, nº 42, p. 2171-2185.
3. **ZHANG, L. Z. y NIU, J. L.** A precooling Munters environmental control desiccant cooling cycle in combination with chilled – ceiling panels. *Energy*, 2003, nº 28, p. 275-292.
4. **CEJUDO, J. M.; MORENO, R., et al.** Physical and neural network models of a silica –gel desiccant wheel. *Energy and Buildings*, 2002, nº 34, p. 837-844.

5. **SUBRAMANYAM, N.; MAIYA, M. P., et al.** Application of desiccant wheel to control humidity in Air Conditioning Systems. *Applied Thermal Engineering*, 2004, nº 24, p. 2777-2788.
6. **MACLAINE-CROSS, I. L. y BANKS, P. J.** Coupled heat and mass transfer in regenerators: prediction using an analogy with heat transfer, International. *Journal of Heat Mass Transfer*, 1972, nº 15, p. 1225-1242.
7. **BANKS, P. J.** Prediction of heat and mass regenerator performance using nonlinear analogy method: Part 1. Basis. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1985, nº 107, p. 222-229.
8. **BANKS, P. J.** Prediction of heat and mass regenerator performance using nonlinear analogy method: Part 2 Comparison of methods. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1985, nº 107, p. 230-238.
9. **ZHENG, W. y WOREK, W. M.** Numerical Simulation of combined heat and mass transfer processes in a rotary dehumidifier. *Numerical Heat Transfer*, 1993, nº 23 (A), p. 211-232.
10. **TANTHAPANICHAKOON, W. y PRAWARNPIT, A.** New simple mathematical model of a honeycomb rotary absorption-type dehumidifier. *Chemical Engineering Journal*, 2002, nº 86, p. 11-15.
11. **DAOU, K.; WANG, R. Z., et al.** Desiccant Cooling air conditioning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, nº p. 1-23.
12. **JIA, C. X. y DAI, J. Y.** Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material. *Energy Conversion and Management*, October 2005.

Nomenclatura

DW	[-]	Rueda Desecante
M_p	[kg/s]	Flujo másico del aire de proceso
M_R	[kg/s]	Flujo másico del aire de regeneración
W	[g/kg]	Humedad absoluta o
ΔW	[g/kg]	Capacidad de Remoción de Humedad
B	[Pa]	Presión atmosférica
T	[K]	Temperatura
p _{vs}	[Pa]	Presión de saturación del vapor
h _v	[kJ/kg]	Calor Latente del vapor de agua
ϕ	%	Humedad Relativa
$\mathcal{DCOP}$	[-]	Coefficiente del comportamiento de la deshumidificación
ϵ_{DW}	[-]	Efectividad de la rueda desecante I
Subíndices		
i		Entrada
o		Salida
r		Aire de Regeneración
p		Aire de Proceso

T. Carbonell Morales¹, M. DePaepe²

1. Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Facultad de Ingeniería Mecánica
 Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” – CUJAE
 Calle 114 #11901 e/119 y 127. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.

E-mail: taniac@ceter.cujae.edu.cu

2. Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics. St.-Pietersnieuwstr. 41, B-9000 Gent, Belgium.

E-mail: michel.depaepe@ugent.be